



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO FENÔMENOS DE TRANSPORTE**

RAÍSSA XAVARÉ KULMAN

**PRODUÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A
PARTIR DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

Bagé - RS

2019

RAÍSSA XAVARÉ KULMAN

**PRODUÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A
PARTIR DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Gabriela Silveira da Rosa

Bagé - RS

2019

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

K95p Kulman, Raíssa Xavaré
PRODUÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A
PARTIR DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA / Raíssa
Xavaré Kulman.

64 p.

Dissertação(Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,
MESTRADO EM ENGENHARIAS, 2019.

"Orientação: Gabriela Silveira Da Rosa".

1. Lodo. 2. Adsorvente. 3. Carvão ativado. I. Título.

RAÍSSA XAVARÉ KULMAN

**PRODUÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A
PARTIR DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Gabriela Silveira da Rosa

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 27 de fevereiro de 2019.

Banca examinadora:



Prof^a. Dr^a. Gabriela Silveira da Rosa

Orientadora

UNIPAMPA



Prof^a. Dr^a. Elizangela Gonçalves de Oliveira

UFPEL



Prof^a. Dr^a. Tânia Regina de Souza

UNIPAMPA

AGRADECIMENTO

A Prof^a. Dr^a. Gabriela Silveira da Rosa, pessoa primordial para que este trabalho se realizasse. Impossível descrever minha gratidão a essa profissional excelente que sempre esteve presente, mesmo à distância, e por toda dedicação, atenção, paciência e zelo ao desafio que foi realizarmos esse trabalho.

Aos meus pais, Nirta e Celso, que não mediram esforços ao me apoiar nessa caminhada que não foi fácil para todos. Obrigada por fazerem até mesmo o impossível para que esse trabalho se realizasse, dedico essa conquista a vocês por todos ensinamentos que sempre ressaltavam a importância dos estudos.

Aos meus avós, Joana e José Domingos. Muito obrigada, por fazerem parte da equipe de não medir esforços para me apoiar nos estudos e inúmeras coisas boas que me proporcionam a fim de me dar forças de continuar sempre.

Aos meus amigos e amigas, por todo incentivo e por compreenderem minha ausência em diversos momentos em função de estudos.

Ao Departamento de Água e Esgotos de Bagé (DAEB) pelas amostras cedidas.

A Prof^a. Dr^a. Tânia Regina de Souza e a Prof^a. Dr^a. Elizangela Gonçalves de Oliveira por terem aceitado o convite para a banca examinadora da qualificação onde muito agregaram conhecimento enriquecendo o conteúdo do trabalho final e também pelo aceite do convite para banca da defesa final.

Por fim, ao responsável maior que permitiu que tudo isso se realizasse e eu trilhasse essa caminhada de grande aprendizado com saúde e pela saúde de todos que me rodeiam, principalmente por permitir ter meus avós ao lado nessa grande conquista. Obrigada Deus por todas bênçãos.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi a produção, caracterização e aplicação do carvão ativado oriundo do lodo da estação de tratamento de água da cidade de Bagé, a fim de propor uma alternativa de uso para esse resíduo. A metodologia consistiu no preparo da amostra de lodo através de operações como secagem, moagem e peneiramento. Após, o carvão ativado foi obtido através da operação de pirólise, utilizando um reator de aço *inox* na temperatura de 550 °C por 30 min. Foram produzidos dois carvões diferentes, um realizando somente a pirólise do lodo (CA) e outro utilizando o lodo após uma ativação química com cloreto de zinco e hidróxido de cálcio (CAP). Os carvões produzidos foram caracterizados através de análises físicas, químicas e morfológicas. Para verificar o potencial de aplicação dos carvões produzidos foram realizados ensaios de adsorção com intuito de remoção do azul de metileno (AM) presente em fase líquida, corante comumente utilizado em indústrias têxteis. As amostras de CA e CAP foram caracterizadas e apresentaram área superficial específica de 101,9 a 100,3 m².g⁻¹ e diâmetro de poro de 3,2 e 10,8 nm, respectivamente, sendo classificados como partículas mesoporosas. Através da análise termogravimétrica (TGA) observou-se que a amostra de CA não apresentou picos de perda de massa, indicando que a operação de pirólise foi efetiva na remoção dos compostos voláteis. A amostra de CAP indicou a presença de um pico de perda de massa em 500 °C, sendo este relacionado com a presença remanescente dos compostos químicos utilizados para a ativação química durante a produção do carvão. As análises de MEV demonstraram que a superfície do CA apresentou-se mais rugosa e com mais irregularidades, enquanto que a de CAP foi mais lisa, devido à presença remanescente de cloreto de zinco e hidróxido de cálcio. Os resultados obtidos através do estudo da adsorção de azul de metileno utilizando o CA e CAP foram promissores. A massa de carvão determinada nos testes preliminares foi fixa em 2 g por apresentar percentual de remoção do AM próximo de 100 %. Os resultados mostraram que a cinética de adsorção do AM utilizando CA e CAP é rápida, com remoção de mais de 50 % do corante em 2 min de processo. O modelo cinético de Elovich foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais, indicando a heterogeneidade da superfície dos carvões e a natureza química da adsorção. A isoterma de equilíbrio de adsorção classificou-se como do tipo IV e o melhor ajuste aos dados para a isoterma foi observado pelo modelo de Sips, com capacidades máximas de adsorção de 6,4 e 18,4 mg.g⁻¹ para CA e CAP, respectivamente. Sendo assim, os resultados desse estudo comprovaram a possibilidade de utilizar o lodo proveniente da estação de tratamento de água como matéria-prima para a produção de carvão ativado e desta forma agregar valor a esse resíduo produzido em larga escala.

Palavras-Chave: lodo, adsorvente, carvão ativado.

ABSTRACT

The objective of this work was the production, characterization and application of activated carbon or the water treatment plant of the city of Bagé, in order to propose an alternative use of this waste. The methodology consisted in the preparation of the sludge sample through operations such as drying, milling and sieving. After the activated carbon was obtained through the pyrolysis operation, using a stainless steel reactor at a temperature of 550 °C por 30 min. Two different active carbon were produced, one performing only the pyrolysis of the sludge (CA) and another using the sludge after a chemical activation with zinc chloride and calcium hydroxide (CAP). The produced active carbon were characterized by physical, chemical and morphological analyzes. In order to verify the potential of application of the active carbon produced adsorption tests were carried out with the aim of removing the methylene blue (AM) present in liquid phase, dye commonly used in textile industries. The samples of CA and CAP were characterized and had a specific surface area of 101.9 to 100.3 m².g⁻¹ and pore diameter of 3.2 and 10.8 nm, respectively, being classified as mesoporous particles. Through the thermogravimetric analysis (TGA) the sample of CA did not present peaks of mass loss, indicating that the pyrolysis operation was effective in the removal of the volatile compounds. The CAP sample indicated the presence of a mass loss peak at 500 °C, this being related to the remaining presence of the chemical compounds used for the chemical activation during the production of the active carbon. The analyzes of MEV showed that the surface of the CA was more rough and with more irregularities, whereas the one of CAP was smoother due to the remaining presence of zinc chloride and calcium hydroxide. The results obtained by studying the adsorption of methylene blue using CA and CAP were promising. The active carbon mass determined in the preliminary tests was fixed at 2 g because the percentage of AM removal was close to 100 %. The results showed that the adsorption kinetics of AM using CA and CAP is rapid, with removal of more than 50 % of the dye in 2 min of the process. The Elovich kinetic model was the best fit for the experimental data, indicating the heterogeneity of the surface of the active carbon and the chemical nature of the adsorption. The adsorption equilibrium isotherm was classified as type IV and the best fit to the isotherm data was observed by the Sips model, with maximum adsorption capacities of 6.4 and 18.4 mg.g⁻¹ for CA and CAP, respectively. Thus, the results of this study proved the possibility of using sludge from the water treatment plant as a raw material for the production of activated carbon and in this way add value to this residue produced in large scale.

Keywords: sludge, adsorbent, activated carbon.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Processos da estação de tratamento de água. | 14 |
| Figura 2 - Processo de adsorção. | 19 |
| Figura 3 - Etapa da cinética da adsorção..... | 20 |
| Figura 4 - Tipos de isotermas. | 22 |
| Figura 5 - Escala de grandeza dos poros..... | 23 |
| Figura 6 - Tanque de sedimentação e lodo bruto coletado..... | 25 |
| Figura 7 - Etapas para produção do CA..... | 26 |
| Figura 8 - Etapas para produção do CAP..... | 26 |
| Figura 9 - Moinho de facas..... | 27 |
| Figura 10 - Agitador eletromagnético e peneiras. | 27 |
| Figura 11 - Reator de aço inox. | 28 |
| Figura 12 - (A) Lodo após a secagem e (B) Lodo após a moagem. | 32 |
| Figura 13 - Pasta do lodo..... | 32 |
| Figura 14 - (A) CA e (B) CAP. | 33 |
| Figura 15 - Espectro das amostras de LB, CA e CAP. | 34 |
| Figura 16 - Curvas de TGA das amostras. | 35 |
| Figura 17 - Curvas de DTGA das amostras. | 35 |
| Figura 18 - Micrografia do lodo com magnificação de 100 até 3000 X..... | 36 |
| Figura 19 - Micrografia do CA com magnificação de 100 até 3000 X. | 37 |
| Figura 20 - Micrografia do CAP com magnificação de 100 até 3000 X. | 37 |
| Figura 21 - Curva de calibração do CA. | 38 |
| Figura 22 - Testes de massa do (A) CA e (B) CAP..... | 39 |
| Figura 23 - Determinação da melhor massa de adsorvente..... | 39 |
| Figura 24 - (A) Adsorção do CA e (B) Adsorção do CAP. | 40 |
| Figura 25 - Cinética de adsorção para o AM em CA..... | 41 |
| Figura 26 - Cinética de adsorção para o AM em CAP..... | 41 |
| Figura 27 - Concentração do AM em relação ao tempo no CA..... | 42 |
| Figura 28 - Concentração do AM em relação ao tempo no CAP..... | 42 |
| Figura 29 - (A) Equilíbrio do CA e (B) Equilíbrio do CAP..... | 45 |
| Figura 30 - Isoterma de equilíbrio para o CA..... | 46 |
| Figura 31 - Isoterma de equilíbrio para o CAP. | 46 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|-------------------------------------|----|
| Quadro 1 - Modelos cinéticos..... | 21 |
| Quadro 2 - Modelos de isoterma..... | 24 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Características físicas do CA e CAP. | 33 |
| Tabela 2 - Remoção de contaminantes utilizando carvões ativados de diferentes matérias primas. | 43 |
| Tabela 3 - Parâmetros dos modelos cinéticos avaliados. | 43 |
| Tabela 4- Continuação dos parâmetros dos modelos cinéticos avaliados. | 44 |
| Tabela 5 - Remoção de AM para o CA e o CAP. | 45 |
| Tabela 6 - Parâmetros dos modelos de isotermas de equilíbrio. | 47 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|----------|---|
| AM | Azul de metileno |
| ATR | Refletância Total Atenuada |
| BET | Brunauer, Emmet e Teller |
| CA | Carvão ativado |
| CAP | Carvão ativado provindo da pasta de lodo |
| CONAMA | Conselho Nacional do Meio Ambiente |
| DAEB | Departamento de Água e Esgotos de Bagé |
| DBO | Demanda Bioquímica de Oxigênio |
| DQO | Demanda Química de Oxigênio |
| DRX | Difração de Raios X |
| ERM | Erro relativo médio |
| ETA | Estação de Tratamento de Água |
| ETE | Estação de Tratamento de Esgoto |
| FT-IR | Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier |
| IUPAC | International Union of Pure and Applied Chemistry |
| MEV | Varredura Microscópica Eletrônica |
| NBR | Norma Brasileira |
| LB | Lodo bruto |
| OD | Oxigênio Dissolvido |
| pH | Potencial de Hidrogênio |
| TGA | Análise Termogravimétrica |
| UNIPAMPA | Universidade Federal do Pampa |

LISTA DE NOMENCLATURAS

| | |
|-----------------------------------|---|
| <i>a</i> | Taxa inicial do modelo de Elovich ($\text{mg.g}^{-1} \text{ min}^{-1}$) |
| <i>b</i> | Constante de dessorção do modelo de Elovich (mg.g^{-1}) |
| <i>C</i> | Concentração local na fase líquida (L.mg^{-1}) |
| <i>C_e</i> | Concentração do adsorbato no equilíbrio (mg.L^{-1}) |
| <i>C₀</i> | Concentração inicial média da fase líquida (mg.L^{-1}) |
| <i>C_i</i> | Concentração antes da adsorção (mg.L^{-1}) |
| <i>C_f</i> | Concentração após a adsorção (mg.L^{-1}) |
| <i>k₀</i> | Constante do modelo de Bangham ($\text{L}^2.\text{mg}^{-1}$) |
| <i>k₁</i> | Constante cinética de velocidade de pseudo-primeira ordem (min^{-1}) |
| <i>k₂</i> | Constante cinética de velocidade de pseudo-segunda ordem (g.mg.min^{-1}) |
| <i>k₁</i> | Constante de isoterma de BET (L.mg^{-1}) |
| <i>k₂</i> | Constante de isoterma de BET (L.mg^{-1}) |
| <i>K_F</i> | Constante de Freundlich (mg.g^{-1}) |
| <i>K_L</i> | Constante de Langmuir (L.g^{-1}) |
| <i>K_s</i> | Constante de Sips (L.mg^{-1}) |
| <i>m</i> | Expoente do modelo de Sips (adimensional) |
| <i>M</i> | Massa de adsorvente (g) |
| <i>n</i> | Parâmetro empírico que indica se a adsorção é favorável ou não(adimensional) |
| <i>q_{AV}</i> | Capacidade teórica de biossorção de Avrami (mg.g^{-1}) |
| <i>Q</i> | Capacidade de adsorção (mg.g^{-1}) |
| <i>Q_e</i> | Quantidade adsorvida por grama do adsorvente (mg.g^{-1}) |
| <i>Q_m</i> | Constante de energia (L.mg^{-1}) |
| <i>q_{BET}</i> | Capacidade máxima de adsorção (mg.g^{-1}) |
| <i>q</i> | Quantidade adsorvida por grama do adsorvente (mg.g^{-1}) |
| <i>q_e</i> | Capacidade teórica da adsorção (mg.g^{-1}) |
| <i>q_{i,model}</i> | Valores preditos pelo modelo ajustado e |
| <i>q_{i,exp}</i> | Valores obtidos experimentalmente |
| <i>R</i> | Percentual de remoção de AM (%) |
| <i>t</i> | Tempo (min) |
| <i>V</i> | Volume da solução (L) |
| <i>σ</i> | Constante do modelo de Bangham (adimensional) |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 10 |
| 2 OBJETIVOS | 12 |
| 2.1 Objetivo Geral | 12 |
| 2.2 Objetivos Específicos | 12 |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 13 |
| 3.1 Recursos Hídricos | 13 |
| 3.2 Tipos de tratamento e processos para consumo de água..... | 14 |
| 3.3 Resíduos gerados nas Estações de Tratamento de água e seu potencial de recuperação..... | 16 |
| 3.4 Lodo e potenciais aplicações..... | 17 |
| 3.5 Adsorção para tratamento de água e efluentes..... | 18 |
| 3.6 Cinética de Adsorção | 20 |
| 3.7 Equilíbrio de Adsorção..... | 22 |
| 4 MATERIAL E MÉTODOS | 25 |
| 4.1 Matéria-prima..... | 25 |
| 4.2 Preparo da amostra e obtenção do carvão ativado..... | 25 |
| 4.3 Caracterização dos carvões ativados..... | 28 |
| 4.4 Estudo do potencial de adsorção | 29 |
| 4.4.1 Curva de calibração do azul de metileno | 29 |
| 4.4.2 Testes preliminares de adsorção..... | 30 |
| 4.5 Determinação da cinética e isothermas de equilíbrio | 30 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 32 |
| 5.1 Preparo das amostras e produção dos carvões ativados | 32 |
| 5.2 Caracterização das amostras..... | 33 |
| 5.3 Estudos do potencial de adsorção | 38 |
| 5.3.1 Testes de massa | 38 |
| 5.3.2 Cinética de adsorção | 40 |
| 5.3.3 Isothermas de equilíbrio | 44 |
| 6 CONCLUSÃO | 48 |
| 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 49 |
| 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 50 |

1 INTRODUÇÃO

As águas superficiais e subterrâneas dispostas na natureza são chamadas de recursos hídricos. Esses recursos se apresentam na forma infinita e finita, a forma finita é quando fazemos uso desse recurso para abastecimento humano, logo está suscetível a escassez e, essa suscetibilidade depende somente do gerenciamento desses recursos por quem faz uso dele. No Brasil ainda os recursos hídricos são abundantes, refletindo cerca de 12 % da disposição mundial (GEO BRASIL, 2007).

