



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL**  
**CAMPUS ERECHIM**  
**CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

**LUIZ FELIPE KLEIN**

**A UTILIZAÇÃO DE CARVÕES ATIVADOS NA REMOÇÃO DE  
CONTAMINANTES DE ÁGUAS: UMA REVISÃO ACERCA DOS MÉTODOS EM  
BATELADA E COLUNA**

**ERECHIM**

**2021**

**LUIZ FELIPE KLEIN**

**A UTILIZAÇÃO DE CARVÕES ATIVADOS NA REMOÇÃO DE  
CONTAMINANTES DE ÁGUAS: UMA REVISÃO ACERCA DOS MÉTODOS EM  
BATELADA E COLUNA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade Federal da Fronteira Sul – UFFS –  
*Campus* Erechim, como requisito para obtenção do  
título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Gean Delise Leal Pasquali Vargas

Coorientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Adriana Dervanoski

ERECHIM

2021

**Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS**

Klein, Luiz Felipe

A UTILIZAÇÃO DE CARVÕES ATIVADOS NA REMOÇÃO DE  
CONTAMINANTES DE ÁGUAS: UMA REVISÃO ACERCA DOS MÉTODOS  
EM BATELADA E COLUNA / Luiz Felipe Klein. -- 2021.  
38 f.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Gean Delise Leal Pasquali  
Vargas

Co-orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Adriana Dervanoski  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -  
Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de  
Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária,  
Erechim, RS, 2021.

1. Adsorção. 2. Leito fixo. 3. Contaminantes. 4.  
Qualidade da Água. I. Vargas, Gean Delise Leal Pasquali,  
orient. II. Dervanoski, Adriana, co-orient. III.  
Universidade Federal da Fronteira Sul. IV. Título.

**LUIZ FELIPE KLEIN**

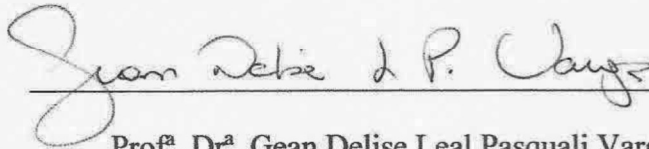
**A UTILIZAÇÃO DE CARVÕES ATIVADOS NA REMOÇÃO DE  
CONTAMINANTES DE ÁGUAS: UMA REVISÃO ACERCA DOS MÉTODOS EM  
BATELADA E COLUNA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade Federal da Fronteira Sul – UFFS – *Campus*  
Erechim, como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Este trabalho de conclusão de curso foi defendido e aprovado pela banca em:

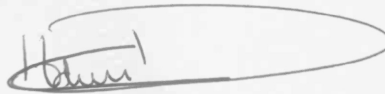
17/05/2021

**BANCA EXAMINADORA**



Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Gean Delise Leal Pasquali Vargas

**Orientadora**



Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Adriana Dervanoski

**Coorientadora**

---

Cristiane Funghetto Fuzinato – UFFS

---

Paulo Afonso Hartmann - UFFS

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha família, por todo o apoio que me deram durante toda a graduação, pela paciência e compreensão exigida durante todos estes anos.

Agradeço à orientadora Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Gean Delise Leal Pasquali Vargas e à coorientadora Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Adriana Dervanoski pela disponibilidade em auxiliar na elaboração deste trabalho, em compartilhar conhecimentos, opiniões e tirar dúvidas. Também agradeço pela paciência com todas as mudanças que aconteceram nesta trajetória.

Agradeço a todos os professores da Universidade Federal da Fronteira Sul, por todos os conhecimentos compartilhados e experiências proporcionadas, que foram tantas e tão importantes.

Agradeço aos técnicos dos laboratórios, principalmente a técnica Suzana Bazoti, por toda a ajuda fornecida durante todos os anos de projetos de pesquisa e durante os primeiros testes da outra proposta de TCC.

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para que essa etapa fosse possível.

## RESUMO

A contaminação de recursos hídricos é um grave problema gerador de passivos ambientais e efeitos danosos à população, podendo causar diversos males. O desenvolvimento de tecnologias voltadas ao tratamento das fontes causadoras destas contaminações, tem se mostrado nas últimas décadas como algo essencial e foco de pesquisas que tem como finalidade obter métodos de tratamento eficientes e de baixo custo, a fim de minimizar estes efeitos. Dentre as diversas tecnologias que foram desenvolvidas e podem ser aplicadas com este objetivo, encontram-se os processos de adsorção. A adsorção se apresenta como uma alternativa de tratamento econômica e eficiente dos contaminantes presentes na água, pois é uma técnica que utiliza diversos materiais naturais. Um dos materiais que podem ser utilizados neste processo são os carvões ativados, que podem ser produzidos a partir de diversas matérias primas de origem natural ou residuária. A proposta deste estudo foi apresentar uma revisão bibliográfica, onde os artigos científicos utilizados foram obtidos em base de dados internacional e com relevância científica, como o portal Science Direct. Estes foram filtrados ano a ano de 2001 a 2020, sendo selecionados de 4 a 5 artigos por ano. Os artigos selecionados foram classificados de acordo com a metodologia utilizada. Assim, o objetivo deste trabalho foi realizar uma revisão bibliográfica do uso de diferentes carvões ativados para a remoção de contaminantes através do processo de adsorção, diferenciando o método de adsorção utilizado: batelada ou coluna (leito fixo).

**Palavras-chave:** Adsorção. Leito fixo. Contaminantes. Qualidade da Água.

## **ABSTRACT**

The contamination of water resources is a serious problem that generates environmental liabilities and hurtful effects to the population, which can cause several harm. The development of technologies turned at the treatment of the sources that cause these contaminations, has shown itself in the last decades as something essential and the focus of research that aims to obtain efficient and low cost treatment methods, in order to minimize these effects. Among the various technologies that have been developed and can be applied for this purpose, there are the adsorption processes. The adsorption presents itself as an economical and efficient alternative for treatment of contaminants presents in water, because it's a technique that uses several natural materials. One of this materials that can be used is activated carbon, which can be produced using different raw materials of natural or residual origins. The purpose of this study was to present a review, where the scientific articles were obtained from an international database with scientific relevance, such as the Science Direct portal. These were filtered year by year from 2001 to 2020, being selected 4 or 5 articles per year. The selected articles were classified according to the methodology used. Thus, the objective of this work was to perform a review of the use of different activated carbon for the removal of contaminants using the adsorption process, differentiating the adsorption method used: batch or column (fixed bed).

**Keywords:** Adsorption. Fixed bed. Contaminants. Water Quality.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>8</b>
<b>2. METODOLOGIA DE REVISÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>3. RESULTADOS DE REVISÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>4. REATOR BATELADA .....</b>	<b>13</b>
<b>5. COLUNA DE LEITO FIXO.....</b>	<b>19</b>
<b>6. REATOR BATELADA E LEITO FIXO .....</b>	<b>22</b>
<b>7. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>24</b>
<b>8. CONCLUSÃO.....</b>	<b>7</b>
<b>REFERÊNCIA.....</b>	<b>8</b>



## 1. INTRODUÇÃO

A contaminação de recursos hídricos se apresenta como um grave problema gerador de passivos ambientais e efeitos danosos à população. No âmbito urbano, as causas majoritárias de contaminação das águas estão associadas a intervenções humanas. Esses contaminantes podem ter composição química, natural ou sintética e apresentar alto potencial de riscos, podendo ser metais, fármacos, pesticidas, compostos radioativos, compostos inorgânicos, compostos orgânicos ou organoclorados e diversos outros (BANSODE et al., 2003; BEMBNOWSKA; PELECH; MILHERT, 2003; HAMEED; SALMAN; AHMAD, 2009; KADIRVELU; THAMARAISELVI; NAMASIVAYAM, 2001; KÜTAHYALI; ERAL, 2004; MESTRE et al., 2014; NAMASIVAYAM; SANGEETHA, 2006; PEÑA-GÚZMAN et al., 2019).