Exemplo da alta demanda desses recursos é o uso deles em processos de abastecimento de água potável a população e saneamento básico, cuja responsabilidade é designada as Estações de Tratamento de Água (ETA) e Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), respectivamente, que fazem uso de operações unitárias para garantir este abastecimento. Tanto nas ETAs quanto ETEs, os resíduos gerados são denominados como lodo e, a quantidade de lodo gerado e também descartado nos cursos d'água é um volume abundante (OLIVEIRA; RONDON, 2016).

Existem inúmeras formas de reutilização do lodo gerado nas estações de tratamento de água e esgoto, como: recuperação do coagulante e reuso deste, uso do lodo como fertilizante orgânico e também utilizá-lo como adsorvente alternativo tendo em vista a discussão do reaproveitamento de diversos resíduos na produção de carvão ativado (FREITAS, 2015; BOEIRA, 2004; VASQUES et al., 2011).

O processo unitário de adsorção tem uso abundante no tratamento de efluentes pois, consiste em reter numa substância alguns contaminantes, o que acaba envolvendo a transferência de massa entre duas fases podendo esta ser tipo sólida-líquida ou sólida-gasosa. A capacidade de retenção de contaminantes depende das características e, principalmente da porosidade do adsorvente. O uso de adsorventes implica na remoção de cor, odor e determinados compostos; purificação de ar e gases em processos de reciclagem e alguns resíduos; separação e purificação de produtos com alto valor nutricional e valor farmacêutico (LIU et al., 2017; TADINI et al., 2016).

Embora o custo do carvão ativado comercial seja elevado ele é o adsorvente mais utilizado atualmente devido à eficácia na remoção de contaminantes, consequência da sua alta porosidade. Em contrapartida ao custo há estudos desenvolvidos que comprovaram que a produção de carvões ativados alternativos a partir de diferentes materiais apresentaram eficácia semelhante ao comercial, com percentuais de remoção de até 99 %. A produção desse

adsorvente pode ser feita a partir de diferentes matérias-primas, trivialmente opta-se por resíduos a fim de reduzir o volume dos mesmos, como por exemplo: palha de cevada (PALLARÉS; GONZÁLEZ-CENCERRADO; ARAUZO, 2018), biomassa da madeira (DANISH et al., 2018), composto de cogumelo (KARADIREK; OKKAY, 2018), lodo de estação de tratamento de esgoto (CHENG et al., 2018), lodo de estação de tratamento de água (WANG, ZHU EYIN, 2007; DONG, et al., 2019).

As características dos carvões ativados produzidos dependem dos materiais precursores e suas condições experimentais impostas na metodologia de ativação escolhida. A metodologia mais usual é a decomposição térmica, conhecida como pirólise, que faz uso de atmosfera inerte e elevada temperatura (PUCHANA-ROSETO et al., 2016; RIBAS et al., 2014).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Esse estudo teve por objetivo produzir e caracterizar o carvão ativado a partir do lodo da Estação de Tratamento de Água de Bagé, Rio Grande do Sul, bem como verificar o potencial de aplicação do mesmo como material adsorvente na remoção do corante azul de metileno.

2.2 Objetivos Específicos

- Produzir carvão ativado utilizando como matéria-prima o lodo de ETA através da pirólise;
- Caracterizar os carvões ativados produzidos a partir de análises física, química e morfológica;
- Determinar a cinética e as isotermas de equilíbrio da adsorção de azul de metileno utilizando os carvões ativados produzidos e avaliar os resultados utilizando modelos matemáticos disponíveis na literatura;
- Analisar o potencial de adsorção sólido-líquido do carvão ativado de lodo produzido na remoção do corante azul de metileno.

3 REVISÃO DE BILIOGRÁFICA

Nesta seção tem-se a abordagem conceitual do trabalho, explorando o referencial teórico sobre a disponibilidade de recursos hídricos, os processos de tratamento de água e resíduos gerados, bem como os potenciais de uso desses resíduos para a produção de carvão ativado. Também os conceitos sobre a operação unitária de adsorção são apresentados, assim como seus estudos de cinética e equilíbrio.

3.1 Recursos hídricos

Recursos hídricos são as águas disponíveis para o uso e aproveitamento, funções essas que asseguram o direito a esse bem imprescindível para a vida. No entanto, na prática esses recursos também são os mais atingidos pela poluição em razão de servirem como objeto de depósito para grande parte dos rejeitos e esgotos provindos das cidades (BORILE; SOUZA; CALGARO, 2016).

Independente se dispostos na condição superficial ou subterrânea o inábil gerenciamento compromete sua disposição, o que se deve a sua condição finita no planeta. A disponibilidade de água superficial no país representa 27,03 % do total dos recursos da América do Sul e 5,95 % dos recursos mundiais, tendo como colaboração as águas subterrâneas (AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS, 2015). Comparando esses dados com o estudo de Tucci, Hespanhol e Cordeiro (2000) observam-se que os volumes decrescem 5.171,33 m³ por ano.

A poluição que compromete não somente a qualidade e abastecimento da água quanto a biodiversidade e pode ser impedida se houver controle e tratamento prévio dos efluentes que advêm da cidade, o que garante a conservação desses recursos bem como os padrões de qualidade compatíveis com a potabilidade. Tais meios de controle e tratamento devem ter cuidados redobrados quando se trata de águas subterrâneas, pois embora menos suscetíveis, são mais comprometidas à poluição devido a sua recuperação lenta, uma vez que algumas substâncias não se decompõem. Nas águas superficiais a decomposição de substâncias é facilmente realizada com o apoio de processos físicos, químicos, físico-químicos e biológicos (SETTI et al., 2001).

3.2 Tipos de tratamento e processos para consumo da água

A qualidade da água distribuída à população é competência das ETAs que devem atender as condições de potabilidade seguindo os padrões da portaria nº 5 /2017 do Ministério da Saúde, que estabelece parâmetros em que a água tratada que é direcionada a população deve ser submetida a determinados processos. Segundo Derisio (2012), o estudo prévio da composição da água é apropriado para determinar se a poluição da água é orgânica, por contaminação bacteriana ou geral, entre outras. Existem diversos parâmetros pra determinar o tipo de poluição, alguns exemplos para a poluição orgânica é determinando através do estudo da demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), oxigênio dissolvido (OD), fenóis e cloretos. A poluição por contaminação bacteriana pode ser definida determinando o índice de coliformes totais e fecais, entre outras formas. Já a poluição geral pode ser caracterizada através do estudo do potencial hidrogeniônico (pH), temperatura da água, turbidez e outros compostos químicos. Após essas caracterizações podem ser obtidas as respostas necessárias para definir a potabilidade desse recurso.

O tratamento da água que abastece a população advém de diversos processos para viabilizar seu uso e retirar impurezas tornando-a potável, esses processos são denominados operações unitárias. Nas ETAs o tratamento mais usual consiste em após a captação da água bruta ela passar pelo gradeamento, que remove os sólidos grosseiros presentes, ser submetida aos demais processos, como: coagulação, floculação, sedimentação, filtração, desinfecção e fluoretação (PÁDUA; SANTOS; FREITAS, 2007). Processos esses, que podem ser visualizados na Figura 1.

Figura 1 - Processos da estação de tratamento de água.



Fonte: Adaptado de Governo de Santa Catarina, 2015.

O processo de coagulação consiste na adição substâncias químicas chamadas de coagulantes na água para separar as impurezas, uma vez que essa água caracteriza-se pela

presença de elevado conteúdo de sólidos. Ou seja, esse processo é uma alteração físico-química dos colóides presentes na água. Os colóides são partículas muito pequenas, com dimensões entre 1 e 0,1 nm, o que impossibilita que sejam identificados a olho nu. Eles caracterizam-se por possuírem propriedades elétricas que criam uma força de afastamento que os impede de ser aglomerados sem que haja adição de uma substância química e consequentemente inviabilizam a sua remoção por processos convencionais como, por exemplo, a sedimentação (WIMMER, 2007).

Os coagulantes mais utilizados nas estações de tratamento e há mais tempo, segundo Dempsey (1984, apud LOPES, 2014), são Sulfato de Alumínio, Cloreto Férrico, Sulfato Ferroso Clorado, Sulfato Férrico e Policloreto de Alumínio. Ainda, é indispensável o teste experimental da caracterização da água bem como a aplicabilidade de todos os coagulantes, para determinar sua eficiência e consequentemente o uso em cada estação de tratamento.

Após a adição dos coagulantes, que gera uma força de atração entre as partículas, a etapa da floculação é uma agitação lenta da água a fim de formar aglomerados maiores de partículas, com maior área e massa e facilmente removida em processos posteriores. Em alguns casos, durante o processo de floculação são adicionados polímeros sintéticos com a finalidade de auxiliarem a aglomeração das partículas com baixa decantabilidade. Os polímeros são classificados de acordo com a carga elétrica, sendo eles catiônicos, aniônicos ou não-iônicos, representando carga positiva, carga negativa e os que não possuem carga elétrica, respectivamente.

Segundo Santos Filho e Santa Rita (2002), o uso de polímeros catiônicos está cada vez mais elevado, embora seu custo unitário seja exorbitantemente mais elevado que o sulfato de alumínio, sua dosagem é menor do que a dosagem do coagulante tradicional, o que resulta num custo de implementação semelhante. Os polímeros não-iônicos são utilizados como coagulantes metálicos, e podem ser utilizados junto aos catiônicos, como processo complementar quando é desejado formar um determinado colóide. Os polímeros aniônicos também são utilizados como coagulantes metálicos.

Após a floculação a operação unitária que é aplicada é a sedimentação, onde as partículas aglomeradas são removidas através de forças gravitacionais. Segundo Silva (2003) essa separação ocorre quando as partículas têm massa específica maior que a massa específica da água e, portanto, elas se direcionam ao fundo do tanque de sedimentação (RITCHER, 2009). Nas estações de tratamento de água e esgoto esse processo é também chamado de

decantação, as unidades onde se realizam são os decantadores horizontais ou circulares (FREITAS, 2015).

Os tanques de sedimentação não são capazes de remover partículas de dimensão pequena e para que estas sejam removidas devem passar pelo processo de filtração, onde a água é transportada através de tanques compostos, geralmente, por leito de cascalho, areia e carvão que detêm as partículas restantes do processo de decantação (BOTERO, 2008).

A desinfecção com cloro junto da fluoretação na água é imprescindível, para eliminar organismos patogênicos ainda presentes na água e a segunda protege a população da cárie (PÁDUA; SANTOS; FREITAS, 2007).

3.3 Resíduos gerados nas Estações de Tratamento de Água e seu potencial de recuperação

Os resíduos são identificados de acordo com os processos que lhe deram origem e da sua constituição. Sabe-se que nas estações de tratamento de água a viabilização do uso da água requer aplicação de substâncias químicas para remover as impurezas presentes, com isso, há uma grande geração de resíduos sólidos, que se caracterizam como resíduo químico, pois têm alto teor de materiais originados dos processos de lavagem dos tanques de armazenamento, sedimentação e água da lavagem dos filtros, chamados de lodo (ACHON; CORDEIRO; BARROSO, 2008).

Esse resíduo ou subproduto gerado devido os processos convencionais de tratamento de água geralmente correspondem a 0,3 a 1 % do volume da água tratada (HOPPEN et al., 2005). Segundo Silva (2011, apud OLIVEIRA; RONDON, 2016), a produção média de lodo gerado nas ETAs no Brasil durante o ano é 4 milhões de toneladas.

Os cursos d'água são os destinatários desse resíduo gerado nas ETAs e seu despejo é fundamentado pela resolução nº 430 do Conselho Nacional do Meio ambiente (2011), desde que haja um tratamento prévio considerando a quantidade de substâncias químicas presentes. A lei nº 12.305/2010 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, os regulamenta como passíveis de reutilização. No entanto, segundo Reis et al. (2007), ainda há ocorrência do despejo inadequado e sem tratamento desses resíduos sólidos nos cursos d'água. O não cumprimento do tratamento prévio é julgado como crime ambiental, como fundamenta a lei nº 9.605/1998.

3.4 Lodo e potenciais aplicações

Dentre diversas técnicas de tratamento e recuperação do lodo gerado nas ETAs, a mais usual é a recuperação do coagulante presente no lodo proveniente do tanque de sedimentação. Silva (2003, apud FREITAS, 2015) esclarece que o processo de recuperação permite que a parte líquida seja reutilizada nos processos de tratamento de água e o resíduo sólido seja disposto de acordo com a legislação. A recuperação do coagulante presente no lodo pode ser feita pelas metodologias de via ácida, alcalina e troca iônica, que fazem uso de resinas ou membranas. Contudo, a mais utilizada por diversos países é a metodologia de recuperação por via ácida (BRANDÃO, 1998).

Segundo Brandão (1998, apud GUIMARÃES, 2005) os precursores no uso dessa metodologia foram os Japoneses, na década de 60, cidade de Higashimurayama aplicando-a em diversas unidades de ETAs assim como, na década posterior os Estados Unidos sucederam com a aplicação dessa metodologia com estudos em diferentes escalas, piloto e real. Tendo em vista que, os coagulantes mais utilizados são sulfato de alumínio e cloreto férrico, a recuperação por via ácida é exercida pela adição de ácido sulfúrico ou ácido clorídrico em lodos desidratados contendo alumínio ou ferro (GUIMARÃES, 2005).

Hoppen et al. (2005) estudaram a aplicabilidade desse resíduo no setor da construção civil, onde, substituindo 5 % da matéria prima pelo lodo foi possível a obtenção de blocos e peças de concreto. Acima de 5 % apresentou uso eficiente como contrapisos, placas de vedação, calçadas, entre outros. Na mesma linha da construção civil, a mistura do lodo com pó de pedra utilizada como camada sub-base de rodovias também se apresenta como alternativa viável, embora se tenham limitações em alguns tipos de solo (DELGADO, 2016).

Silveira, Koga e Kuroda (2013) estudaram a viabilidade do uso do lodo substituindo o solo em aterros sanitários, este se mostrou eficiente quando o teor de sólidos estiver em média de 80 %. O uso do lodo como recuperação de áreas degradadas e no uso agrícola também vem sendo aplicado, apesar do lodo das ETAs apresentarem menos nutrientes do que os lodos das estações de tratamento de esgoto e também a lixiviação do lodo presente no solo degradado contribuiu positivamente no aumento de sólidos dissolvidos para o lençol freático reduzindo o impacto ambiental num prazo, em média, de 10 anos (MOREIRA et al., 2009).

Outra aplicação potencial, considerada ainda inovadora, é o uso do lodo gerado da ETA para a produção de carvão ativado. O produto final obtido pode ser aplicado como material adsorvente alternativo para a remoção de contaminantes presentes em efluentes

líquidos e gasosos através da operação unitária de adsorção. Embora a literatura seja escassa com relação à produção de carvão ativado utilizando lodo de ETA, diversos trabalhos produziram este material utilizando como matéria-prima lodos provenientes de outras fontes como, por exemplo, de ETE (LI et al., 2017), de indústria alimentícia (YADAV; GARG, 2019) e de indústria de petróleo (CHEN et al., 2016).