Esses contaminantes podem causar diversos males como dores de cabeça, tonturas, náuseas e vômito, dores no peito, tosse seca, dificuldade para respirar e diversos outros problemas para os seres humanos (KADIRVELU; THAMARAISELVI; NAMASIVAYAM, 2001). Alguns contaminantes podem ocasionar sabor e odor desagradáveis, além de causar alterações na cor da água (RENGARAJ et al., 2002)

Uma alternativa econômica e eficiente de remoção dos contaminantes contidos na água é a adsorção, técnica que utiliza diversos materiais naturais, como: bactérias, fungos, algas, quitina, quitosana, zeólitas, alginato, carvões ativados e diversos outros, para a remoção de contaminantes (AHMAD et al., 2016; TAN; XIAO, 2009). A adsorção também apresenta vantagens em relação à escolha dos adsorventes adequados, visto que há uma grande quantidade de materiais que podem ser utilizados (AHMAD et al., 2016).

A escolha do adsorvente depende de diversos fatores, que são diretamente dependentes da porosidade, disponibilidade, área superficial específica e facilidade de operação e regeneração do adsorvente a ser empregado (TEODOSIU et al., 2018).

Além de todos os materiais citados acima, que podem ser utilizados para a adsorção e que são encontrados naturalmente, os chamados carvões ativados vêm ganhando grande atenção nas pesquisas e estudos recentes como material adsorvente (AHMAD et al., 2016; ALQADAMI et al., 2016; KHAN et al., 2015; MING-TWANG et al., 2017; NAUSHAD et al., 2017; TAN; XIAO, 2009).

Os carvões ativados são materiais microporosos que podem ser produzidos ou encontrados comercialmente. Diversos produtos naturais e resíduos de indústrias e da agricultura podem ser utilizados na obtenção de carvão ativado, como cascas de arroz, cascas de coco, cascas de nozes, cascas de ovos, madeira, hulha, açúcares, polpa de laranja, entre outros (BASU; GHOSH; SAHA, 2018; VOLTAN et al., 2016).

O poder adsorvente do carvão ativado é proveniente da presença, em sua superfície, de alta variedade de grupos funcionais, alta área superficial e porosidade natural. O desempenho de adsorção destes adsorventes é determinado pelas suas características e pelas características do contaminante que se deseja remover, pois o tamanho dos poros do carvão ativado deve estar diretamente relacionado à massa molecular da substância contaminante (BASU; GHOSH; SAHA, 2018; MARTINEZ et al., 2011; VOLTAN et al., 2016).

Os carvões ativados podem ainda ser potencializados, por meio da ativação química, destacando-se o uso de ácidos (BASU; GHOSH; SAHA, 2018) e bases (LAKSACI et al., 2017), que atuam na abertura de poros e conseqüentemente no aumento da área superficial. Por este motivo, a ativação dos carvões é muito importante pois a área superficial e o tamanho e volume dos poros são fatores determinantes para a eficiência do carvão ativado (BEMBNOWSKA; PELECH; MILHERT, 2003).

Diante disso, o objetivo deste trabalho foi realizar uma revisão bibliográfica do uso de diferentes carvões ativados nos últimos 20 anos para a remoção de contaminantes através do processo de adsorção, diferenciando o método de adsorção utilizado: batelada ou coluna (leito fixo).

## **2. METODOLOGIA DE REVISÃO**

Este trabalho de revisão foi desenvolvido seguindo critérios para a escolha dos artigos científicos, tais como a seleção de uma base de dados, a temporalidade dos artigos e a definição de palavras-chave relevantes.

Os artigos científicos foram obtidos em base de dados internacional e com relevância científica, como o portal Science Direct. Quanto às palavras-chaves, definiu-se termos específicos para realizar a busca: “Adsorption”, “Activated coal”, “Contaminants” e “Water”.

Os resultados encontrados foram filtrados, ano a ano, de 2001 a 2020. Em seguida, foram selecionados 5 artigos por ano, utilizando como critério para seleção a presença de, no mínimo, os termos “Adsorption” e “Activated coal” no título ou nas palavras-chaves do artigo. Então, estes artigos foram classificados de acordo com a metodologia utilizada: batelada, coluna ou ambos os métodos.

Após a classificação dos artigos, selecionou-se um ou dois artigos por ano para a realização do presente trabalho. Os critérios de decisão para esta etapa foram baseados em trazer artigos que utilizaram recursos naturais renováveis ou resíduos para a produção do carvão ativado.

### 3. RESULTADOS DE REVISÃO

A Figura 1 mostra a quantidade de artigos encontrados em cada ano do intervalo estipulado (2001 a 2020). No Gráfico 1, é possível visualizar a evolução no número de artigos a cada ano, ficando explícito o aumento no número de pesquisas sobre o assunto ao longo dos anos.

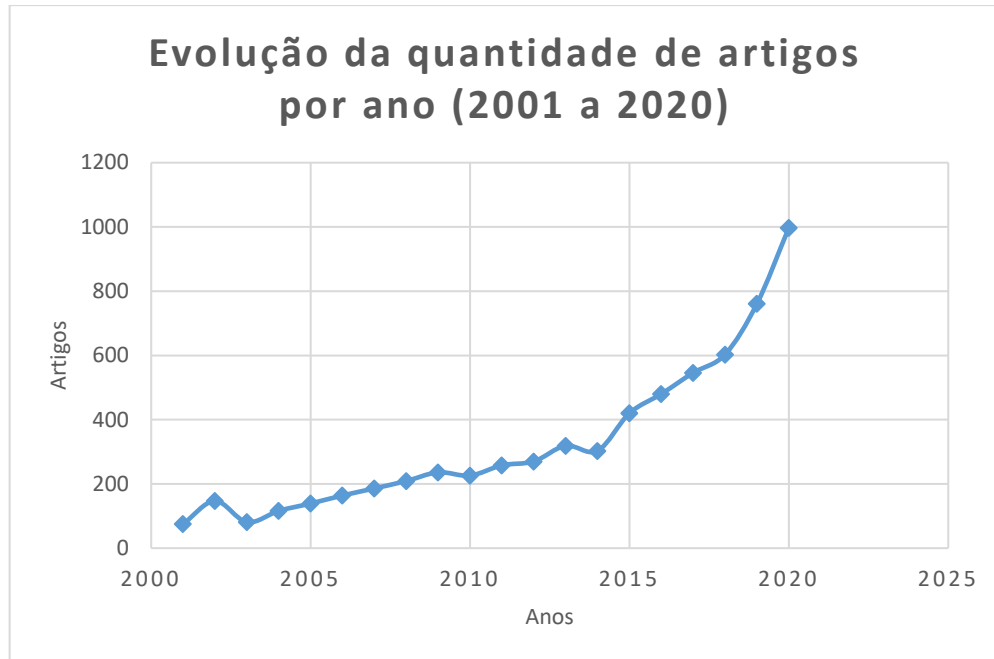
Figura 1 – Quantidade de artigos encontrados de 2001 a 2020.

□ 2010 (226)	□ 2020 (997)
□ 2009 (236)	□ 2019 (761)
□ 2008 (209)	□ 2018 (603)
□ 2007 (186)	□ 2017 (546)
□ 2006 (164)	□ 2016 (480)
□ 2005 (139)	□ 2015 (420)
□ 2004 (116)	□ 2014 (303)
□ 2003 (81)	□ 2013 (319)
□ 2002 (147)	□ 2012 (270)
□ 2001 (75)	□ 2011 (258)

Fonte: Portal Science Direct, 2021.