Wang, Zhu e Yin (2007) produziram um carvão ativado advindo do lodo de ETA onde foi submetido a processos de secagem, moagem, peneiramento, ativação química e pirólise. O produto obtido apresentou a porosidade na qual se buscava para eficiência do carvão ativado, tendo caráter mesoporoso e um percentual de remoção de 99,6 % para o ácido brilhante escarlat.

Streit et al. (2018) fizeram uso do lodo proveniente de uma indústria de bebidas como adsorvente, através da ativação por pirólise, e este se mostrou eficiente no processo de remoção dos corantes vermelho nº 40 e cristal violeta atingindo um percentual de remoção próximo a 100 %.

No estudo de Djati et al. (2013) o processo de ativação do lodo de ETE a partir de tratamento térmico foi estudado, variando a temperatura entre 200 °C e 700 °C em no mínimo 2 h e máximo 5 h. Esses procedimentos permitiram a comparação entre o lodo ativado e um adsorvente comercial no processo de remoção do corante azul de metileno, mostrando eficiência similar, com uma média de remoção de 94 %.

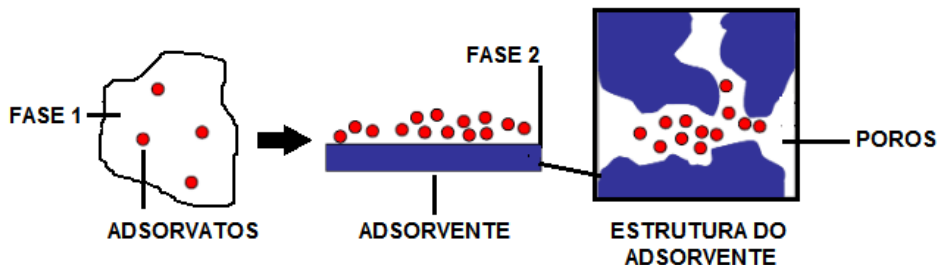
Também foi estudada a produção de carvão ativado em que os materiais utilizados foram lodo de ETE e sabugo de milho a fim de testar a capacidade de adsorção de iodo. O processo de ativação foi feito através de pirólise em diferentes temperaturas, entre 400 °C e 800 °C onde, foi comprovado que quanto maior a temperatura em que o CA foi pirolisado, a partir de 600 °C, menor foi o rendimento e capacidade de adsorção (ZHOU et al., 2019).

3.5 Adsorção para tratamento de água e efluentes

A adsorção é um fenômeno físico-químico que permuta componentes da fase fluida para a fase sólida, onde a força motriz desse fenômeno é a diferença de concentração entre o fluido e a superfície do sólido. Os compostos que são removidos da fase líquida ou gasosa são chamados de adsorvatos e a fase sólida que fixa os adsorvatos é chamada de adsorvente. Os materiais adsorventes são substâncias altamente porosas que se caracterizam por possuírem

elevada área superficial específica (RHEINHEIMER, 2016). A Figura 2 ilustra o que ocorre no processo de adsorção.

Figura 2 - Processo de adsorção.



Fonte: Adaptado de SEHGAL 2013.

Os adsorventes utilizados para remover as impurezas presentes em efluentes líquidos, mesmo que em pequenas concentrações, evitam o odor, a coloração e o gosto dentre outras situações adversas ao padrão e tem se mostrado eficientes em tecnologias como remoção de cobre em efluente sintético, remoção de paracetamol, remoção de fenilalanina, remoção de compostos orgânicos e inorgânicos em ETAs, entre outros (LOPES, 2016; RHEINHEIMER, 2016; CLARK, 2010; GUIMARÃES, 2005).

O carvão ativado é o adsorvente mais adotado em ETAs, podendo ser granulado ou em pó, tem sua eficiência decorrente da sua área superficial o que se deve a alta porosidade. Esse adsorvente é capaz de remover íons metálicos, bem como corantes orgânicos, agrotóxicos, entre outros. Tal funcionalidade superficial justifica a relevância do uso desse tipo de adsorvente no tratamento de efluentes industriais (MOREIRA, 2010), pois a adição do carvão ativado nos tanques de lodos faz que ocorra a oxidação e adsorção da substância contaminada, sendo que além da remoção de cor e odor presente na água outras vantagens do uso desse adsorvente seria seu comportamento estável durante as cargas de choque, melhora na sedimentação do lodo, entre outros (METCALF; EDDY, 2015). Em algumas ETAs o uso do carvão ativado é feito utilizando-o como material de recheio de filtros localizados previamente aos processos de cloração e fluoretação, com a finalidade de remover possíveis traços de cor e odor.

Assim como há o carvão ativado comercial, existem algumas possibilidades da produção desse adsorvente a partir de fontes alternativas. Derivado dos processos de carbonização do produto primitivo e ativação do mesmo devido seu alto teor de carbono, em

que, posteriormente sua eficácia pode ser analisada de acordo com suas características químicas e a porosidade (MOREIRA, 2010).

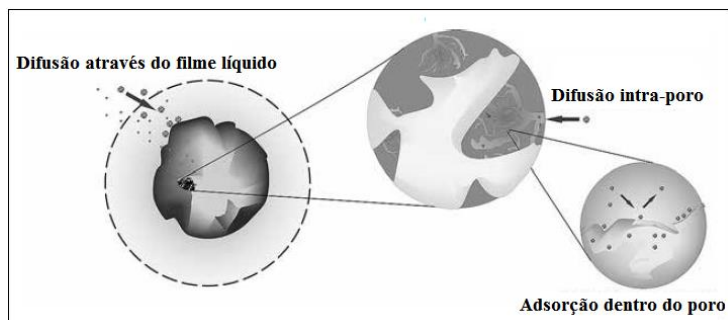
O processo primordial na produção desse adsorvente alternativo é um tratamento de decomposição térmica, em ambiente inerte (usualmente gás nitrogênio). Segundo Silva et al. (1990, apud MOREIRA, 2010) essa carbonização (ou também chamada de pirólise) remove os componentes voláteis e gases leves (CO , H_2 , CO_2 e CH_4) a fim de produzir uma massa sólida de carbono fixo de estrutura porosa.

O tratamento que dá continuidade a essa produção é a ativação, que pode ser duas formas: física ou química. A física onde uma deve ocorrer uma gaseificação do carvão com gases contendo oxigênio a fim de aumentar a porosidade do produto. Na ativação química utilizam-se substâncias químicas que agem sobre o produto através da transferência de elétrons, formando monocamadas e ocorrente em altas temperaturas (DASTGHEIB; ROCKSTRAW, 2002; CLAUDINO, 2003; TEIXEIRA; COUTINHO; GOMES, 2001).

3.6 Cinética de Adsorção

É na cinética da adsorção que a taxa de remoção do adsorvato em relação ao tempo é determinada. Esse processo ocorre quando o adsorvato entra em contato com a superfície adsorvente e as moléculas se movem em uma determinada velocidade, envolvendo a transferência de massa da parte fluida para a parte externa do adsorvente (chamada difusão através do filme líquido), a propagação por entre os poros (difusão intra-poro) e difusão total das moléculas entre os poros (adsorção dentro do poro). Essas etapas podem ser visualizadas na Figura 3.

Figura 3 - Etapa da cinética da adsorção.



Fonte: NASCIMENTO et al., 2014.

Na cinética, a taxa de remoção é de suma importância porque é através dela que é possível identificar ou não a viabilidade da implantação do estudo. Segundo Dias (2013), a velocidade desse processo depende de inúmeras características físico-químicas do adsorvato (massa molar, natureza do adsorvato, solubilidade, entre outros), adsorvente (natureza do adsorvente, estruturas, tamanhos dos poros, entre outros) e da solução (pH, temperatura e concentração).

Diversos modelos foram desenvolvidos para se obter as constantes intrínsecas das taxas cinéticas. Dentre esses modelos os mais utilizados são os apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 - Modelos cinéticos.

| | | |
|------------------------|--|-----|
| Pseudo-primeira ordem | $q = q_e (1 - \exp (-k_1 t))$ | (1) |
| Pseudo-segunda ordem | $q = \frac{t}{\left(\frac{1}{k_2 q_e^2}\right) + \left(\frac{t}{q_e}\right)}$ | (2) |
| Difusão Intrapartícula | $q = k_1 t^{1/2} + C$ | (3) |
| Elovich | $q = \frac{1}{a} \ln (1 + abt)$ | (4) |
| Avrami | $q = q_{AV} (1 - \exp (-k_{AV} t)^n)$ | (5) |
| Bangham | $\log \left[\log \left(\frac{C_0}{C_0 - q_t M} \right) \right] = \log \left(\frac{k_0 M}{2.303 V} \right) + \sigma \log(t)$ | (6) |

Fonte: DOTTO, 2012.

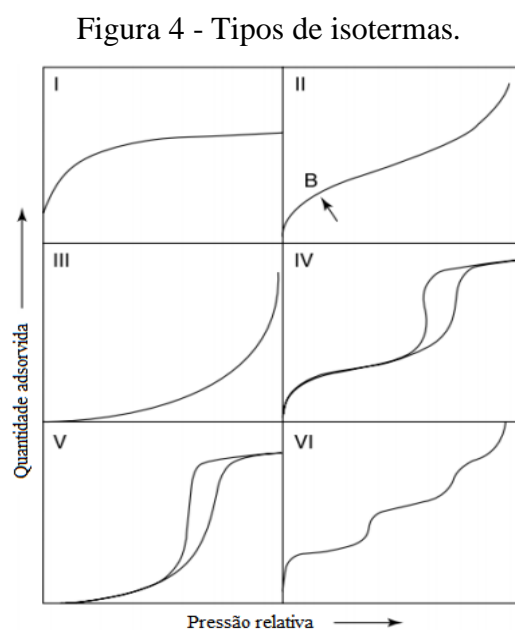
Em que, q é a quantidade adsorvida por grama do adsorvente (mg.g^{-1}), q_e é a capacidade teórica da adsorção (mg.g^{-1}), k_1 é a constante cinética de velocidade de pseudo-primeira ordem (min^{-1}), t é o tempo (min), k_2 é a constante cinética de velocidade de pseudo-segunda ordem (g.mg.min^{-1}), C é a concentração local na fase líquida (L.mg^{-1}), a é a taxa inicial do modelo de Elovich ($\text{mg.g}^{-1} \text{min}^{-1}$), b é a constante de dessorção do modelo de Elovich (mg.g^{-1}), q_{AV} é a capacidade teórica de biossorção de Avrami (mg.g^{-1}), n é o expoente do modelo de Avrami (adimensional), C_0 é a concentração inicial média na fase líquida (L.mg^{-1}), k_0 é a constante do modelo de Bangham ($\text{L}^2.\text{mg}^{-1}$), M é a concentração de bioadsorvente no modelo de Bangham (L.mg^{-1}), V é o volume da solução (L) e σ é a constante do modelo de Bangham (adimensional).

Os modelos pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem são amplamente utilizados em casos de adsorção em soluções líquidas. O modelo pseudo-primeira ordem ou, também conhecido como equação de Lagergren foi desenvolvido em 1989 e foi o precursor nesses processos e é aplicado geralmente em circunstâncias que exigem mais tempo. Esse modelo assume que a sorção é decorrente do gradiente de concentração entre a superfície do adsorvente e a solução, logo, denota a quantidade da adsorção em equilíbrio, que pode ser visualizado na Equação 1. Já o modelo pseudo-segunda ordem obtém até a taxa de adsorção inicial e envolve os mecanismos de transferência de massa, evidenciando a capacidade de adsorção, que pode ser visualizado na Equação 2 (KEHL, 2015).

3.7 Equilíbrio de Adsorção

A termodinâmica é responsável pela relação do adsorvato e o adsorvente, seu equilíbrio de fases envolve a taxa das moléculas que adsorvem igual a taxa de dessorção. Existem funções que descrevem esse comportamento e elas dependem de diversos fatores como temperatura, concentração no fluido, concentração no sólido, entre outras e é representada por gráficos de isotermas (TADINI et al., 2016).

Existem 6 tipos de isotermas consideradas pela IUPAC, e estas descrevem a forma de adsorção, estimam a quantidade do soluto adsorvido e também informações que determinam a viabilidade econômica do seu uso. Os tipos de isotermas apresentam-se na Figura 4.



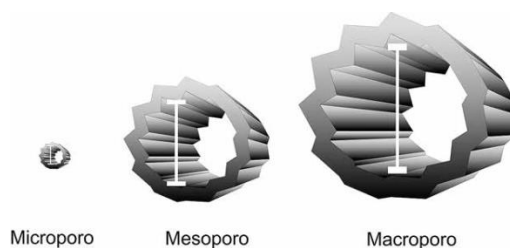
Fonte: NEIMARK; SING; THOMMES, 2008.

Segundo Nascimento et al. (2014), a classificação das isotermas decorre:

- A isoterma tipo I é característica de adsorventes com micro poros;
- As isotermas tipo II são características de adsorventes não porosos ou mesoporosos;
- As isotermas tipo III são características de adsorvatos que interagem mais entre si do que com o adsorvente, sendo estes descartados quando o interesse se trata de análise da estrutura porosa;
- As isotermas tipo IV são características adsorventes com poros relativamente grandes, ou seja, adsorventes mesoporosos;
- As isotermas tipo V são características similares as isotermas tipo III;
- As isotermas tipo VI são características de quando há adsorção de gás por sólidos não porosos e com superfície uniforme.

A porosidade dos adsorventes podem ser classificadas como microporo (diâmetro < 2nm), mesoporo (diâmetro na faixa 2-50 nm) ou macroporoso (diâmetro > 50nm). Na Figura 5 a escala de ordem de grandeza pode ser vista.

Figura 5 - Escala de grandeza dos poros.



Fonte: NASCIMENTO et al., 2014.

Não obstante das isotermas, há alguns modelos que foram desenvolvidos para interpretá-las, sendo os modelos de Langmuir, Freundlich e por fim, Brunauer, Emmett e Teller (BET) que frequentemente são utilizados nesses estudos e encontram-se no Quadro 2.

O modelo de Langmuir descreve de forma quantitativa a formação de uma fina camada ao entorno do adsorvente, postas horizontalmente formando uma monocamada (desde que tenha uma superfície com locais finitos e idênticos) onde, posteriormente não ocorre mais adsorção representando assim, a distribuição de equilíbrio de íons metálicos entre as fases. O modelo Freundlich faz uso das isotermas para condições estáticas em superfícies heterogêneas e o modelo BET, contrário ao de Langmuir, descreve a formação de uma multicamada

(DADA et al., 2012; OLATEJU, ADEODU, DANIYAN, 2014; MEL'GUNOV, AYUPOV, 2017).

Quadro 2 - Modelos de isotermas.

| | | |
|------------|--|-----|
| Langmuir | $Q_e = \frac{Q_m K_L C_e}{1 + Q_m C_e}$ | (7) |
| Freundlich | $Q_e = K_F C_e^{1/n}$ | (8) |
| BET | $Q_e = \frac{q_{BET} K_1 C_e}{(1 - k_2 C_e)(1 - k_2 C_e + k_1 C_e)}$ | (9) |

Fonte: OLATEJU, ADEODU, DANIYAN, 2014; MARTINS ET AL., 2015.

Em que, Q_e é a quantidade adsorvida por grama do adsorvente (mg.g^{-1}), Q_m é a constante de energia (L.mg^{-1}), K_L é a constante de Langmuir (L.g^{-1}), C_e é a concentração do adsorbato no equilíbrio (mg.L^{-1}), K_F é a constante de Freundlich (mg.g^{-1}), n é o parâmetro do modelo de Freundlich (adimensional), q_{BET} é a capacidade máxima de adsorção (mg.g^{-1}), K_1 , k_1 e k_2 são constantes (L.mg^{-1}).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Matéria-prima

O lodo bruto (LB), proveniente da estação de tratamento de água foi coletado no Departamento de Água e Esgoto de Bagé, Rio Grande do Sul. A coleta foi realizada às 8 h no dia 26 de Agosto de 2018, dia este destinado a limpeza do tanque de sedimentação. O local de coleta e a amostra de lodo podem ser visualizados na Figura 6.

Figura 6 - Tanque de sedimentação e lodo bruto coletado.



Fonte: Autora, 2018.

4.2 Preparo da amostra e obtenção do carvão ativado

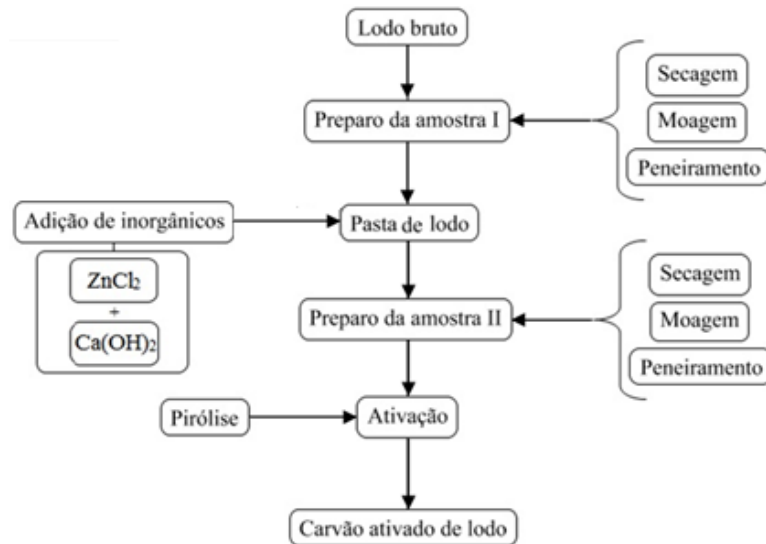
O lodo bruto coletado foi submetido a diferentes processos para a produção de dois carvões ativados. Os processos que envolvem a produção do primeiro carvão ativado (CA) e do segundo carvão ativado (CAP) podem ser visualizados na Figura 7 e 8, respectivamente.

Figura 7 - Etapas para produção do CA.



Fonte: Autora, 2018.

Figura 8 - Etapas para produção do CAP.



Fonte: Autora, 2018.

Conforme apresentado nas Figuras 7 e 8, após a coleta, o LB foi submetido à secagem em estufa (Nova Ética, modelo 109-1) em 65 °C durante 48 h. Retirada a umidade da amostra, foi realizada a moagem em moinho de facas (Marconi, modelo Croton), conforme Figura 9.

Figura 9 - Moinho de facas.



Fonte: Autora, 2018.

Após a moagem do LB seco foi realizada a separação granulométrica das partículas, utilizando a técnica de peneiramento em agitador de peneiras eletromagnético (Bertel, modelo 4830), conforme a Figura 10, com velocidade intermediária e durante 20 min.

Figura 10 - Agitador eletromagnético e peneiras.



Fonte: Autora, 2018.

Após a agitação as partículas com diâmetro inferior a $495 \mu\text{m}$ foram separadas para serem utilizadas nos tratamentos posteriores.

Seguido do peneiramento foram realizados dois tratamentos diferentes para a produção de carvão ativado. O primeiro consistiu em realizar a pirólise do lodo seco e o segundo

consistiu em realizar uma ativação química do lodo seco, prévia à produção do carvão ativado por pirólise.

Adaptada de Puchana-Rosero et al. (2016) a ativação química foi realizada através do emprego de componentes inorgânicos e essa etapa consistiu na diluição de cloreto de zinco (ZnCl_2 , 200 g) e hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2 , 50 g) em 100 mL de água destilada e consequentemente uma mistura com 250 g de LB, formando uma pasta de lodo. A pasta de lodo foi submetida à secagem em estufa, a 105 °C por 16 h e então, novamente fez-se a moagem, peneiramento e separação das partículas com diâmetros inferiores a 495 μm .

Para a produção dos carvões ativados utilizou-se a técnica de pirólise. A pirólise foi executada em reator de aço *inox* (Figura 11) na temperatura de 550 °C durante 30 min sob uma atmosfera de N_2 . A taxa de aquecimento da mufla em que o reator estava inserido foi de 3 °C/min. Os produtos obtidos foram denominados como carvão ativado (CA) e carvão ativado proveniente da pasta de lodo (CAP).

Figura 11 - Reator de aço inox.



Fonte: Autora, 2018.

4.3 Caracterização dos carvões ativados

Foram realizadas as caracterizações física, química e morfológica dos CAs produzidos, para obtenção da massa específica, composição, estabilidade térmica, área superficial específica, volume e diâmetro de poros e morfologia.

A massa específica real foi determinada por picnometria de gás hélio, na pressão de 17,5 psig e temperatura de 12,5 °C utilizando Quantachrome Corporation (modelo Ultrapyc 1200e).

A área superficial específica e volume de poros foram determinados através da técnica de BET usando o Quantachrome Instruments (modelo NOVA 4200e). O conhecimento das informações características dos poros é fundamental para determinar o tamanho e a transitabilidade das moléculas do adsorvato para a superfície interna do adsorvente e sua capacidade de adsorção.

A técnica de Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FT-IR) é aplicada para caracterizar a estrutura química do material e decorre da interferência da radiação entre dois feixes que resultam em um interferograma, este, por sua vez é o registro dos sinais produzidos que podem ser obtidos através de tratamento matemático pelas transformadas de Fourier (LEITE, 2008). A análise foi realizada por FT-IR, através de um espectrômetro Perkin-Elmer (UATR Two), pela técnica de Refletância Total Atenuada (ATR), sem necessidade de preparação prévia da amostra, no intervalo de 400 a 4000 cm^{-1} , com 32 varreduras por espectro e resolução de 4 cm^{-1} .

As análises termogravimétricas (TGA) acompanham a variação de massa da amostra em função da oscilação de temperatura (DENARI; CAVALHEIRO, 2012). As análises de TGA foram obtidas através do equipamento SHIMADZU TGA 50, utilizando como fluido o gás N_2 .

A morfologia da superfície das amostras foi realizada pela técnica de Varredura Microscópica Eletrônica (MEV) (Carl Zeiss, EVO MA10). Esse processo consiste na incidência de feixes finos de elétrons na superfície estudada e sua interação, gerando sinais que são captados e convertidos em imagens que indicam a morfologia do material.

4.4 Estudo do potencial de adsorção

Para a avaliação do potencial de utilização dos carvões ativados produzidos na remoção do corante azul de metileno (AM) foram realizadas as seguintes etapas:

4.4.1 Curva de calibração do azul de metileno

Para obtenção da curva de calibração do corante AM (REAGEN ULTRAPURE CHEMICALS DO BRASIL LTDA) utilizou-se soluções na faixa de concentração entre 0,5 e 20 ppm. As leituras de absorvância foram realizadas em espectrofotômetro UV visível (Equilam, modelo UV755B) no comprimento de onda 665 nm.

4.4.2 Testes preliminares de adsorção

Os testes preliminares de adsorção serviram para verificar a potencialidade de remoção do AM através dos carvões ativados obtidos. Nesses ensaios a adsorção foi realizada em batelada. A solução mãe de corante AM (50 mL a 70 ppm) foi colocada em contato com diferentes massas dos adsorventes (0,1; 0,5; 1,0 e 2,0 g) utilizando *erlenmeyres*. As amostras, agitadas em mesa agitadora (NOVA ÉTICA, modelo 109-1) a 120 rpm durante 40 min. Após, para decantar os sólidos presentes nas soluções, as amostras foram submetidas a centrífuga (QUÍMIS) por 10 min a 3000 rpm. Para determinar a concentração final (após adsorção) na fase líquida determinou-se a absorvância em espectrofotômetro com comprimento de onda 665nm.

Na determinação da capacidade de adsorção e percentual de remoção foram utilizadas as Equações 10 e 11, respectivamente.

$$Q = \frac{C_i - C_f}{M} \cdot V \quad (10)$$

$$R = \frac{C_i - C_f}{C_i} \cdot 100 \quad (11)$$

em que Q a capacidade de adsorção, C_i a concentração antes da adsorção (mg.L^{-1}), C_f é a concentração após a adsorção (mg.L^{-1}), M a massa de adsorvente (g), V o volume da solução (L), R o percentual de remoção de AM (%) e 100 o fator para expressar o resultado em porcentagem.

4.5 Determinação da cinética e isotermas de equilíbrio

A taxa de remoção do adsorvato na fase fluida em relação ao tempo foi feita pela análise cinética de adsorção, utilizando a massa definida nos testes preliminares. Foram realizados ensaios de adsorção nos tempos de 2, 5, 10, 20, 30, 40, 60 e 90 min. Após agitação em *shaker* as amostras foram centrifugadas por 10 min a 3000 rpm e a absorvância determinada em espectrofotômetro. Os ensaios foram realizados em duplicatas.

Para a determinação da isoterma de equilíbrio foram avaliadas diferentes concentrações da solução de AM em contato com a massa de adsorvente determinada preliminarmente. Após agitação até equilíbrio (2 h) e centrifugação, a determinação da

concentração remanescente de AM foi feita em espectrofotômetro. Os ensaios foram realizados em duplicatas.

Fez-se o uso de modelos matemáticos da literatura para o estudo da cinética da adsorção e isothermas de equilíbrio, conforme Quadro 1 e Quadro 2. Os parâmetros dos modelos matemáticos foram determinados através de regressão não linear e método de estimativa Quase Newton, em *software* estatístico. Para a análise da qualidade dos ajustes dos modelos aos dados experimentais a avaliação do R^2 , assim como o cálculo do Erro relativo médio (ERM) foram calculados, conforme Equação 12.

$$ERM = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{q_{i,model} - q_{i,exp}}{q_{i,exp}} \right| \quad (12)$$

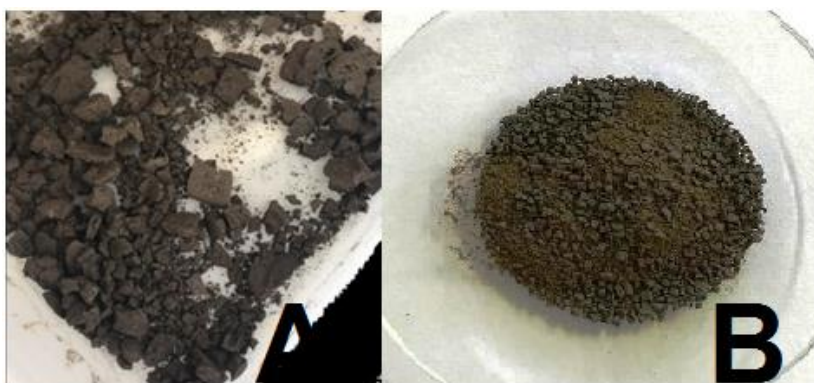
Em que $q_{i,model}$ os valores preditos pelo modelo ajustado e $q_{i,exp}$ os valores obtidos experimentalmente que permitem obter um resultado em percentual.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Preparo das amostras e produção dos carvões ativados

O aspecto visual do lodo após submetido a secagem e moagem, no processo de preparo da amostra pode ser visto na Figura 12-A e 12-B, respectivamente.

Figura 12 - (A) Lodo após a secagem e (B) Lodo após a moagem.



Fonte: Autora, 2018.

A pasta do lodo obtida após a adição de inorgânicos e secagem no preparo da amostra (CAP) pode ser vista na Figura 13.

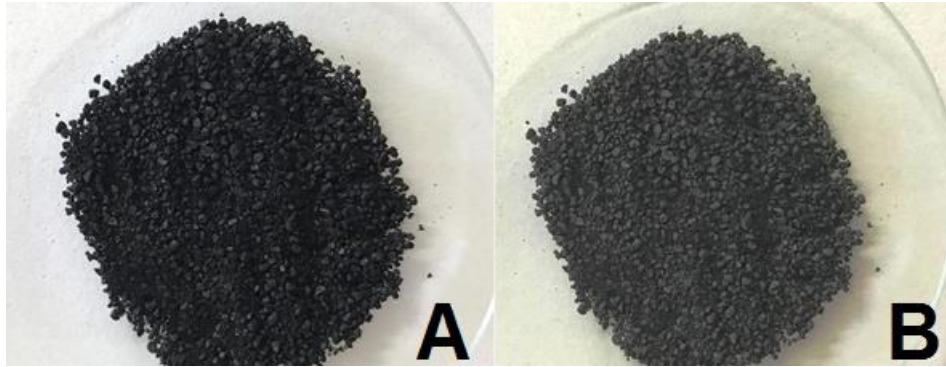
Figura 13 - Pasta do lodo.



Fonte: Autora, 2018.

O CA e o CAP produzidos através da pirólise podem ser vistos na Figura 14-A e 14-B.

Figura 14 - (A) CA e (B) CAP.



Fonte: Autora, 2018.

5.2 Caracterização das amostras

As amostras dos carvões ativados obtidos foram caracterizadas conforme as análises a seguir.

A Tabela 1 apresenta as características físicas dos carvões produzidos. Essas foram obtidas através das isotermas de N_2 .

Tabela 1 - Características físicas do CA e CAP.

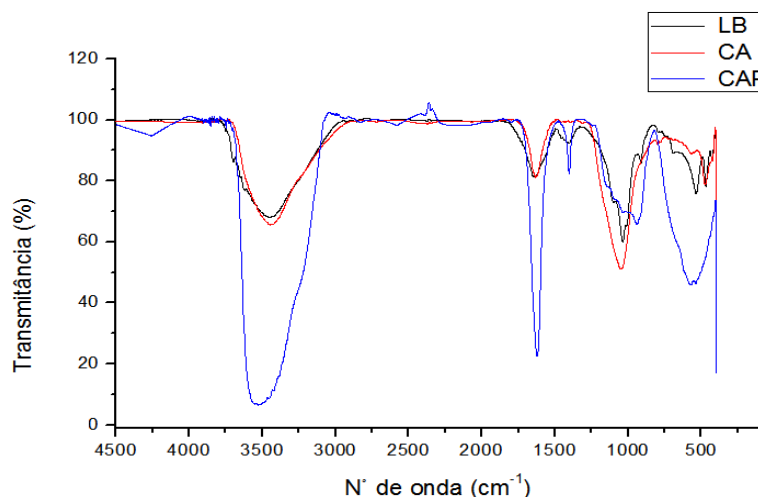
| Amostra | S_{BET} (m^2/g) | V_t (cm^3/g) | D_p (nm) | f (g/cm^3) |
|---------|-----------------------|--------------------|------------|---------------------|
| CA | 101,90 | 0,108 | 3,241 | $2,5229 \pm 0,0009$ |
| CAP | 100,30 | 0,271 | 10,810 | $2,7315 \pm 0,0016$ |

Fonte: Autora, 2019.

Como pode ser observado na Tabela 1, os carvões produzidos apresentaram áreas superficiais específicas (S_{BET}) semelhantes. Quanto ao volume total dos poros (V_t) e o diâmetro dos poros (D_p) foram maiores para o CAP do que para o CA, indicando que a incorporação de componentes inorgânicos para ativação química foi responsável pelo aumento dos poros (DOTTO, 2012; WANG; ZHU; YIN, 2007; TANG; ZHENG; ZHANG, 2018). Contudo, apesar da diferença do D_p , ambos carvões indicam que o processo de ativação produziu partículas mesoporosas (entre 2-50 nm). Wang, Zhu e Yin (2007) ao produzirem carvão ativado a partir de lodo de ETA também caracterizaram o adsorvente obtido como mesoporoso.

As propriedades químicas de carvões ativados também definem a capacidade de adsorção destes, sendo assim os espectros de FTIR do LB, CA e CAP são apresentados na Figura 15, em que a análise foi realizada na faixa do infravermelho médio (4500 a 375 cm^{-1}) em 50 varreduras e uma resolução espectral de 2 cm^{-1} .

Figura 15 - Espectro das amostras de LB, CA e CAP.