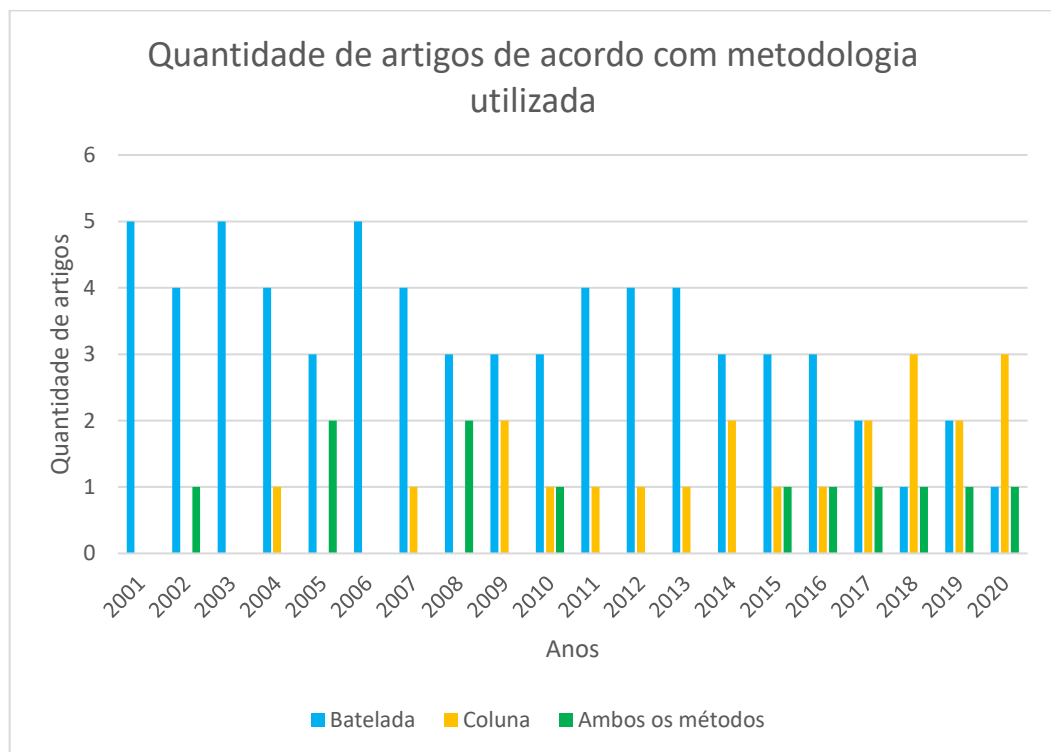
No Gráfico 2 é possível visualizar quantos artigos com cada metodologia foram selecionados. Avaliando o gráfico, é possível perceber que o método de batelada sempre foi muito utilizado, enquanto que o método de coluna passou a ser mais utilizado a partir do ano de 2010. Além disso, a partir do ano de 2017, o método de coluna foi encontrado com maior frequência que o método de batelada.

Gráfico 1 – Evolução da quantidade de artigos por ano (2001 a 2020).



FONTE: Elaboração própria, 2021.

Gráfico 2 – Quantidade de artigos de acordo com a metodologia utilizada.



FONTE: Elaboração própria, 2021.

#### 4. REATOR BATELADA

Os experimentos em batelada consistem em processo não contínuo, normalmente em escala laboratorial. Neste tipo de metodologia, o adsorvente e a amostra contendo o adsorbato ficam em contato durante todo o tempo do experimento, que normalmente é realizado em frascos de vidro (MALVESTIO, 2010). A metodologia em batelada, é amplamente utilizada com a finalidade de avaliar o potencial de uso de um material adsorvente, sua capacidade de agir em diferentes condições de temperatura, pH, concentração do contaminante, massa do adsorvente, tempo de equilíbrio dentre outras variáveis. Enfim, é utilizada para avaliar a viabilidade e obter parâmetros indispensáveis quando se quer verificar as possibilidades de uso de um material adsorvente, bem como possíveis ampliações de escala. Além disso, o método de reator batelada apresenta baixo custo e facilidade de operação. Este método apresenta como desvantagens a dificuldade de uso em escala industrial e o fato de possibilitar o uso de pequenas quantidades de águas residuárias com concentrações menores de poluentes (TAKA et al., 2020).

Como já colocado acima, o uso de resíduos ou materiais de origem natural para a produção de carvões adsorventes, tem sido amplamente estudado, visto a possibilidade de reduzir descartes destes sólidos no meio ambiente e ainda assim conseguir materiais adsorventes de baixo custo, tornando viável aplicação do processo de adsorção. Kadirvelu, Thamaraiselvi e Namasivayam (2001) utilizaram medula de coco em seus estudos, proveniente de uma indústria de processamento de coco na Índia, para produzir carvão ativado. O carvão foi ativado através da imersão em ácido sulfúrico e persulfato de amônia à 80°C por 12 horas. Em seguida, o material foi lavado com água destilada e mergulhado em solução de bicarbonato de sódio por 12 horas, quando foi lavado novamente com água destilada e seco à 80°C. O carvão após a ativação foi utilizado, em testes em batelada, para investigar a sua utilização para a remoção de Níquel em soluções aquosas. As condições iniciais utilizadas foram: 20,0 mg a 60,0 mg de carvão ativado, 50,0 mL de solução com concentrações de 20,0 a 40,0 mg/L de níquel e pH 5,0 a 10,0. Os resultados melhoraram conforme se aumentaram as concentrações de carvão (60,0 mg), tempo de contato (40 minutos) e pH (10,0), apresentando porcentagens de remoção de até 80 a 100% do contaminante. Após a adsorção, o material foi lavado com 50,0 mL de ácido clorídrico com diferentes concentrações (0,025 a 0,150 M), obtendo-se quase 100% de dessorção com concentrações maiores que 0,075 M de ácido clorídrico.

Já o trabalho desenvolvido por Bansode et al. (2003) fez uso do carvão ativado produzido a partir de cascas de nozes e de amêndoas para estudar a remoção dos seguintes compostos orgânicos voláteis: bromo-diclorometano, benzeno, tetracloreto de carbono, triclorometano, clorofórmio e diclorometano. Os resultados também foram comparados com os resultados de adsorção de um carvão comercial. As cascas foram moídas e pirolisadas sob fluxo de nitrogênio gasoso e temperatura de 700°C por 1 hora. A ativação ácida do carvão foi realizada com ácido fosfórico, através da imersão do carvão em uma solução com 50% de ácido fosfórico por 2 horas; a ativação com dióxido de carbono foi realizada através da exposição do carvão à uma mistura de gases com 70% nitrogênio e 30% dióxido de carbono, a 900°C por 6 horas; e a ativação com vapor foi realizada através da injeção de água no fluxo de nitrogênio, a temperatura de 900°C por 6 horas. Para os testes, 0,01 g do carvão ativado permaneceu por 24 horas em contato com 80,0 mL das soluções com concentração de 100 ppb de cada composto, sob temperatura ambiente e agitação constante de 500 rpm. Os carvões ativados produzidos para o estudo apresentaram eficiências similares ou superiores às obtidas com os carvões comerciais, exceto para alguns dos compostos orgânicos voláteis estudados que mostraram valores muito inferiores. Os carvões ativados comerciais apresentaram percentual de adsorção médio de 83%, enquanto os carvões produzidos apresentaram percentual médio de 70,3%.

O tecido Viscose Rayon foi utilizado por Babic et al. (2002) como precursor de um carvão ativado para a remoção de zinco, cádmio e mercúrio. O tecido foi carbonizado com um fluxo de nitrogênio e ativado com dióxido de carbono a 850°C por 1 hora. Em seguida o carvão foi impregnado com soluções mistas de cloreto de amônio e cloreto de zinco. A adsorção dos metais foi estudada em função do pH (2,0 a 12,0 para o zinco e o cádmio e 2,0 a 5,0 para o mercúrio) e concentração de íons metálicos ( $1 \times 10^{-5}$  mol/dm<sup>3</sup> para o zinco e o cádmio e  $1 \times 10^{-4}$  mol/dm<sup>3</sup> para o mercúrio), fatores que influenciaram diretamente na eficiência de remoção. O tempo de contato foi de 2 horas, com agitação mecânica de 20 ciclos/minuto e temperatura média de 20°C. As amostras com pH entre 6,0 e 11,0 para o zinco e entre 9,0 e 10,0 para o cádmio apresentaram de 90 a 100% de remoção. Já para o mercúrio, amostras com o pH entre 2,0 e 3,0 apresentaram as maiores porcentagens de remoção, cerca de 90%.

Outro estudo focado na remoção de metais é o de Goyal et al.(2001), que utilizaram quatro amostras de carvão ativado comerciais para a remoção de cobre de soluções aquosas. A adsorção foi realizada através do contato entre uma massa conhecida de cada amostra de carvão (0,1 g) com 20,0 mL de de solução de cloreto de cobre em diferentes concentrações (0,0 a 1000,0 mg/L). As amostras ficaram sob agitação por 24 horas. O pH foi controlado de 1,0 a 6,0

com a adição de hidróxido de sódio ou ácido clorídrico e foi determinante para a adsorção, sendo que valores de pH menores que 3,0 mostraram um decréscimo na adsorção. Os maiores resultados de remoção de cobre, remoção de 40,0 mg/g, foram obtidos com o pH entre 3,0 e 4,0 e concentração de adsorbato de 1000,0, mg/L.

Bembnowska, Pelech e Milhert (2003) tiveram como objetivo identificar carvões ativados efetivos para a remoção de compostos organoclorados (clorofórmio, tetracloroetano, tetracloroetileno, dicloropropano e cloroisopropil) de efluentes com altas cargas destes contaminantes. Para os experimentos utilizou-se três carvões ativados comerciais, da marca polonesa Gryfskand Ltda: DTO, AG-5 e WD-EXTRA. Quantidades diferentes de cada carvão ativado foram colocadas em frascos de vidro e em seguida foram colocadas em contato com amostras de diferentes concentrações dos contaminantes (0,1 a 3,0 mg/dm<sup>3</sup>), à temperatura de 30°C por 20 horas. As capacidades de adsorção variaram de 0,0 até 90,0 mg/g, sendo que o carvão DTO apresentou maior adsorção que os outros dois para todos os compostos estudados, pois possuía a maior fração de microporos e maior área superficial, confirmando que o tamanho dos poros do carvão ativado interfere na eficiência de adsorção (BEMBNOWSKA; PELECH; MILHERT, 2003).

Kütahyalı e Eral (2004) estudaram a ativação química de carvão de lenha comum com cloreto de zinco e a sua utilização na remoção de urânio de soluções aquosas. A ativação foi realizada através da imersão do carvão em uma solução de cloreto de zinco. Em seguida, diferentes amostras do carvão imerso na solução foram carbonizadas a temperaturas que variaram de 500 a 700°C. Para os testes, seis diferentes amostras de carvão permaneceram em agitação com uma solução 0,010 M de nitrato de urânio por 24 horas. A amostra que apresentou melhores capacidades de adsorção foi selecionada para avaliar os demais parâmetros de adsorção: pH (2,0 a 8,0), concentração inicial de urânio (50 a 200 ppm), tempo de agitação (0 a 480 minutos), tamanho da partícula (< 0,125 mm e 0,125 – 0,250 mm) e temperatura (30,0 a 70°C). As condições ótimas de adsorção encontradas foram pH 5,0, concentração inicial de urânio de 50 ppm, tempo de contato de 240 minutos, tamanho da partícula menor que 0,125 mm e temperatura de 70°C, obtendo-se 77,78% de remoção do contaminante nestas condições.

A medula de coco também foi usada para fabricação de carvão ativado com ZnCl<sub>2</sub> por Namasivayam e Sangeetha (2006). Os autores utilizaram o carvão ativado produzido para remoção de molibdato de águas. As medulas de coco foram secas por 5 horas sob luz solar, e em seguida foram imersas em uma solução de cloreto de zinco 2:1 e carbonizadas a 700 °C.



Após ser lavado e seco, diferentes quantidades do adsorvente (25,0 a 350,0 mg) foram agitadas por 40 minutos com 50,0 mL de amostras de água com diferentes concentrações de molibdato (10,0 a 40,0 mg/L), com diferentes pHs (2,0 a 11,0) e diferentes temperaturas (35 a 60°C). O equilíbrio foi atingido rapidamente, obtendo 99% de remoção na faixa de pH entre 4,0 e 8,0, 300 mg de adsorvente e temperaturas mais altas. A dessorção foi realizada através da filtração com filtros de papel e lavagem com água, em seguida o adsorvente foi misturado com água destilada e o pH foi variado de 2,0 a 11,0, apresentando percentuais de dessorção de até 85% para pH 11,0.

Hameed, Salman e Ahmad (2009), estudaram a remoção do herbicida 2,4-D (ácido diclorofenoxiacético) utilizando caroços de tamareira (*Phoenix dactylifera*) para a produção de carvão ativado de baixo custo. A adsorção foi estudada utilizando 200,0 mL de amostras com diferentes concentrações iniciais do contaminante (50,0 a 400,0 mg/L) em contato com 0,2 g do adsorvente, variando o pH de 2,0 a 11,0, em banho a 30°C e agitação constante de 130 rpm. Para as concentrações mais baixas de 2,4-D, o equilíbrio de adsorção foi atingido em cerca de 4 horas, enquanto que para concentrações mais altas, esse tempo foi de 7 horas e 30 minutos. As porcentagens de remoção do contaminante variaram de 91,83% para a menor concentração (50,0 mg/L) de 2,4-D até 54,14% para a maior concentração (400,0 mg/L), mostrando que o carvão ativado produzido a partir dos caroços de tamareira é mais eficiente em menores concentrações. Além disso, o adsorvente apresentou melhor performance com o pH mais baixo (2,0), mostrando capacidade de adsorção de mais de 100,0 mg/g.

Monsalvo, Mohedano e Rodriguez (2011) utilizaram lodo obtido em um reator de uma estação de tratamento de uma indústria de cosméticos para a fabricação de carvão ativado. As amostras de lodo foram lavadas com água destilada e secas a 105°C até atingir peso constante. A ativação térmica do lodo foi realizada sob diferentes condições em mufla, com fluxo de CO<sub>2</sub> ou N<sub>2</sub>, com diferentes tempos (0,5, 2 e 4 horas) e diferentes temperaturas (700 e 800°C), em seguida o material foi lavado com água destilada e uma parte foi ativado com hidróxido de potássio. Os carvões ativados gerados foram utilizados para a remoção do composto orgânico p-clorofenol através de experimentos em batelada. Os experimentos foram conduzidos adicionando-se 100,0 mg do carvão em frascos com 100,0 mL de solução aquosa contendo o contaminante estudado em diferentes concentrações (0,1 a 2 g/L), a 15°C, pH 7,0 e agitação a 200 rpm. Monsalvo, Mohedano e Rodriguez (2011) obtiveram capacidades de adsorção de até 330,0 mg/g.

Bahri et al. (2012) estudaram a ativação química com ácido fosfórico de um carvão produzido a partir de sementes de uva. O carvão ativado gerado foi utilizado para a remoção do agrotóxico Diuron de amostras de água através do método em batelada. As sementes de uva foram impregnadas com ácido fosfórico por 24 horas, enxaguadas com água e secas à 120°C. Após a ativação, as sementes foram carbonizadas a temperaturas entre 350 e 550°C. A adsorção foi realizada agitando diferentes quantidades do carvão ativado, a 150 rpm, com alíquotas de solução contendo diuron a 65,0  $\mu\text{mol/L}$ . A influência da temperatura foi estudada com pH inicial de 6,1 e a temperatura controlada de 15 a 45°C e a influência do pH foi estudada sob temperatura de 45°C e os pHs utilizados foram: 3,0, 7,0 e pH não controlado. O pH 3,0 apresentou os maiores resultados de adsorção, seguido pelo pH não controlado, obtendo resultados de adsorção de mais de 600,0  $\mu\text{mol/g}$ . Os autores também observaram que o aumento da temperatura aumentou a capacidade de adsorção.

A cortiça, uma biomassa natural, foi empregada como adsorvente para a remoção de diversas substâncias, como Ibuprofeno, Paracetamol, Ácido Acetilsalicílico (ASA), Ácido Clofíbrico (Clof), Cafeína (Caf) e ainda Lopamidol (Iop). A cortiça foi ativada térmica e quimicamente através de tratamento em mufla por 1 hora a 800°C e imersão em hidróxido de potássio por 2 horas e 24 horas em carbonato de potássio a temperatura ambiente. Após seco por uma noite a 100°C, 6,0 mg de carvão ativado foram colocadas em frascos de vidro juntamente com diferentes soluções de água ultrapura contendo os 6 contaminantes, com concentrações de 120,0 mg/dm<sup>3</sup>. As amostras permaneceram em banho a 30°C e agitação de 700 rpm por 24 horas. Neste estudo, Mestre et al. (2014) constataram que o carvão produzido é eficiente para tratamento destes compostos, atingindo níveis de remoção próximos a 100% para os diferentes fármacos, com exceção ao Iop que apresentou um menor desempenho, menor que 20%.

Já o estudo de Arampatzidou e Deliyanni (2016) demonstrou que o carvão ativado com ácido fosfórico, proveniente de cascas de batata, é capaz de remover 454,62 mg de Bisfenol A, por g de adsorvente, obtendo 90% de remoção com pH 3,0. Este carvão ativado foi produzido através da lavagem das cascas de batata e posterior secagem à 120°C por 24 horas. Em seguida, as cascas de batata foram moídas e peneiradas para então passar por ativação química com cloreto de zinco, hidróxido de potássio e ácido fosfórico. Após a ativação química, o material foi seco e carbonizado à 400, 600 e 800°C. Buscando investigar a influência do pH inicial (3,0, 5,0, 7,0 e 9,0), 0,01 g do carvão ativado à base de cascas de batata foram agitadas em banho

com temperatura controlada por 24 horas a 160 rpm, juntamente com 20,0 mL de solução com concentração 100,0 mg/L de Bisfenol A. A temperatura de adsorção foi variada de 25 a 65°C, mostrando decréscimo na capacidade de adsorção conforme a temperatura aumentava.