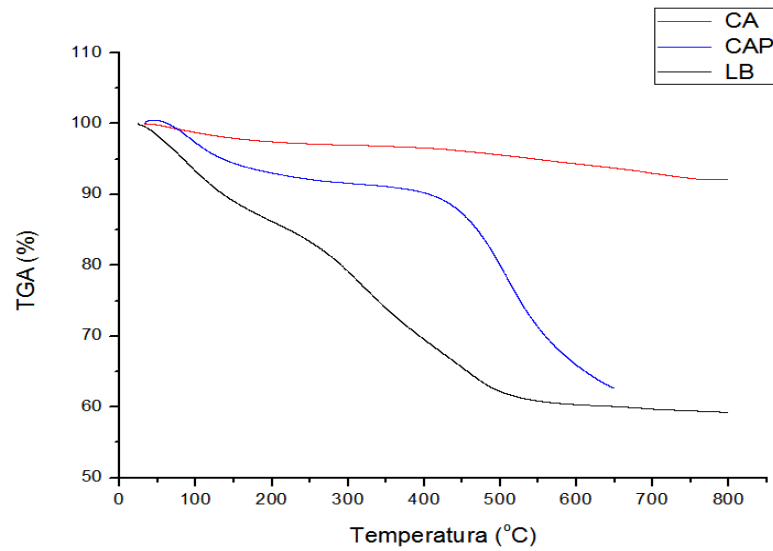


Fonte: Autora, 2019.

Pode-se observar de forma evidenciada que após a pirólise as bandas se alteram. As amostras apresentam uma banda intensa a 3400 cm^{-1} onde é atribuída a presença de grupos de O-H alcoólicos e fenólicos capazes de esticar as vibrações. O pequeno ombro que se apresenta em 3125 cm^{-1} indica presença de grupos de O-H hidrogênicos de estiramento. As bandas finas que estão na região do 3000-2500 cm^{-1} indicam a presença de ligações de C-H alcanos que correspondem a vibrações de estiramento. Os ácidos carboxílicos nas bandas entre 1850 -1610 cm^{-1} confirmam vibrações de estiramento de C=O, sendo assim o pico que se apresenta em 1625 cm^{-1} indica a presença do grupo funcional no material precursor. A presença de radicais com CH_3 é notada nos picos estreitos 1700 cm^{-1} em todas as amostras. As bandas evidentes nas amostras na região de 1000-1300 cm^{-1} podem indicar presença de grupos de C-O. Os adsorventes produzidos e o lodo bruto possuem grupos funcionais de superfícies similares (LOPES; FASCIO, 2004; SCHULTZ, 2016; ODA, 2017).

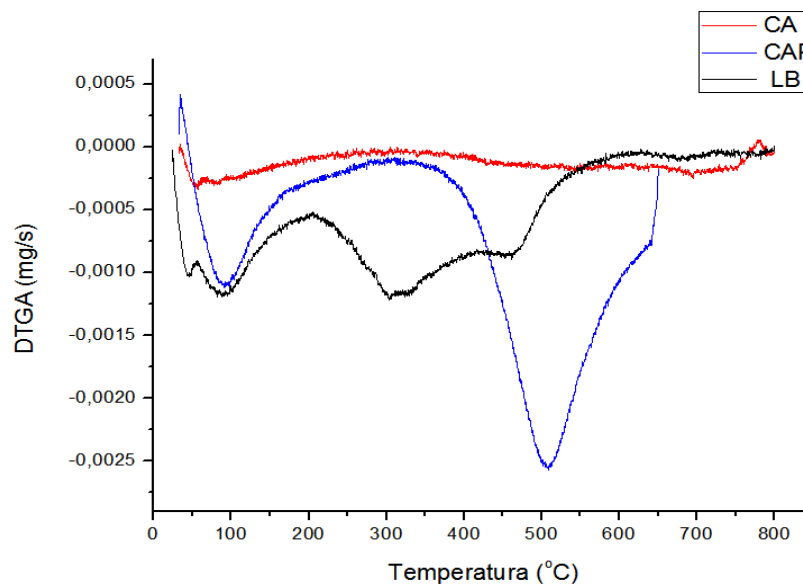
As Figuras 16 e 17 ilustram os perfis de degradação térmica do LB, CA e CAP.

Figura 16 - Curvas de TGA das amostras.



Fonte: Autora, 2018.

Figura 17 - Curvas de DTGA das amostras.



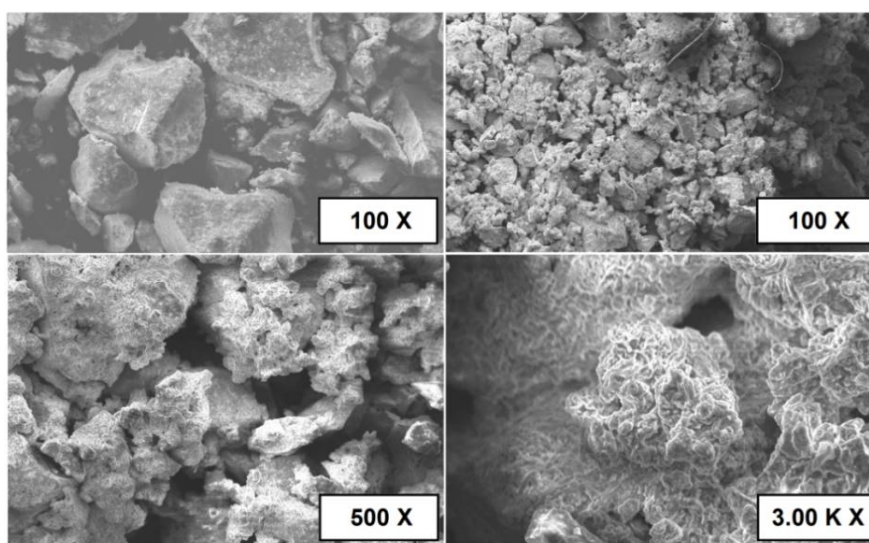
Fonte: Autora, 2018.

Embora ambas figuras apresentem perda de massa em função da variação de temperatura estas se diferem em questão de massa residual final e também, nos perfis de degradação. Os picos de perda de massa observados em temperaturas inferiores a 100 °C são relacionados com a umidade absorvida e cristalização dos inorgânicos no material precursor. Essa perda de massa está associada ao caráter argiloso do lodo e presença de caulinita, que é característico do lodo de ETA (OLIVEIRA; MACHADO; HOLANDA, 2004). Após, tem-se a decomposição da matriz carbonácea, reduzindo cada vez mais a massa da amostra onde, o LB

se caracterizou por apresentar um pico em destaque próximo a 300 °C devido à degradação dos grupos de oxigênio da superfície da matéria e decomposição da matéria orgânica. Esse pico, bem como o pico observado em 375 °C, podem estar ligados à presença de coagulantes usados nos processos de tratamento da água (LIMA, 2015). O CA não apresentou picos de perda de massa, sendo esse fato atribuído a completa combustão/pirólise dos compostos voláteis presentes no lodo durante a operação de ativação térmica. O CAP apresentou um pico de perda de massa evidente em 500 °C, que está relacionado à presença remanescente de cloreto de zinco e hidróxido de cálcio utilizados para a ativação química (LINHARES, MARCÍLIO, MELO, 2016; PUCHANA-ROSETO et al., 2016). Maiores temperaturas durante a operação de pirólise poderiam proporcionar a degradação completa destes compostos, entretanto, o equipamento utilizado no laboratório apresentava limitação de temperatura de 550 °C.

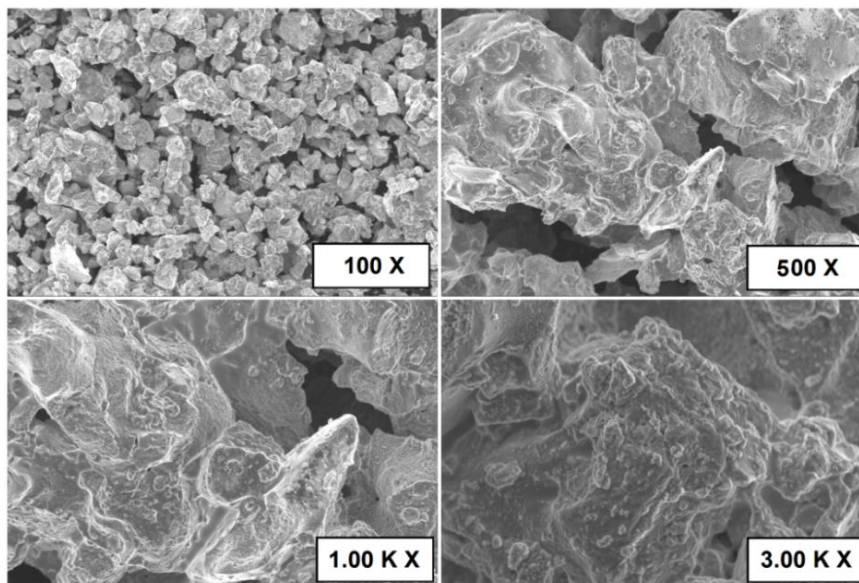
A Figura 18 apresenta a micrografia do lodo antes do processo de pirólise, enquanto as Figuras 19 e 20 representam os carvões produzidos CA e CAP, respectivamente.

Figura 18 - Micrografia do lodo com magnificação de 100 até 3000 X.



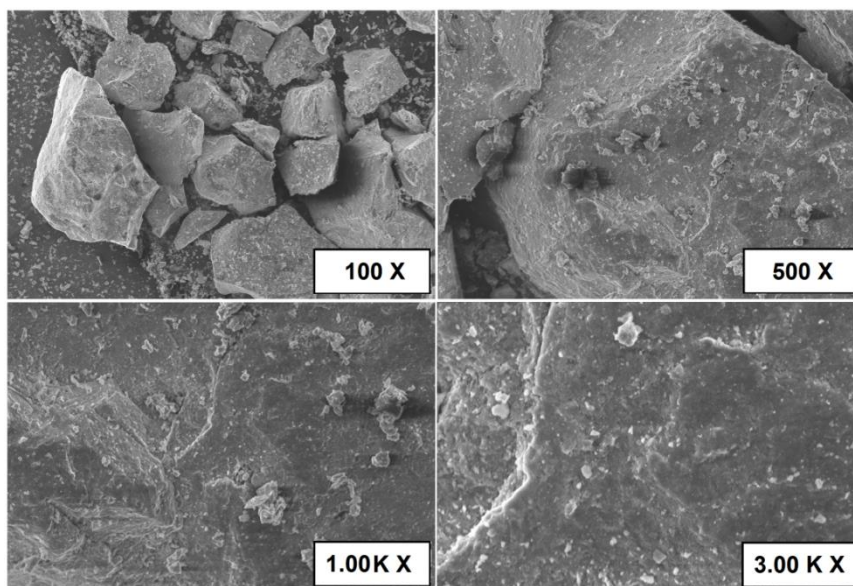
Fonte: Autora, 2019.

Figura 19 - Micrografia do CA com magnificação de 100 até 3000 X.



Fonte: Autora, 2018.

Figura 20 - Micrografia do CAP com magnificação de 100 até 3000 X.



Fonte: Autora, 2018.

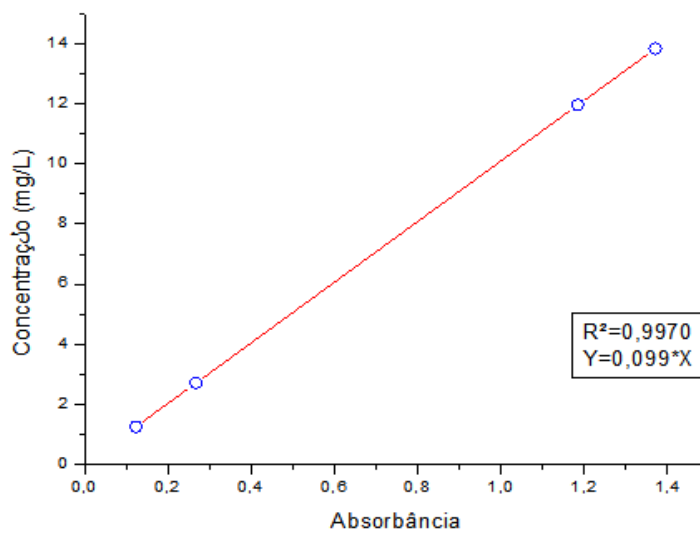
A partir das Figuras 18, 19 e 20, foi possível verificar que o LB e o CA não possuem superfícies lisas devido às irregularidades que se manifestam. Nota-se também que o CAP, ativado previamente com $ZnCl_2$ e $Ca(OH)_2$, apresenta superfície mais regular que os demais materiais analisados que pode estar associado a presença de inorgânicos remanescentes após a pirólise. De acordo com Puchana-Roseroet al. (2016) a lavagem ácida deste adsorvente

poderia auxiliar na remoção destes compostos e potencializar a adsorção, testes que serão considerados em trabalho futuro.

5.3 Estudos do potencial de adsorção

A curva de calibração do AM, representada pela concentração na fase líquida em função da absorbância média, pode ser visualizada na Figura 21.

Figura 21 - Curva de calibração do CA.



Fonte: Autora, 2019.

5.3.1 Testes de massa

O aspecto visual obtido através dos testes de massa utilizando CA e CAP pode ser visto nas Figuras 22-A e 22-B, respectivamente.

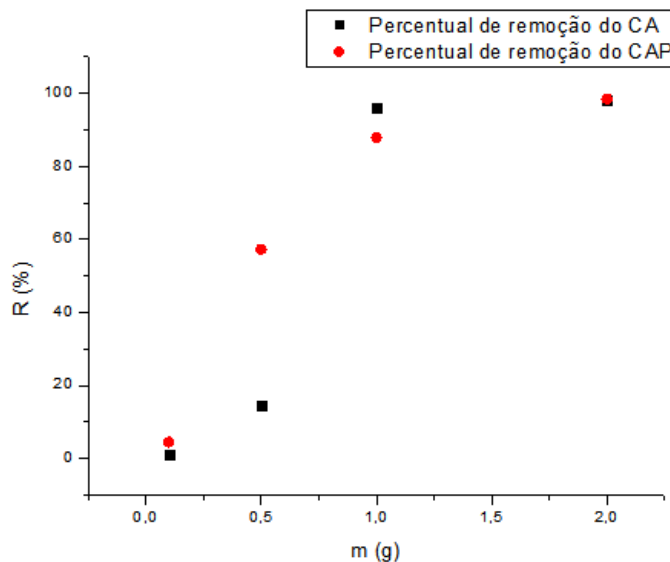
Figura 22 - Testes de massa do (A) CA e (B) CAP.



Fonte: Autora, 2018.

É possível observar que ambos carvões produzidos proporcionaram a remoção do azul de metileno presente na fase líquida, sendo que os ensaios realizados utilizando 2 g permitiram a obtenção de uma fase líquida com menor quantidade do corante. Os resultados em termos de percentual removido de AM estão apresentados na Figura 23.

Figura 23 - Determinação da melhor massa de adsorvente.



Fonte: Autora, 2018.

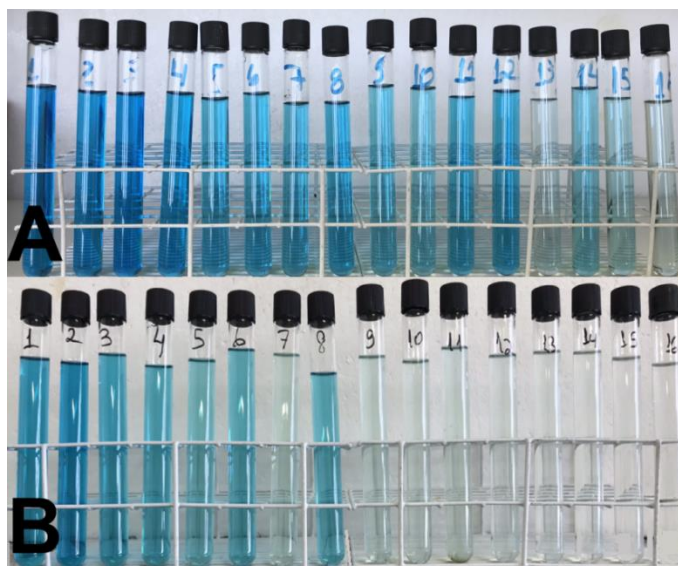
De acordo com a Figura 23 os maiores percentuais (quase 100 %) foram obtidos com maior massa de adsorvente. Portanto, de posse desses valores e do resultado visual determinou-se que a massa de adsorvente seria fixada em 2 g. Ramos et al. (2009) reportaram

uso de 10 mg de adsorvente, entretanto, com maior tempo de agitação (25 h) para alcançar um percentual de remoção de 70 %, diferente deste trabalho em que a adsorção ocorreu em 120 min.