Um estudo sobre a remoção de atrazina foi realizado por Alahabadi e Moussavi (2017), que prepararam um adsorvente a partir do caule seco da planta *Calligonum comossum*, sendo este ativado termicamente com carbonato de potássio. Foram preparadas diferentes amostras de carvão com diferentes concentrações de carbonato de potássio, e também um carvão ativado padrão, que foi utilizado para medir a capacidade de adsorção. Para avaliar a adsorção, 100,0 mL da solução contendo atrazina com diferentes pHs (2,0 a 10,0) e concentrações (100,0 a 400,0 mg/L) foram transferidas para frascos com quantidades pré-determinadas de carvão com diferentes concentrações (0,1 a 0,8 g/L) e permaneceram por diferentes períodos de tempo em contato (0 a 60 minutos), em diferentes temperaturas (10 a 40°C) e agitação de 100 rpm. Os maiores potenciais de adsorção da atrazina, ocorreram com o carvão ativado na solução de 5% de carbonato de potássio, pH 10,0, concentração de atrazina de 100,0 mg/L, concentração de adsorvente de 0,8 g/L, temperatura de 40°C e tempo de contato de 60 minutos, chegando a 100% de remoção do contaminante. Em comparação ao carvão ativado padrão, o carvão de *Calligonum Comossum*, possui área superficial específica cerca de 44% maior, o que o tornou mais eficiente na capacidade de adsorção da atrazina, segundo os autores.

Viotti et al. (2019) desenvolveram adsorventes capazes de remover o fármaco Diclofenaco, presente em soluções aquosas. Os carvões ativados foram produzidos a partir da vagem de *Moringa oleífera*. As vagens foram lavadas com água destilada a 50°C e secas a 60°C até atingirem peso constante. Após esta etapa, as vagens foram esmagadas e ativadas quimicamente com ácido clorídrico 0,100 M, em banho com agitação a 80 rpm e 25°C por 30 minutos. Novamente as vagens foram secas a 60°C até atingirem peso constante e, em seguida, a 110°C por 24 horas. Para os experimentos, utilizou-se diferentes quantidades do adsorvente (0,05 a 0,10 g) com 50,0 mL da solução com contaminante a 50,0 mg/L, diferentes pHs iniciais (2,0 a 12,0) e diferentes temperaturas (25 a 55°C), agitadas a 150 rpm por 27 horas. O carvão ativado produzido a partir das vagens de *Moringa oleífera* se mostrou capaz de adsorver 60,81 mg da substância por grama de carvão ativado, mostrando melhores resultados com pHs e temperaturas mais baixos.

## 5. COLUNA DE LEITO FIXO

Os experimentos em coluna normalmente são processos contínuos e são os mais utilizados em escala industrial para adsorção. Neste tipo de metodologia, há o uso de suportes porosos que evitam a mobilidade do meio, homogeneizando o contato contínuo do adsorvente com a amostra contendo o adsorbato (REYNOLDS e RICHARDS, 1995).

A adsorção em coluna de leito fixo apresenta diversas vantagens, como a possibilidade de sua utilização em larga escala, a nível industrial. Neste tipo de metodologia, o equilíbrio de adsorção não é facilmente atingido como é nos experimentos em batelada e a performance do adsorvente é melhor estudada. Além disso, é um método mais barato e prático de adsorção, visto que o adsorvente pode ser reutilizado diversas vezes. Por outro lado, a adsorção apresenta problemas como: as partículas não fluem de maneira uniforme, podendo ocorrer problemas de alimentação do sistema; o espaço e tempo de execução do processo de adsorção é reduzido por meio de interação vigorosa; e é muito difícil manter o controle da temperatura do sistema. (TAKA et al., 2020).

Segundo Sotelo et al. (2004) a adsorção em colunas com carvão ativado é um dos métodos mais eficientes para remoção de compostos orgânicos de águas. Os autores utilizaram este método para a remoção de metil etil cetona e tricloroeteno. Para os testes, os autores utilizaram o carvão comercial GAC-1240, escolhido devido à conveniência e por ser muito utilizado na remoção de compostos orgânicos. Os experimentos foram realizados sob temperatura constante de 25°C, variando a massa de adsorvente na coluna (10,0 a 40,0 g), a concentração de entrada da solução (300,0 a 750,0 mg/L) e a vazão de alimentação do sistema (0,542 a 1,378 cm<sup>3</sup>/s). Os resultados de adsorção chegaram a 100% de remoção do contaminante.

Areerachakul et al. (2007) avaliaram a remoção do herbicida metsulfurom-metílico utilizando adsorção em coluna com carvão ativado granular comercial, fotocátalise e a combinação dos dois métodos. A concentração das amostras utilizada para os testes foi de 10,0 mg/L. A coluna utilizada possuía 2,0 cm de diâmetro e o carvão ativado foi lavado com água destilada e seco a 103,5 °C por 24 horas antes de ser utilizado. Para o experimento em coluna de leito fixo, foram testadas alturas de carvão ativado de 5,0, 10,0 e 15,0 cm e o fluxo de entrada foi testado em 1,0, 2,0 e 4,0 m/h. O método de fotocátalise foi realizado na presença de dióxido de titânio e luz UV. No sistema híbrido, a amostra passava pela coluna e em seguida entrava no

tanque de armazenagem para em seguida passar pelo sistema de fotocátalise. Os resultados para o sistema híbrido foram muito satisfatórios e apresentaram uma performance melhor que ao utilizar os dois sistemas isolados. Também se constatou que a altura de carvão ativado na coluna influencia na remoção do contaminante, sendo obtidos os melhores resultados de remoção com alturas maiores de carvão ativado (15,0 cm) e menor fluxo de entrada (1,0 m/h), chegando a 100% de remoção no primeiro dia.

Ahmad e Hameed (2010) utilizaram resíduos de bambu para a produção de carvão ativado e investigaram a remoção de azocorantes de águas através de experimentos em coluna. Os resíduos de bambu foram lavados com água destilada quente para remover impurezas e secos por 24 horas a 105°C. Após, os resíduos foram ativados quimicamente com ácido fosfórico, filtrados para remoção do excesso de ácido e secos sob luz solar por 3 dias. Para a produção do carvão, os resíduos secos foram deixados a uma temperatura de 500°C por duas horas, sob fluxo de nitrogênio. A coluna de vidro possuía 1,2 cm de diâmetro interno e 19,5 cm de altura. Foram testadas três diferentes alturas de carvão ativado na coluna (40,0, 60,0 e 80,0 mm), três diferentes concentrações de azocorantes (50,0, 100,0 e 200,0 mg/L), três diferentes vazões de entrada (10,0, 20,0 e 30,0 mL/min), o pH inicial dos experimentos foi 6,5 e a temperatura for mantida em 28°C. O carvão ativado se mostrou eficiente para remoção do contaminante e o sistema em coluna apresentou remoções de até 100% com alta concentração de contaminantes (200,0 mg/L), menor altura de carvão ativado na coluna (40,0 mm) e maior vazão de entrada (30,0 mL/min).

Li et al. (2011) produziram carvão ativado a partir de lodo de efluente de uma fábrica de papel para remover os corantes azul de metileno catiônico e vermelho reativo aniônico através de experimentos em coluna com fluxo contínuo. O lodo foi obtido de uma fábrica da China e foi seco a 105°C por 8 horas. O carvão foi produzido através de carbonização a 300°C em mufla por 60 minutos, seguido de ativação a 850°C por 40 minutos em atmosfera com vapor de água. Para os testes, se utilizou uma coluna de 20,0 cm de comprimento e 1,2 cm de diâmetro interno, variando-se as concentrações de entrada dos corantes (50,0 a 200,0 mg/L para o azul de metileno e 30,0 a 100,0 mg/L para o vermelho reativo), tamanho da partícula de carvão ativado (malha 20,0 – 40,0, 40,0 – 60,0 e 60,0 – 100,0 mm), massa de adsorvente (0,2 a 0,8 g), vazão de entrada (3,0 a 7,0 mL/min) e temperatura ambiente. Foram obtidas capacidades de adsorção de 103,58 mg/g para o azul de metileno e 15,68 mg/g para o vermelho reativo, sendo as melhores condições: baixas concentrações iniciais de contaminantes, maior tamanho de partícula, maior quantidade de adsorvente e menor vazão de entrada.