5.3.2 Cinética de adsorção

Os resultados da cinética de adsorção do corante AM utilizando CA e CAP estão apresentados na Figura 24-A e 24-B, respectivamente.

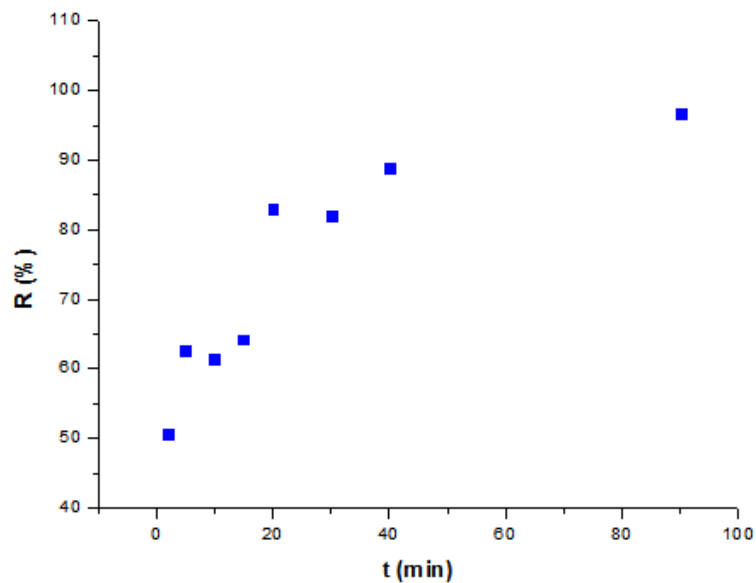
Figura 24 - (A) Adsorção do CA e (B) Adsorção do CAP.



Fonte: Autora, 2018.

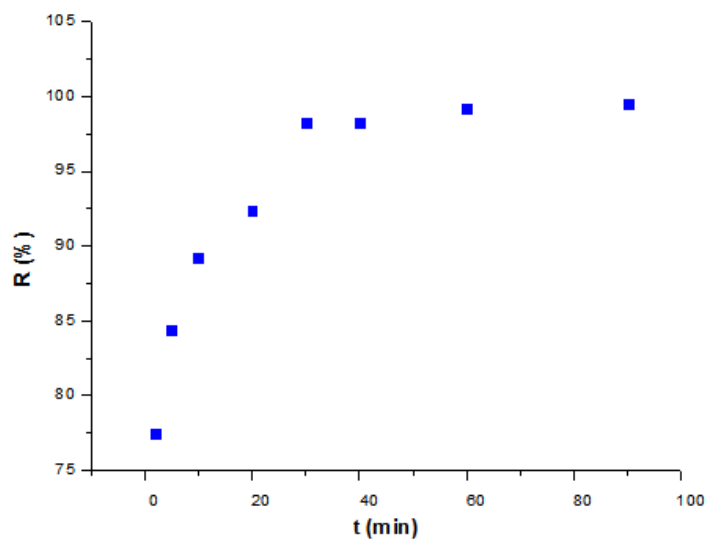
A Figura 25 e Figura 26 apresentam os percentuais de remoção do corante AM em relação ao tempo de contato (2, 5, 10, 20, 30, 40, 60 e 90 min) com o CA e o CAP produzidos, respectivamente. Assim como nas Figuras 27 e 28, pode-se observar que estes apresentaram resultados satisfatórios, aumentando o percentual de remoção ao longo do tempo de processo.

Figura 25 - Cinética de adsorção para o AM em CA.



Fonte: Autora, 2018.

Figura 26 - Cinética de adsorção para o AM em CAP.



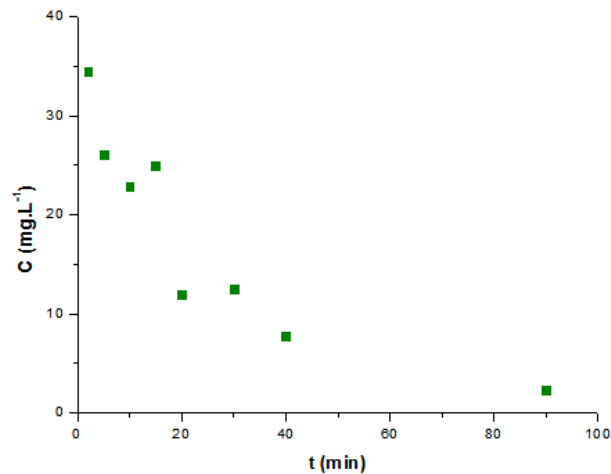
Fonte: Autora, 2018.

As Figuras 25 e 26 consideram o efeito do tempo sobre a remoção de AM e mostram que a quantidade de AM adsorvida nos carvões ativados produzidos aumentou com o decorrer do tempo de contato entre as fases sólida e líquida. Com o acréscimo de tempo esses valores chegam em valores máximos de remoção de 96 % para o CA e 99 % para o CAP. O processo de adsorção apresentou cinética rápida, visto que em apenas 2 min já havia sido removido 51 % do corante quando se fez uso do CA e 77 % quando se fez uso do CAP. O equilíbrio foi

atingido em torno de 30 min, quando a concentração de AM e o percentual adsorvido não apresentaram grandes alterações. Al-Malaka e Dauda (2017) ao produzir CA através de lodo de ETE não obtiveram adsorção rápida de Cádmiu e fenol visto que a adsorção só ocorreu em 120 e 480 min, removendo 28 % e 53 %, respectivamente, podendo ser considerada adsorção lenta.

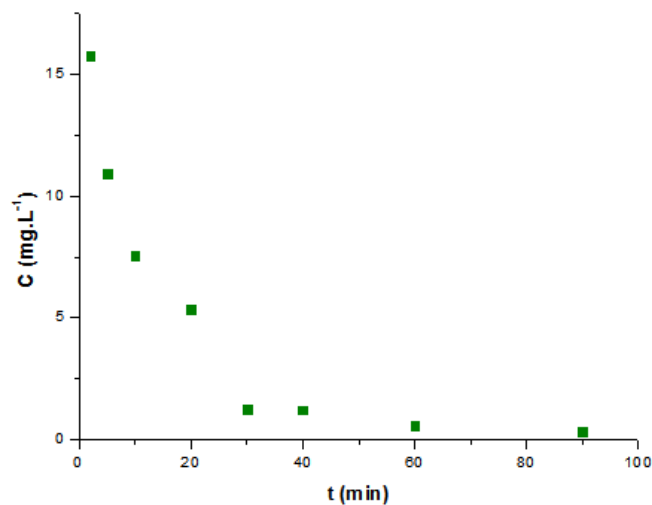
As informações apresentadas anteriormente podem ser comprovadas através da análise das Figuras 27 e 28, que indicam a variação da concentração do adsorvato em relação ao tempo.

Figura 27 – Concentração do AM em relação ao tempo no CA.



Fonte: Autora, 2018.

Figura 28 - Concentração do AM em relação ao tempo no CAP.



Fonte: Autora, 2018.

Na Tabela 2 apresentam-se trabalhos da literatura com o mesmo propósito de estudar a cinética de adsorção de contaminantes, em que é possível observar o percentual de remoção e o tempo de contato entre as fases sólida e líquida.

Tabela 2 - Remoção de contaminantes utilizando carvões ativados de diferentes matérias primas.

| Matéria-prima | Adsorvato | Remoção | Tempo (min) | Autores |
|----------------------------------|-----------------------------|----------------------|--------------------|----------------------------|
| Sericina de seda | AM | 90,1% | 1620 | Kwak et al. (2018) |
| Disco Digital Versátil | Laranja ácida 7 | 100% | 120 | Noorimotlagh et al. (2019) |
| Resíduos de indústria de algodão | Iodo | 70% | 2880 | Sartova et al. (2019) |
| Resíduo do café | AM e Vermelho Relativo (VR) | 65 %(AM) 18 %(VR) | 25 | Ramos et al. (2009) |

Fonte: Autora, 2018.

Os dados cinéticos obtidos experimentalmente foram avaliados frente a modelos matemáticos da literatura (Equações 1, 2, 3, 4) e os resultados dos parâmetros e qualidade dos ajustes se encontram nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 - Parâmetros dos modelos cinéticos avaliados.

| Modelos | Pseudo-Primeira Ordem | | | | Pseudo-Segunda Ordem | | | |
|----------------|--|--|----------------------|--------------------|--|--|----------------------|--------------------|
| | Q_e (mg.g⁻¹) | K₁ (L.mg⁻¹) | R² | ERM (%) | Q_e (mg.g⁻¹) | K₂ (L.mg⁻¹) | R² | ERM (%) |
| CA | 1,4200 | 0,3012 | 0,6847 | 3,13 | 1,4200 | 0,3012 | 0,8608 | 0,10 |
| CAP | 1,6621 | 0,7892 | 0,7814 | 0,18 | 1,7219 | 0,9219 | 0,9465 | 0,31 |

Fonte: Autora, 2018.

Tabela 4- Continuação dos parâmetros dos modelos cinéticos avaliados.

| Modelos | Difusão Intra-partícula | | | | Elovich | | | |
|---------|--------------------------------|----------------------------|----------------|------------|--|----------------------------|----------------|------------|
| | K_i (L.mg ⁻¹) | C (L.mg ⁻¹) | R ² | ERM (%) | a (mg.g ⁻¹ min ⁻¹) | b (mg.g ⁻¹) | R ² | ERM (%) |
| CA | 0,1064 | 0,8002 | 0,9350 | 0,71 | 4,2936 | 3,7200 | 0,9521 | 0,32 |
| CAP | 0,0463 | 1,3823 | 0,9043 | 0,14 | 9,3214 | 20,2826 | 0,9794 | 0,03 |

Fonte: Autora, 2018.

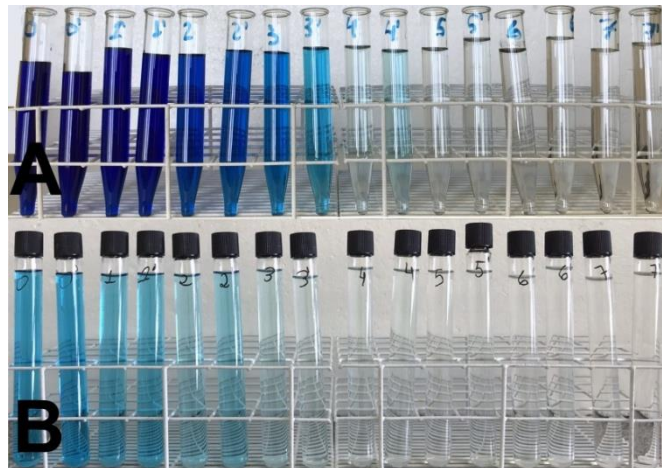
De acordo com os resultados o modelo de Elovich foi o mais se ajustou aos dados experimentais, devido aos maiores valores do coeficiente de determinação e menores valor de ERM. Este modelo prevê que a adsorção ocorre na superfície heterogênea de um sólido, decrescendo com o tempo devido a presença de multicamadas, sendo este um processo de natureza química (quimissorção) (LIMA et al., 2017). Glitz Jr, Scheufele e Módenes (2013) ao produzirem carvão ativado a partir de ossos bovinos também determinaram o modelo cinético de Elovich como mais apropriado para representar o estudo.

Danish et al. (2018) produziram CA através do tronco de banana e analisaram o estudo através de alguns modelos matemáticos cinéticos. A qualidade dos ajustes foi analisada pelo R² para relacionar os valores preditos e os experimentais. Na adsorção de AM os autores reportaram R² de 0,856 e 0,961 para o Pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem, respectivamente. Em outro estudo, o carvão ativado produzido pela casca de coco teve como melhor ajuste cinéticos os modelos de Difusão intra-partícula (R²= 0,868) e de Elovich(R² =0,898) (ALJEBOREE, ALSHIRIFI, ALKAIM, 2014).

5.3.3 Isotermas de equilíbrio

Os resultados obtidos da determinação da isoterma de equilíbrio do corante AM em CA e CAP estão apresentados na Figura 29-A e 29-B, respectivamente.

Figura 29 - (A) Equilíbrio do CA e (B) Equilíbrio do CAP.



Fonte: Autora, 2018.

Pode-se observar que a adsorção realizada com o CAP proporcionou maiores resultados em termos de remoção de cor do AM presente na fase líquida, mesmo para as elevadas concentrações iniciais utilizadas (tubo de ensaio 0 até 2). Para confirmar esses resultados apresenta-se a Tabela 5 que indica concentração final e os percentuais de remoção de AM, para ambas amostras.

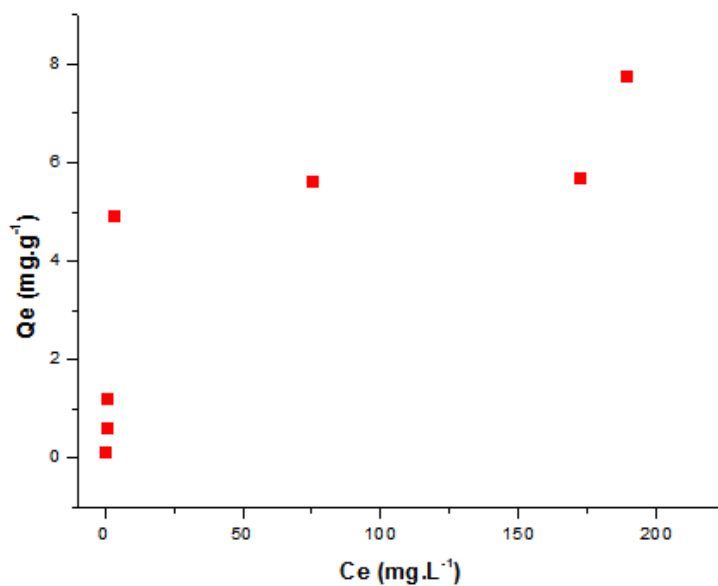
Tabela 5 - Remoção de AM para o CA e o CAP.

| CA | | CAP | |
|------------------------------------|-------------|------------------------------------|-------------|
| Concentração (mg.L ⁻¹) | Remoção (%) | Concentração (mg.L ⁻¹) | Remoção (%) |
| 188,82 | 62,22 | 13,65 | 80,49 |
| 172,09 | 56,98 | 8,54 | 87,80 |
| 75,21 | 85,08 | 4,43 | 93,67 |
| 3,32 | 98,34 | 1,35 | 98,07 |
| 0,82 | 98,36 | 0,47 | 99,32 |
| 0,42 | 98,32 | 0,23 | 99,67 |
| 0,09 | 98,28 | 0,18 | 99,74 |
| - | - | 0,18 | 99,74 |

Fonte: Autora, 2019.

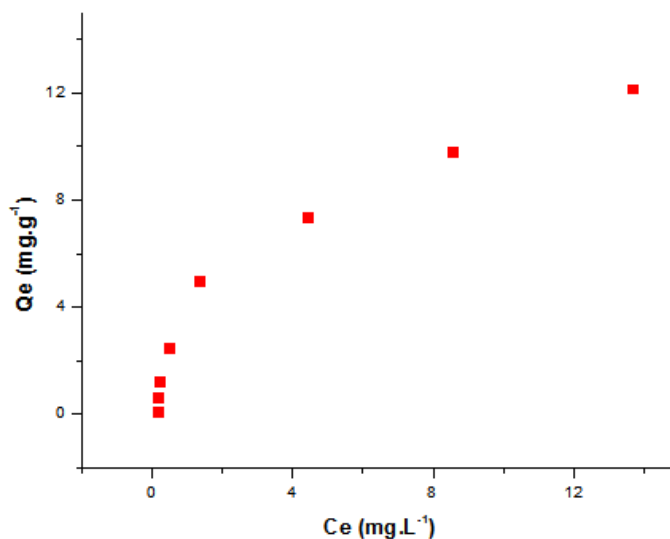
A Figura 30 e Figura 31 apresentam os resultados da capacidade de adsorção do carvão no equilíbrio (2 h) e quantidade remanescente na fase líquida.

Figura 30 - Isoterma de equilíbrio para o CA.



Fonte: Autora, 2018.

Figura 31 - Isoterma de equilíbrio para o CAP.



Fonte: Autora, 2018.

As isotermas de CA e CAP, conforme as Figuras 30 e 31, podem ser consideradas com comportamento do tipo favorável e esse comportamento indica que a massa do adsorvato que foi retida pelo adsorvente é alta (MOREIRA, 2008). As duas isotermas apresentam aumento na etapa inicial na capacidade de adsorção, apontando compatibilidade entre os carvões produzidos e o corante, caracterizando isotermas do tipo II e IV que sugerem a formação de multicamadas do AM sobre a superfície. Porém, pode-se inferir que tais isotermas se adequam

primordialmente ao tipo IV devido os valores de diâmetro de poros apresentados na Tabela 1 (DOTTO, 2012; NASCIMENTO et al., 2014).

Os resultados dos modelos ajustados para os dados de equilíbrio se encontram na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros dos modelos de isothermas de equilíbrio.

| Modelos | Langmuir | | | | SIPS | | | | |
|---------|--------------------------------|-------------------------------|--------|------------|-----------------------------------|--------------------------------|--------|--------|------------|
| | Q_m (L.mg ⁻¹) | K_L (L.g ⁻¹) | R^2 | EMR (%) | Q_{ms} (L.mg ⁻¹) | K_s (L.mg ⁻¹) | m | R^2 | EMR (%) |
| CA | 0,4751 | 6,5773 | 0,9597 | 32,9 | 6,3762 | 0,5807 | 1,7919 | 0,9716 | 12,1 |
| CAP | 0,3139 | 14,0004 | 0,9896 | 14,0 | 18,4334 | 0,1524 | 0,7852 | 0,9917 | 5,33 |

Fonte: Autora, 2018.

De acordo com os parâmetros apresentados na Tabela 6 o modelo de Sips melhor se justou aos dados experimentais, com maiores R^2 e menores EMR. A capacidade máxima de adsorção foi 6,4 mg.g⁻¹ para CA e 18,4 mg.g⁻¹ para CAP. Sharma, Phatania e Singh (2013) apresentaram valores semelhantes do parâmetros do modelo de Langmuir na adsorção de AM utilizando CA produzido com casca de árvore, sendo $Q_m= 0,4762$, $K_L= 4,00$ e $R^2= 0,997$. Alves (2013) reportou que o modelo de Sips foi o mais adequado para representar os dados experimentais de equilíbrio usando argila como adsorvente para remoção do corante verde malaquita com expoente de Sips (n) 1,8694 e R^2 0,9895.

6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos permitiram constatar que o lodo oriundo das estações de tratamento de água apresentou as características necessárias para ser utilizado como matéria-prima na produção de carvão ativado. Os produtos obtidos através da operação de pirólise, tanto para o CA que não teve impregnação química quanto para o CAP que teve $ZnCl_2$ e $Ca(OH)_2$ incorporado a sua produção mostraram-se com potencial para remoção de azul de metileno.

As amostras de CA e CAP foram caracterizadas e apresentaram área superficial específica de 101,9 a 100,3 $m^2.g^{-1}$, diâmetro de poro de 3,2 e 10,8 nm, respectivamente, sendo classificados como partículas mesoporosas. Através da análise térmica (TGA) a amostra de CA não apresentou picos de perda de massa, indicando que a operação de pirólise foi efetiva na remoção dos compostos voláteis. A amostra de CAP indicou a presença de um pico de perda de massa em 500 °C, sendo este relacionado com a presença remanescente dos compostos químicos utilizados para a ativação química durante a produção do carvão. A análise das características químicas da superfície apontaram que o LB, CA e CAP possuem similaridades nos seus grupos funcionais, especificando a predominância dos grupos O-H, C-H, C=O, CH_3 , C-O. Para as imagens obtidas por MEV foi possível notar que o LB e o CA possuem superfícies irregulares e rugosas, diferentes do CAP que se apresentou de forma mais lisa.

Os testes preliminares de massa permitiram fixar a massa adsorvente em 2 g para cada 50 mL de solução de azul de metileno, devido ao percentual de remoção dos dois carvões produzidos ser maior que 98 %. No estudo da cinética da adsorção pode-se concluir que quanto maior o tempo, maior a capacidade de remoção do AM, sendo que o modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais foi o de Elovich. No estudo das isotermas de equilíbrio o CAP apresentou maior adsorção do AM presente na fase líquida, com maior capacidade máxima de adsorção, predita pelo modelo de Sips.

Sendo assim, os resultados desse estudo comprovaram a possibilidade de utilizar o lodo proveniente da estação de tratamento de água como matéria-prima para a produção de carvão ativado e desta forma agregar valor a esse resíduo produzido em larga escala.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- a. Comparação da adsorção de AM com outros materiais adsorventes, como carvão ativado comercial;
- b. Estudo da adsorção de AM em efluente real;
- c. Realizar outros tratamentos químicos para a produção do CA;
- d. Estudo de dessorção do AM.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHON, C. L.; BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. Leito de drenagem: Sistema natural para redução de volume de lodo de estação de tratamento de água. São Paulo: Engenharia Sanitária e Ambiental- Biblioteca Digital de Produção Intelectual, v. 13, n. 1, p. 54-62, 2008. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-41522008000100008&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso 07 Dez 2018.

ALJEBOREE, A. M.; ALSHIRIFI, A. N.; ALKAIM, A. F. Kinetics and equilibrium study for the adsorption of textile dyes on coconut shell activated carbon. *Arabian Journal of Chemistry*, n. 10, p. S3381-S3393, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878535214000239>. Acesso em 08 Dez 2018

AL-MALACK, M.; DAUDA, M. Competitive adsorption of cadmium and phenol on activated carbon produced from municipal sludge. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, n. 5, p. 2718-2729, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/317090487_Competitive_Adsorption_of_Cadmium_and_Phenol_on_Activated_Carbon_Produced_from_Municipal_Sludge. Acesso em 09 Dez 2018.

ALVES, F. C. Estudos dos processos de adsorção utilizando argila como adsorventes para remoção do corante verde malaquita. 2013. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) - Universidade Federal de Lavras. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/jspui/bitstream/1/885/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O%20Estudo%20dos%20processos%20de%20adsor%C3%A7%C3%A3o%20utilizando%20argilas%20como%20adsorventes%20para%20remo.pdf>. Acesso em 11 Dez 2018.

BORILE, G. O.; DE SOUZA, H. S.; CALGARO, C. Justiça social e a questão dos recursos hídricos: Análise a cerca da configuração da água como um direito humano essencial. In: CONGRESSO DE DIREITOS HUMANOS DA FSG, 1, 2016, Caxias do Sul, p. 17-18.

BOEIRA, R. C. Uso de lodo de esgoto como fertilizante orgânico: disponibilização de nitrogênio em solo tropical. Jaguariúna, SP: Empraba, 2004. p. 3. Relatório técnico. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/14556/uso-de-lodo-de-egoto-como-fertilizante-organico-disponibilizacao-de-nitrogenio-em-solo-tropical>. Acesso em 11 Dez 2018.

BOTERO, W. G. Caracterização de lodo gerado em estações de tratamento de água: perspectivas de aplicação agrícola. 2008. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Estadual Paulista. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422009000800007. Acesso em 12 Dez 2018.

BRANDÃO, J. T. Recuperação de coagulantes através de solubilização pela via ácida de lodos de diversas ETAs no Espírito Santo com posterior reutilização no tratamento de águas para abastecimento e águas residuárias. 1998. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo. Disponível em: <http://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/176M.PDF>. Acesso em 12 Dez 2018.

BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil informe 2014. Brasília, 2015.

BRASIL. Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Casa Civil, Brasília, 1998. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/CCIVIL_03/leis/L9605.htm> Acesso 20 Dez 2017.

_____. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Casa Civil, Brasília, 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm> Acesso 20 Dez 2017.

_____. Portaria nº 5, de 28 de Setembro de 2017. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. Ministério da Saúde. Disponível em: <<http://portalarquivos2.saude.gov.br/images/pdf/2018/marco/29/PRC-5-Portaria-de-Consolida----o-n---5--de-28-de-setembro-de-2017.pdf>>. Acesso 23 Dez 2018.

_____. Portaria nº 430, de 13 de Maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2011. Disponível em: <http://www.labb.com.br/wp-content/pdf/Resolucao_CONAMA_430_11.pdf>. Acesso 05 Jan 2018.

CHEN, Z.; HU, M.; CUI, B.; LIU, S.; GUO, D.; XIAO, B. The effect of bioleaching on sewage sludge pyrolysis. *Waste Management*, n. 48, p. 383-388, 2016. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26481636>. Acesso em 13 Dez 2018.

CHENG, S.; CHANG, F.; ZHANG, F.; HUANG, T.; YOSHIKAWA, K.; ZHANG, H. Progress in thermal analysis studies on the pyrolysis process of oil sludge. *Thermochimica Acta*, n. 663, p. 125-133, 2018. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ac60131a045>. Acesso em 04 Ago 2018.

CLARK, H. L. M. Remoção de Fenilalanina por adsorvente produzido a partir da torta prensada de grãos defeituosos de café. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciência de Alimentos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Disponível em: <http://livros01.livrosgratis.com.br/cp139277.pdf>. Acesso em 14 Jul 2018.

CLAUDINO, A. Preparação de carvão ativado a partir de turfa e sua utilização na remoção de poluentes. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Florianópolis. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/86346/192226.pdf?sequence>. Acesso em 23 Set 2018.

DADA, A. O.; OLALEKAN, A. P.; OLATUNYA, A. M.; DADA, O. Langmuir, Freundlich, Temkin and Dubinin-Radushkevich Isotherms studies of equilibrium sorption of Zn²⁺ unto phosphoric acid modified rice husk. *Journal of Applied Chemistry*, v.3, p.38-45, 2012. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/284791520_Langmuir_Freundlich_Temkin_and_Du binin-](https://www.researchgate.net/publication/284791520_Langmuir_Freundlich_Temkin_and_Dubinin-)

Radushkevich_Isotherms_Studies_of_Equilibrium_Sorption_of_Zn_2_Unto_Phosphoric_Acid_Modified_Rice_Husk. Acesso em 15 Set 2018.

DANISH, M.; AHMAD, T.; MAJEED, S.; AHMAD, M.; ZIYANG, L.; PIN, Z.; IQUBAL, S. M. S. Use of banana trunk waste as activated carbon in scavenging methylene blue dye kinetic, thermodynamic, and isotherm studies. *Bioresource Technology Reports*, v. 3, p. 127-137, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589014X18300707>. Acesso em 23 Mai 2018.

DASTGHEIB, S. A.; ROCSTRAW, D. A. A model for the adsorption of single metal ion solutes in aqueous solution onto activated carbon produced from pecan shells. *Illinois: Carbon* 40, p. 1843-1851, 2002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008622302000374>. Acesso em 14 Mai 2018.

DELGADO, J. V. C. Avaliação da aplicação do lodo da ETA Guandu na pavimentação como disposição final ambientalmente adequada. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: DENARI, G. B.; CAVALHEIRO, E, T, G. Princípios e aplicações de análise térmica. São Carlos, IQSC, 2012.

DERISIO, J. C. Introdução ao controle de poluição ambiental. 4a edição atualizada, São Paulo, Oficina de Textos, 2012.

DIAS, P. S. Caracterização dos carvões ativados obtidos a partir da casca do cupuaçu e do caroço do pequi e avaliação do processo de adsorção de azul de metileno em meio aquoso. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga. Disponível em: esbbr.ppg.ppgca.content.uploads.2017.DISSERTACAO 2013. Acesso em 20 Abr 2018.

DJATI UTOMO, H .D.; ONG, X. C.; LIM, S. M. S.; ONG, G. C. B.; LI, P. Thermally processed sewage sludge for methylene blue uptake. *Singapore: International Biodeterioration & Biodegradation*, n. 85, p. 460-465, 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/259356444_Thermally_Processed_Sewage_Sludge_for_Methylene_Blue_Uptake. Acesso em 25 Mai 2018.

DONG, L.; LIU, W.; YU, Y.; HOU, L.; GU, P.; CHEN, G. Preparation, characterization and application of macroporous activated carbon (MAC) suitable for the BAC water treatment process. *Science of the Total Environment*, n. 647, p. 1359-1367, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969718327682>. Acesso em 23 Jul 2018.

DOTTO, G. L. Biossorção de corantes alimentícios utilizando nanopartículas de *Spirulina Platensis*. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Alimentos) - Universidade Federal d Rio Grande, Rio Grande. Disponível em: <http://repositorio.furg.br/handle/1/6076>. Acesso em 10 Abr 2018.

FREITAS, V. O. Recuperação do Alumínio presente no lodo gerado pela estação de tratamento de água de Bagé e sua reutilização como coagulante no tratamento de água. 2015.

Trabalho de Conclusão de Curso (Departamento de Engenharia Química) - Universidade Federal do Pampa, Bagé. Disponível em: <https://proceedings.science/cobeq/cobeq-2016/papers/recuperacao-do-aluminio-presente-no-lodo-da-eta-de-bage-para-sua-reutilizacao-como-coagulante>. Acesso em 27 Jul 2018.

GEO BRASIL. Recursos hídricos: componente da série de relatórios sobre o estado e perspectivas do meio ambiente no Brasil. Ministério do Meio Ambiente; Agência Nacional das Águas; Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. Brasília: MMA, ANA, 2007. P. 264.

GLITZ JÚNIOR, C. J.; SCHEUFELE, F. B.; MÓDENES A. N. Cinética e equilíbrio da sorção de corante direto preto Krom KJR em carvão ativado de ossos. In: III Encontro Paranaense de Engenharia e Ciência. Anais do EPEC. Toledo, PR, UNIOESTE, 2013.p. 39-44. Disponível em: <http://www.unioeste.br/eq/iiiiepec/artigos/Trab07-Glitz%20Jr%20et%20al.pdf>. Acesso em 23 Mai 2018.

GOVERNO DE SANTA CATARINA. sc.gov.br. Saneamento e recursos hídricos, 2015. Disponível em: <<https://www.sc.gov.br/index.php/noticias/temas/saneamento-e-recursos-hidricos/rede-de-tratamento-de-esgoto-em-santa-catarina-vai-chegar-a-47-de-cobertura-ate-2018>>. Acesso 02 Mar de 2018.

GUIMARÃES, N. C. Recuperação de coagulante a partir da Acidificação de resíduos gerados na estação de tratamento de Água do Rio Manso. 2005. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/ENGD-6L8Q26>. Acesso em 12 Mar 2018.

HOPPEN, C.; PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; BARON, R.; FRANCK, R.; SALES, A.; ANDREOLI, C. V.; PAULON, V. A. Co-disposição de lodo centrifugado de Estação de Tratamento de água (ETA) em matriz de concreto: método alternativo de preservação ambiental. Cerâmica, v. 51, n. 318, p. 85-95, 2005. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0366-69132005000200003&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em 02 Mar 2018.

KARADIREK, S.; OKKAY, H. Statistical modeling of activated carbon production from spent mushroom compost. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, v. 63, p. 340-347, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1226086X18301047>. Acesso em 13 Jul 2018.