O bagaço da cana de açúcar foi utilizado por Karunarathne e Amarasinghe (2013) para a produção de carvão ativado objetivando a remoção de fenol de soluções aquáticas. O bagaço de cana de açúcar foi obtido de uma fábrica de açúcar do Sri Lanka. A biomassa foi lavada com água da torneira e em seguida, com água destilada, para então ser seca a 70°C por 24 horas. Para a ativação do carvão, as amostras ficaram 1 hora em mufla a 600°C. A coluna utilizada para o experimento era de vidro, com 3,0 cm de diâmetro e 55,0 cm de altura, e os experimentos foram conduzidos sob temperatura de 30°C, com concentração inicial de solução em 20,0 mg/L, vazão de entrada de 33,3 mL/min, pH entre 6,0 e 7,0 e variando-se a altura de carvão ativado na coluna (16,0 e 32,0 cm). O carvão produzido obteve capacidade máxima de adsorção de cerca de 16,0 mg/g para a menor altura de adsorvente na coluna.

Radhika et al. (2018) modificaram quimicamente um carvão ativado através de tratamento com ácido clorídrico para remoção do sal perclorato. O carvão ativado comercial adquirido era baseado em casca de coco. Uma coluna de vidro de 65,0 cm de altura e 1,0 cm de diâmetro interno foi utilizada para a parte experimental, variando as alturas de carvão ativado (10,0 a 50,0 cm), a vazão de entrada (1,0 a 15,0 mL/min) e a concentração inicial de perclorato (50,0 a 200,0 mg/L). O sistema apresentou melhores resultados de adsorção com menor concentração inicial de contaminantes, menor vazão de entrada e maior altura de carvão na coluna, obtendo máxima capacidade de adsorção de até 36,0 mg/g.

Ajmani et al. (2020) utilizaram a fruta da trepadeira *Phanera vahlii* como biomassa precursora para a produção de carvão ativado com cloreto de zinco, para a remoção de cromo hexavalente. A biomassa utilizada foi obtida na Índia e foi lavada duas vezes com água destilada. Em seguida, as frutas foram secas a 90°C por 20 horas e moídas em partículas pequenas. As amostras secas foram impregnadas com cloreto de zinco e levadas à uma fornalha a 550°C por 1 hora. Os experimentos foram conduzidos em uma coluna de vidro de 30,0 cm de altura e 2,0 cm de diâmetro interno, com diferentes vazões de efluente (5,0 a 15,0 mL/min), diferentes alturas de carvão ativado na coluna (2,0 a 8,0 cm) e diferentes concentrações de cromo (50,0 a 150,0 mg/L). A máxima capacidade de adsorção encontrada foi de 314,4 mg/g, mostrando melhores resultados com maior altura de adsorvente, menor vazão de entrada e maior concentração de contaminante.

## 6. REATOR BATELADA E LEITO FIXO

Rengaraj et al. (2002) estudaram a produção de carvão ativado a partir da casca da semente de palmeira para o tratamento de fenóis presentes em água e esgoto. Para preparar o carvão ativado, as sementes foram lavadas com água e secas a 110°C. Após a secagem, o material foi carbonizado a 500°C por 3 horas, lavado com ácido clorídrico e seco novamente à 110°C. A ativação do carvão foi feita através de uma atmosfera de dióxido de carbono a 850 – 900°C. Os experimentos foram realizados em batelada e em coluna. Os experimentos em batelada foram conduzidos adicionando 100,0 mL da amostra, com concentração de 25,0 mg/L e diferentes valores de pH (2,0 a 13,0) em recipientes de 250,0 mL, com uma massa conhecida do carvão ativado (0,5 a 10,0 g) e a solução permaneceu por diferentes períodos de tempo (0,25 a 24 horas) em temperatura média de 27°C. Os experimentos em coluna foram realizados em coluna de vidro de 2,5 cm de diâmetro, com a mesmas condições dos experimentos em batelada e vazão de entrada constante controlado por bomba peristáltica. Os resultados dos experimentos foram comparados com os resultados de um carvão ativado comercial, mostrando que o carvão ativado produzido a partir das cascas das sementes de palmeiras é mais eficiente, tanto nos experimentos em batelada, quanto nos experimentos em coluna (obtendo 100% de remoção para pH entre 4,0 e 9,0, massa de carvão superior a 30,0 g e tempo de contato superior a 5 horas).

Schreiber et al. (2005) utilizaram os dois métodos de adsorção para remover matéria orgânica dissolvida de sistemas aquáticos, investigando o efeito do tamanho das partículas e da temperatura. As amostras de água foram coletadas em um lago próximo de Dresden, Alemanha e foi utilizado um carvão ativado granular comercial. Os experimentos em batelada foram realizados em frascos de vidro com 300,0 mL de amostra de água, variando a massa de adsorvente (3,0 a 600,0 mg), a concentração da amostra (0,25 a 20,0 mg/L) e a temperatura (5 a 35°C), por um período total de 21 dias. Já os experimentos em coluna, foram realizados em colunas de vidro com 0,7 cm de diâmetro e 5,6 cm de altura, com 1,0 grama de carvão ativado, fluxo constante de amostra (8,0 m/h) e mesmas temperaturas e concentrações de contaminante do experimento em batelada. Os resultados obtidos comprovaram que o incremento da temperatura acarretou melhora na adsorção da matéria orgânica, tanto nos experimentos em batelada, quanto nos experimentos em coluna, chegando a 100 % de remoção do contaminante.

Dwivedi et al. (2008) estudaram a remoção de chumbo através dos dois métodos, coluna e batelada, utilizando um carvão ativado comercial à base de casca de coco. Antes do uso, o carvão ativado foi lavado com água da torneira e seco por 6 horas a 110 °C. Os experimentos em batelada foram realizados variando a concentração inicial da amostra (20,0 a 60,0 mg/L), em erlenmeyers que permaneceram sob constantes agitação (120 rpm) e temperatura (30°C) por 24 horas, juntamente com 0,1 g do carvão ativado. A coluna foi preenchida com 5,0 cm de contas de areia na parte inferior e na parte superior e com 60,0 cm de carvão ativado entre as duas camadas de areia. A coluna utilizada para os experimentos de leito fixo era de vidro, com 60,0 cm de altura e 4,0 cm de diâmetro, e as vazões utilizadas variaram de 1,0 a 50,0 L/min, mantendo-se as mesmas condições de temperatura e concentração da amostra utilizada nos reatores em batelada. Os resultados obtidos nestes experimentos apontaram que a capacidade de adsorção do método de coluna de leito fixo (2,013 mg/g) é muito inferior à capacidade do método de batelada (26,546 mg/g) para este carvão ativado, mostrando menores resultados para maiores concentrações iniciais de contaminante e menores vazões de entrada.

O uso de caroço de azeitona como adsorvente para a remoção de paracetamol em baixas concentrações em águas foi pesquisado por García-Mateos et al. (2015). Os caroços foram moídos, lavados com água destilada e em seguida secos a 100°C. Os caroços foram então impregnados com ácido fosfórico sob temperatura de 60°C por 24 horas e a ativação térmica realizada a 900°C. O estudo utilizou tanto o método em batelada, quanto o método de coluna de leito fixo. Os experimentos em batelada foram realizados adicionando-se 100,0 mL da solução com 10,0 mg do carvão ativado, em incubadora orbital a 200 rpm por 10 dias, e as concentrações iniciais do contaminantes variaram entre 1,0 e 20,0 mg/L e as temperaturas entre 15 e 35°C. Para os experimentos em coluna, utilizou-se uma bomba peristáltica para controle da vazão de entrada (4,0 a 8,0 mL/min), duas diferentes massas de carvão ativado (170,0 a 230,0 mg), concentração inicial do contaminante 5,0 mg/L e temperatura de 25°C. A capacidade máxima de adsorção obtida, tanto para os experimentos em batelada, quanto para os experimentos em coluna, foi de 68,0 a 89,0 mg/g.



## 7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O processo de adsorção em batelada apresenta muitas variáveis que podem ser estudadas, conforme percebido nos trabalhos referenciados. Na Tabela 1 é apresentado um resumo das condições variadas nos experimentos e os resultados obtidos.