KEHL, C. C. P. L. Remoção de nitrogênio amoniacal por adsorção em carvão ativado. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Departamento de Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/131318>. Acesso em 10 Set 2018.

KWAK, H. W.; HONG, Y.; LEE, M. E.; JIN, H. Sericin-derived activated carbon-loaded alginate bed: An effective and recyclable natural polymer-based adsorbent for methylene blue removal. International Journal of Biological Macromolecules, n. 120, p. 906-914, 2018. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/30165149>. Acesso em 12 Out 2018.

LEITE, J. G. Aplicação de técnicas de espectroscopia FTIR e de Micro Espectroscopia Confocal Raman à Preservação do Patrimônio. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2008. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/58443>. Acesso em 16 Out 2018.

LI, S.; HAN, K.; LI, J.; LI, M.; LU, C. Preparation and characterization of super activated carbon produced from gulf weed by KOH activation. *Microporous and Mesoporous Materials*, n. 243, p. 291-300, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/313810028_Preparation_and_characterization_of_super_activated_carbon_produced_from_gulfweed_by_KOH_activation. Acesso 18 Set 2018.

LIMA D.R.; KLEIN, L. DOTTO, G. L. Application of ultrasound modified corn straw as adsorbent for malachite green removal from synthetic and real effluents. *Environ Sci Pollut Res Int* v.24, p. 21484-21495, 2017. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28748437>. Acesso em 25 Out 2018.

LIMA, R. V. Carvão ativado de resíduos de Tectonagrandis. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras. Disponível em: http://repositorio.ufla.br/jspui/bitstream/1/9807/2/DISSERTA%C3%87%C3%83O_Carv%C3%A3o%20ativado%20de%20res%C3%ADduos%20de%20Tectona%20grandis.pdf. Acesso em 22 Fev 2018.

LINHARES, F. A.; MARCÍLIO, N. R.; MELO, P. J. Estudo da produção de carvão ativado a partir do resíduo de casca da acácia negra com e sem ativação química. *Scientia cum industria*, v. 4, n. 2, p. 74-79, 2016. Disponível em: <http://ucs.br/etc/revistas/index.php/scientiacumindustria/article/viewFile/4467/pdf>. Acesso em 02 Jul 2018.

LIU, L.; TAN, S. J.; HORIKAWA, T.; DO, D. D.; NICHOLSON, D.; LIU, J. Water adsorption on carbon - A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, n. 250, p. 64-78, 2017. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29129312>. Acesso em 21 Jul 2018.

LOPES, B. V. Eficiência de coagulantes na remoção de diferentes concentrações de Ferro e Manganês para ETA Terras Baixas. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária) - Universidade federal de Pelotas, Pelotas. Disponível em : <https://wp.ufpel.edu.br/esa/files/2014/10/TCC-BRUNO-LOPES.pdf>. Acesso em 20 Mai 2018.

LOPES, R. P. F. Remoção de Cobre em efluente sintético por adsorção. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Departamento de Engenharia Química)- Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. Disponível em : <https://monografias.ufrn.br/jspui/handle/123456789/2277>. Acesso em 15 Mai 2018.

LOPES, W. A.; FASCIO, M. Esquema para interpretação de espectros de substâncias orgânicas na região do infravermelho. *Química Nova*, v. 27, n. 4, p. 670-673, 2004. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422004000400025&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em 20 Mai 2018.

MARTINS, W. S.; VIEIRA, V. A.; LOPES, J. F.; PIVA, T.; VIEIRA, M. L. G.; PINTO, L. A. A. Isotermas de equilíbrio e termodinâmica da adsorção do corante tartrazina utilizando

esferas recobertas com quitosana. Campinas: XI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, 2015. Disponível em : <http://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/isotermas-de-equilbrio-e-termodinmica-da-adsoro-do-corante-tartrazina-utilizando-esferas-recobertas-com-quitosana-19714>. Acesso em 12 Mai 2018.

MEL'GUNOV, M. S.; AYUPOV, A. B. Direct method for evaluation of BET adsorbed monolayer capacity. *Journal Microporous and Mesoporous Materials*, n. 243, p. 147-153, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1387181117300604>. Acesso em 11 Mai 2018.

METCALF, L.; EDDY, H. P. Tratamento de efluentes e recuperação de recursos. 5 ed. McGraw Hill Brasil, 2015. Acesso em 21 Abr 2018.

MOREIRA, D. R. Desenvolvimento de adsorventes naturais para tratamento de efluentes de Galvanoplastia. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Disponível em: <http://tede2.pucrs.br/tede2/bitstream/tede/3158/1/424194.PDF>. Acesso em 22 Mai 2018.

MOREIRA, R. C. A.; GUIMARÃES, E. M.; BOAVENTURA, G. R.; MOMESSO, A. M.; DE LIMA, G. L. Estudo geoquímico da disposição do lodo de estação de tratamento de água em área degradada. *Brasília: Química Nova*, v.32, n.8, p. 2085-2093, 2009. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422009000800019. Acesso em 11 Fev 2018.

NASCIMENTO, R. F.; LIMA, A. C. A.; VIDAL, C. B.; MELO, D. Q.; RAULINO, G. S. C. Adsorção: aspectos teóricos aplicações ambientais. Fortaleza: Imprensa Universitária, p. 256, 2014. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/10267>. Acesso em 29 Mai 2018.

NEIMARK, A. V.; SING, K. S. W.; THOMMES, M. Characterization of solid catalysts. 2 ed. *Handbook of Heterogeneous Catalysts*, v.3, 2008. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ja00069a061>. Acesso em 12 Mai 2018.

NOORIMOTLAGH, Z.; MIRZAEI, S. A.; MARTINEZ, S. S.; ALAVI, S.; AHMADI, M.; JAAFARZADEH, N. Adsorption of textile dye in activated carbons prepared from DVD and CD wastes modified with multi-wall carbon nanotubes: Equilibrium isotherms, kinetics and thermodynamic study. *Chemical Engineering Research and Design*, n. 141, p. 290-301, 2019. Disponível em: <https://conacyt.elsevierpure.com/es/publications/adsorption-of-textile-dye-in-activated-carbons-prepared-from-dvd->. Acesso em 20 Ago 2018.

ODA, T. Y. R. Produção, caracterização e aplicação de carvão ativado a partir de lodo biológico de indústrias têxtil e de papel. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

OLATEJU, I. I.; ADEODU, A. O.; DANIYAN, I. A. Isotherms study of equilibrium adsorption of a quaternary system unto activated carbon derived from oil palm empty fruit bunch. *Journal of Bioprocessing and Chemical Engineering*, v. 3, p. 2348-3768, 2014. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/11076>. Acesso em 20 Mai 2018.

OLIVEIRA, E. M. S.; MACHADO, S. Q.; HOLANDA, J. N. F. Caracterização de resíduo (lodo) proveniente de estação de tratamento de águas visando sua utilização em cerâmica vermelha. *Cerâmica*, n. 50, p. 324-330, 2004. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/%0D/ce/v50n316/a0750316.pdf>. Acesso em 19 Set 2018.

OLIVEIRA, I. Y. Q.; RONDON, O. C. Diagnóstico da gestão de lodo de estação de tratamento de água em Mato Grosso do Sul. *Campo Grande: Interações*, v.17, n.4, p.687-698, 2016. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1518-70122016000400687&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em 15 Fev 2018.

PÁDUA, V. L.; SANTOS, E. P. C. C.; FREITAS, I. C. Operação e manutenção de estações: Abastecimento de água: guia nacional do profissional em treinamento - nível 1. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Belo Horizonte: ReCESA, 2007. p. 80.p. 80. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1518-70122016000400687&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em 03 Mai 2018.

PALLARÉS, J.; GONZÁLEZ-CENCERRADO, A.; ARAUZO, I. Production and characterization of activated carbon from barley straw by physical activation with carbon dioxide and steam. *Biomass & Bioenergy*, v. 115, p. 64-73, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/326744425_Production_and_characterization_of_activated_carbon_from_barley_straw_by_physical_activation_with_carbon_dioxide_and_steam. Acesso em 23 Abr 2018.

PUCHANA-ROSETO, M. J.; ADEBAYO, M. A.; LIMA, E. C.; MACHADO, F. M.; THUE, P. S.; VAGHETTI, J. C. P.; UMPIERRES, C. S. Microwave-assisted activated carbon obtained from the sludge of tannery-treatment effluent plant for removal of leather dyes. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 504, p. 105-115, 2016. Disponível em: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-d6f772ee-f8d7-3342-acdd-ff45f3f420db>. Acesso em 25 Ago 2018.

RAMOS, P. H.; GUERREIRO, M. C.; RESENDE, E. C.; GONÇALVES, M. Produção e caracterização de carvão ativado produzido a partir do defeito preto, verde, ardido (PVA) do café. *Química Nova*, v. 32, n. 5, p. 1139-1143, 2009. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422009000500011. Acesso em 20 Nov 2018.

REIS, E. L. T.; COTRIM, M. E.B; RODRIGUES, C.; PIRES, M. A. F.; FILHO, O. B.; ROCHA, S. M. R.; CUTOLO, S.A. Identificação da influência do descarte do lodo na identificação de tratamento de água. São Paulo: Sociedade Brasileira de Química, v.30, n.4, 2007. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422007000400020. Acesso em 20 Dez 2018.

RHEINHEIMER, M. O. W. Remoção de Paracetamol por adsorção em carvão ativado: Processo em batelada e coluna de leito fixo. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Departamento de Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/143902>. Acesso em 22 Nov 2018.

RIBAS, M. C.; ADEBAYO, M. A.; PROLA, L. D. T.; LIMA, E. C.; CATALUÑA, R.; FERIS, L. A.; PUCHANA-ROSETO, M. J.; MACHADO, F. M.; PAVAN, F. A.; CALVETE,

T. Comparison of a homemade cocoa Shell activated carbon with commercial activated carbon for the removal of reactive violet 5 dye from aqueous solutions. *Chemical Engineering Journal*, n. 248, p. 315-326, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894714003325>. Acesso em 22 Nov 2018.

RICHTER, C. A. *Água: métodos e tecnologia de tratamento*. São Paulo: Edgard Blucher, 2009. Acesso em 23 Out 2018.

SANTOS FILHO, J. D.; SANTA RITA, E. S. Gerenciamento do resíduo gerado na clarificação de água da RLAM. 2002. Pós-graduação em Gerenciamento e Tecnologia Ambiental na Indústria - Universidade Federal da Bahia, Salvador. Disponível em: <https://www.yumpu.com/pt/document/view/12982525/gerenciamento-do-residuo-gerado-na-clarificacao-de-agua-da-rlam>. Acesso em 12 Nov 2018.

SARTOVA, K.; OMUZARK, E.; KAMBAROVA, G.; DZHUMAIEV, I.; BORKOEV, B.; ABDULLAEVA, Z. Activated carbon obtained from the cotton processing wastes. *Diamond & Related Material*, n. 91, p. 90-97, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/328922885_Activated_carbon_obtained_from_the_cotton_processing_wastes. Acesso em 11 Dez 2018.

SCHULTZ, J. Carvão ativado a partir de biomassa residual para a adsorção de poluentes. 2016. Tese (Doutorado em Química) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/48962>. Acesso em 09 Out 2018.

SETTI, A. A.; LIMA, J. E. F. W.; CHAVES, A. G. M.; PEREIRA, I. C. Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, p.328, 2001. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/Introducao_Gerenciamento.pdf. Acesso em 14 Nov 2018.

SEHGAL, S. *Thermodynamics*. Amity University. Disponível em: https://www.docsity.com/en/users/profile/sharmila_sehgal/. Acesso 26 Nov 2017.

SHARMA, S.; PATHANIA, D.; SINGH, P. Preparation, characterization and Cr(VI) adsorption behavior study of poly(acrylic acid) grafted Ficus carica bast fiber. *Advanced Materials Letters*, n.4 , p. 271-276, 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/236667171_Preparation_characterization_and_CrVI_adsorption_behavior_study_of_polyacrylic_acid_grafted_Ficus_carica_bast_fiber. Acesso em 11 Out 2018.

SILVA, M. A. Aplicação de lodo de estações de tratamento de água como coagulante no polimento final para remoção de fósforo em unidades de tratamento de esgoto, 2003. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Distrito Federal. Disponível em: <https://ptarh.unb.br/dissertacoes/aplicacao-de-lodo-de-estacoes-de-tratamento-de-agua-como-coagulante-no-polimento-final-para-remocao-de-fosforo-em-unidades-de-tratamento-de-esgoto/>. Acesso em 17 Out 2018.

SILVEIRA, C. S.; KOGA, D. S.; KURODA, E. K. Estudo da viabilidade de disposição final dos lodos de ETAS em aterros sanitários. Fórum Ambiental da Alta Paulista - Saúde

Saneamento e Meio Ambiente, v.9, n.11, 2013. Disponível em:
https://www.amigosdanatureza.org.br/publicacoes/index.php/forum_ambiental/article/view/675. Acesso em 20 Nov 2018.

STREIT, A. F. M.; COLLAZO, G. C.; CORTÊS, L. N.; DRUZIAN, S. P.; PERONDI, D.; DOTTO, G. L. Produção e caracterização de carvão ativado a partir de lodo de ETE para aplicação na remoção de corantes. Gramado: XII Encontro Brasileiro sobre Adsorção, 2018. Disponível em:
https://www.amigosdanatureza.org.br/publicacoes/index.php/forum_ambiental/article/view/675. Acesso em 21 Jul 2018.

TADINI, C. C.; TELIS, V. R. N.; MEIRELLES, A. J. A.; PESSOA FILHO, P. A. Operações unitárias na indústria de alimentos. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

TANG, S.; ZHENG, C.; ZHANG, Z. Effect of inherent minerals on sewage sludge pyrolysis: Product characteristics, kinetics and thermodynamics. Waste Management, n. 80, p. 175-185, 2018. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/30454998>. Acesso em 27 Mai 2018.

TEIXEIRA, V. G.; COUTINHO, F. M. B.; GOMES, A. S. Principais métodos de caracterização da porosidade de resinas à base de divinil benzeno. Química Nova, v. 24, n. 6, p. 808-818, 2001. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422001000600019&script=sci_abstract&tlng=es. Acesso em 08 Mai 2018.

TUCCI, C. E. M.; HESPANHOL, I.; CORDEIRO, O. Relatório nacional sobre o gerenciamento de água no Brasil. Comité Asesor Técnico de América del Sur (SAMTAC), Global Water Partnership (GWP), 2000. Disponível em:
<https://www.cepal.org/DRNI/proyectos/samtac/InBr00200.pdf>. Acesso em 12 Mai 2018.

VASQUES, A. R.; DE SOUZA, S. M. A. G. U.; WEISSENBERG, L.; DE SOUZA, A. A. U.; VALLE, J. A. B. Adsorção dos corantes R016, RR2 e RR141 utilizando lodo residual da indústria têxtil. Revista Engenharia Sanitária Ambiental, v.16, p. 245-252, 2011. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522011000300007. Acesso em 15 Mar 2018.

WANG, X.; ZHU, N.; YIN, B. Preparation of sludge-based activated carbon and its application in dye wastewater treatment. Shanghai: Journal of Hazardous Materials, n. 153, p. 22-27, 2007. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389407011697>. Acesso em 12 Out 2018.

WIMMER, A. C. S. Aplicação do processo eletrolítico no tratamento de efluentes de uma indústria petroquímica. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=11608@1>. Acesso em 15 Jul 2018.

ZHOU, Y.; LIU, Y.; JIANG, W.; SHAO, L.; ZHANG, L.; FENG, L. Effects of pyrolysis temperature and addition proportions of corncob on the distribution of products and potential energy recovery during the preparation of sludge activated carbon. Chemosphere, n. 221, p.

175-183, 2019. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/30639813>. Acesso em 20 Mai 2018. Acesso em 12 Nov 2018.

YADAV, A.; GARG, V. K. Biotransformation of bakery industry sludge into valuable product using vermicomposting. *Bioresource Technology*, v. 274, p. 512-517, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852418316675>. Acesso em 29 Mai 2018.