Alguns trabalhos trazem os resultados expressos como capacidade máxima de adsorção e outros como porcentagem de remoção, tornando difícil uma comparação entre os resultados. Além do fato de que diferentes materiais foram utilizados para remover outra variedade de materiais. O que pode se perceber avaliando os trabalhos é que variáveis como pH, temperatura, concentração, massa de adsorvente e tempo de contato influenciam diretamente na capacidade máxima de adsorção ou porcentagem de remoção.

Em certos trabalhos, o pH alto apresentou um acréscimo na adsorção, enquanto que para outros, acarretou decréscimo nesta capacidade. O mesmo aconteceu com as outras variáveis estudadas, o que mostra que para cada adsorvente, método de ativação e contaminante, devem ser estudadas as melhores condições de adsorção.

O pH e a temperatura são variáveis diretamente relacionadas com a partição dos íons entre a solução e o adsorvente. O pH influencia a mudança estrutural e a eficiência de transferência entre as moléculas do contaminante e a superfície do adsorvente, controlando a carga superficial por meio de reações de protonação/desprotonação do oxigênio de superfície, que, por sua vez, fornece uma força motriz eletrostática para associação de íons (LEE; WONG; LIU, 2011; MACHESKY et al., 2001; PŘEDOTA et al., 2013). Enquanto que a temperatura influencia na forma e nas características da superfície do adsorvente, influenciando na sua estabilidade (DATSKO; ZELENTSOV; DVORNIKOVA, 2011; WIŚNIEWSKA, 2007).

Outra variável que pode ser estudada nos experimentos em batelada é a velocidade de agitação. Nos estudos citados neste trabalho, o efeito da agitação não foi especificamente estudado, mas a velocidade de agitação variou muito de um estudo para outro. A velocidade de agitação já foi estudada por muitos pesquisadores e muitas vezes apresentou significantes acréscimos na eficiência do processo de adsorção. Isso se deve ao fato de que o aumento da velocidade de agitação diminui a resistência da camada limite do adsorvente, aumentando consequentemente a transferência de massa e acelerando o contato dos íons dos contaminantes

com o adsorvente (KUŚMIEREK; WIA,TKOWSKI, 2015; KYZAS et al., 2020; ONG; LEE; ZAINAL, 2007).

Em relação às variáveis, o mesmo vale para os experimentos em coluna de leito fixo, cujas variáveis podem ser vistas na Tabela 2. Para os experimentos em leito fixo, a vazão ou fluxo de entrada da solução contendo o contaminante e a altura de carvão ativado na coluna são determinantes para a eficiência do tratamento. Na maioria dos estudos referenciados neste trabalho, o processo de adsorção em colunas de leito fixo foi mais eficiente com maiores alturas de carvão ativado e menor vazão ou fluxo de entrada, o que pode ser explicado pelo fato de que com estas condições há um maior tempo de retenção da solução na coluna e maior disponibilidade de adsorvente.

Em grande parte dos trabalhos apresentados, estudou-se a ativação dos carvões através de tratamento térmico e/ou tratamento químico, o que apresentou aumento na eficiência de adsorção. A ativação térmica influencia na estrutura do adsorvente, aumentando a sua permeabilidade e porosidade, aumentando a quantidade e tamanhos dos poros na superfície do carvão (BAHRAMI; AMIRI; DEHKHODAIE, 2020; MASTURI et al., 2019). A ativação química também é utilizada para aumentar a quantidade e o volume dos poros superficiais dos carvões, aumentando a área superficial, além de remover impurezas que possam estar presentes no adsorvente (AMARI et al., 2018; AZAR; RAYGAN; SHEIBANI, 2020; HU et al., 2009).

Tabela 1 – Resumo das variáveis estudadas nos experimentos em batelada.

AUTORES	PRECURSOR DO CARVÃO	MASSA DE CARVÃO	CONTAMINANTE	CONCENTRAÇÃO DO CONTAMINANTE	pH	TEMPO DE CONTATO	TEMPERATURA	ADSORÇÃO
Kadirvelu, Thamaraiselvi e Namasivayam (2001)	Medula de coco	20 a 60 mg	Níquel	20 a 40 mg/L	5 a 10	40 minutos	-	80 a 100%
Goyal et al.(2001)	Carvão comercial	0,1 g	Cobre	0 a 1000 mg/L	3 a 4	24 horas	-	40 mg/g
			Zinco	1x10-5 mol/dm <sup>3</sup>	6 a 11			
Babic et al. (2002)	Tecido Viscose Rayon	-	Cádmio	1x10-5 mol/dm <sup>3</sup>	9 a 10	2 horas	20°C	90 a 100%
			Mercurio	1x10-4 mol/dm <sup>3</sup>	2 a 3			
Bembnowska, Pelech e Milhert (2003)	Carvão comercial	-	Compostos organoclorados	0 a 3 mg/dm <sup>3</sup>	-	20 horas	30°C	90 mg/g
Bansode et al. (2003)	Cascas de nozes e amêndoas	0,01 g	Compostos orgânicos voláteis	100 ppb	-	24 horas	-	83%
Kütahyalı e Eral (2004)	Carvão vegetal	-	Urânio	50 a 200 ppm	2 a 8	0 a 480 minutos	30 a 70°C	77,78%

Namasivayam e Sangeetha (2006)	Medula de coco	25 a 350 mg	Molibdato	10 a 40 mg/L	2 a 11	40 minutos	35 a 60°C	85%
Hameed, Salman e Ahmad (2009)	Caroços de tamareira	0,2 g	2,4-D	50 a 400 mg/L	2 a 11	4 a 7,5 horas	30°C	100 mg/g
Monsalvo, Mohedano e Rodriguez (2011)	Lodo de ETE	100 mg	p-Clorofenol	0,1 a 2 g/L	7	-	15°C	330 mg/g
Bahri et al. (2012)	Sementes de uva	-	Diuron	65 µmol/L	3 e 7	-	15 a 45°C	600 µmol/g
Mestre et al. (2014)	Cortiça	6 mg	Fármacos	120 mg/dm <sup>3</sup>	-	24 horas	30°C	100%
Arampatzidou e Deliyanni (2016)	Cascas de batata	0,01 g	Bisfenol-A	100 mg/L	3 a 9	24 horas	25 a 65°C	454,62 mg/g, 90%
Alahabadi e Moussavi (2017)	<i>Calligonum comossum</i> (caule)	-	Atrazina	100 a 400 mg/L	2 a 10	1 a 60 minutos	10 a 40°C	100%
Viotti et al. (2019)	<i>Moringa oleifera</i> (vagem)	0,05 a 0,1 g	Diclofenaco	50 mg/L	2 a 12	27 horas	25 a 55°C	60,81 mg/g
Rengaraj et al. (2002)	Semente de palmeira	0,5 a 10 g	Fenóis	25 mg/L	2 a 13	0,25 a 24 horas	27°C	100%

Schreiber et al. (2005)	Carvão comercial	3 a 600 mg	Matéria Orgânica Dissolvida	0,25 a 30 mg/L	-	21 dias	5 a 35°C	100%
Dwivedi et al. (2008)	Carvão comercial	0,1 g	Chumbo	20 a 60 mg/L	-	24 horas	30°C	26,546 mg/g
García-Mateos et al. (2015)	Caroço de azeitona	10 mg	Paracetamol	1 a 20 mg/L	-	-	15 a 35°C	68 a 89 mg/g

---

Fonte: Elaboração própria, 2021.

Tabela 2 – Resumo das variáveis estudadas nos experimentos em colunas de leito fixo.

AUTORES	PRECURSOR DO CARVÃO	ALTURA DE CARVÃO	CONTAMINANTE	CONCENTRAÇÃO DE CONTAMINANTE	pH	TEMPERATURA	VAZÃO	ADSORÇÃO
Sotelo et al. (2004)	Carvão comercial	10 a 40 g	Compostos orgânicos	300 a 750 mg/L	-	-	0,542 a 1,378 cm <sup>3</sup> /s	100%
Areerachakul et al. (2007)	Carvão comercial	5 a 15 cm	Metsulfurom metílico	10 mg/L	-	-	1 a 4 m/h	100%
Ahmad e Hameed (2010)	Bambu	40 a 80 mm	Azocorantes	50 a 200 mg/L	6,5	28°C	10 a 30 mL/min	100%
Li et al. (2011)	Lodo de ETE	0,2 a 0,8 g	Azul de metileno	50 a 200 mg/L	-	25°C	3 a 7 mL/min	103,58 mg/g
			Vermelho reativo	30 a 100 mg/L				15,68 mg/g
Karunaratne e Amarasinghe (2013)	Bagaço de cana de açúcar	16 e 32 cm	Fenol	20 mg/L	6 a 7	30°C	33,3 mL/min	16 mg/g
Radhika et al. (2018)	Carvão comercial	10 a 50 cm	Perclorato	50 a 200 mg/L	-	-	1 a 15 mL/min	36 mg/g
Ajmani e colaboradores (2020)	<i>Phanera vahlii</i> (fruta)	2 a 8 cm	Cromo hexavalente	50 a 150 mg/L	-	-	5 a 15 mL/min	314,4 mg/g

Rengaraj et al. (2002)	Semente de palmeira	0,5 a 10 g	Fenóis	25 mg/L	2 a 13	27°C	-	100%
Schreiber et al. (2005)	Carvão comercial	1 g	Matéria Orgânica Dissolvida	0,25 a 30 mg/L	-	5 a 35°C	8 m/h	100%
Dwivedi et al. (2008)	Carvão comercial	60 cm	Chumbo	20 a 60 mg/L	-	30°C	1 a 50 L/min	2,0132 mg/g
García-Mateos et al. (2015)	Caroço de azeitona	170 a 230 mg	Paracetamol	5mg/L	-	25°C	4 a 8 mL/min	68 a 89 mg/g

---

Fonte: Elaboração própria, 2021.

## 8. CONCLUSÃO

A adsorção com carvões ativados se mostra como um método econômico e eficiente de tratamento de águas e efluentes, sendo possível a utilização de diversos resíduos para a produção dos carvões ativados. Resíduos que vão desde lodo de estações de tratamento até cascas e sementes de frutas.

A adsorção pode ser realizada tanto através do método de batelada, quando através do método em coluna. Ao longo dos anos percebe-se que o método em batelada sempre foi utilizado, mas o método em coluna passou a ser utilizado mais recentemente, visto que foram encontrados muito mais artigos com este método a partir do ano 2017.

Através das leituras realizadas e trabalhos apresentados aqui, pode-se concluir que os dois métodos são eficientes para a remoção de contaminantes. Da mesma forma, pode-se perceber que o método de adsorção utilizando carvões ativados é muito eficiente, na maioria das vezes atingindo remoções de até 100% dos contaminantes ou obtendo capacidades altas de adsorção. Além disso, a variedade de contaminantes que podem ser removidos é muito extensa, desde metais pesados até compostos orgânicos e os chamados contaminantes emergentes (agrotóxicos e fármacos).

A adsorção é uma área de estudo muito abrangente, pois há diversas maneiras e matérias primas que podem ser utilizadas para a produção e ativação dos carvões e há vários contaminantes cuja remoção ainda pode ser estudada.



## REFERÊNCIA

AHMAD, A. A.; HAMEED, B. H. Fixed-bed adsorption of reactive azo dye onto granular activated carbon prepared from waste. **Journal of Hazardous Materials**, v. 175, n. 1–3, p. 298–303, 2010.

AHMAD, M. et al. International Journal of Biological Macromolecules Kinetic and thermodynamic evaluation of adsorption of Cu (II) by thiosemicarbazide chitosan. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 92, p. 910–919, 2016.

AJMANI, A. et al. Packed bed column studies of hexavalent chromium adsorption by zinc chloride activated carbon synthesized from *Phanera vahlii* fruit biomass. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, n. 4, p. 103825, 2020.

ALAHABADI, A.; MOUSSAVI, G. Preparation, characterization and atrazine adsorption potential of mesoporous carbonate-induced activated biochar (CAB) from *Calligonum Comosum* biomass: Parametric experiments and kinetics, equilibrium and thermodynamic modeling. **Journal of Molecular Liquids**, v. 242, n. 2016, p. 40–52, 2017.

AL BAHRI, M. et al. Activated carbon from grape seeds upon chemical activation with phosphoric acid: Application to the adsorption of diuron from water. **Chemical Engineering Journal**, v. 203, p. 348–356, 2012.

ALQADAMI, A. A. et al. Adsorptive Removal of Toxic Dye Using Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>–TSC Nanocomposite: Equilibrium, Kinetic, and Thermodynamic Studies. **Journal of Chemical & Engineering Data**, v. 61, n. 11, p. 3806–3813, 2016.

AMARI, A. et al. applied sciences Effect of Structure and Chemical Activation on the Adsorption Properties of Green Clay Minerals for the Removal of Cationic Dye. **Applied Sciences**, v. 8, n. 2302, p. 1–18, 2018.

ARAMPATZIDOU, A. C.; DELIYANNI, E. A. Comparison of activation media and pyrolysis temperature for activated carbons development by pyrolysis of potato peels for effective adsorption of endocrine disruptor bisphenol-A. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 466, p. 101–112, 2016.

AREERACHAKUL, N. et al. Granular activated carbon (GAC) adsorption-photocatalysis hybrid system in the removal of herbicide from water. **Separation and Purification Technology**, v. 55, n. 2, p. 206–211, 2007.

AZAR, M. S.; RAYGAN, S.; SHEIBANI, S. Effect of chemical activation process on adsorption of As (V) ion from aqueous solution by mechano-thermally synthesized zinc ferrite nanopowder. **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**, v. 27, n. 4, p. 526–537, 2020.

BABIĆ, B. M. et al. Adsorption of zinc, cadmium and mercury ions from aqueous solutions on an activated carbon cloth. **Carbon**, v. 40, n. 7, p. 1109–1115, 2002.

BAHRAMI, M.; AMIRI, M. J.; DEHKHODAIE, F. Effect of different thermal activation on hydroxyapatite to eliminate mercury from aqueous solutions in continuous adsorption system. **International Journal of Environmental Analytical Chemistry**, v. 00, n. 00, p. 1–21, 2020.

BANSODE, R. R. et al. Adsorption of volatile organic compounds by pecan shell- and almond shell-based granular activated carbons. **Bioresource Technology**, v. 90, n. 2, p. 175–184, 2003.

BASU, S.; GHOSH, G.; SAHA, S. Adsorption characteristics of phosphoric acid induced activation of bio-carbon: Equilibrium, kinetics, thermodynamics and batch adsorber design. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 117, p. 125–142, 2018.

BEMBNOWSKA, A.; PELECH, R.; MILCHERT, E. Adsorption from aqueous solutions of chlorinated organic compounds onto activated carbons. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 265, n. 2, p. 276–282, 2003.

DWIVEDI, C. P. et al. Column performance of granular activated carbon packed bed for Pb(II) removal. **Journal of Hazardous Materials**, v. 156, n. 1–3, p. 596–603, 2008.

GARCÍA-MATEOS, F. J. et al. Removal of paracetamol on biomass-derived activated carbon: Modeling the fixed bed breakthrough curves using batch adsorption experiments. **Chemical Engineering Journal**, v. 279, p. 18–30, 2015.

GOYAL, M. et al. Removal of copper from aqueous solutions by adsorption on activated carbons. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 190, n. 3, p. 229–238, 2001.

HAMEED, B. H.; SALMAN, J. M.; AHMAD, A. L. Adsorption isotherm and kinetic modeling of 2,4-D pesticide on activated carbon derived from date stones. **Journal of Hazardous Materials**, v. 163, n. 1, p. 121–126, 2009.

HU, C. et al. Effect of chemical activation of an activated carbon using zinc chloride on elemental mercury adsorption. **Fuel Processing Technology**, v. 90, n. 6, p. 812–817, 2009.

KADIRVELU, K.; THAMARAISELVI, K.; NAMASIVAYAM, C. Adsorption of nickel(II) from aqueous solution onto activated carbon prepared from coirpith. **Separation and Purification Technology**, v. 24, n. 3, p. 497–505, 2001.

KARUNARATHNE, H. D. S. S.; AMARASINGHE, B. M. W. P. K. Fixed bed adsorption column studies for the removal of aqueous phenol from activated carbon prepared from sugarcane bagasse. **Energy Procedia**, v. 34, p. 83–90, 2013.

KHAN, M. A. et al. Adsorption of methylene blue on strongly basic anion exchange resin (Zerolit DMF): kinetic, isotherm, and thermodynamic studies. **Desalination and Water Treatment**, v. 53, n. 2, p. 515–523, 2015.

KUŚMIEREK, K.; WIA, TKOWSKI, A. The influence of different agitation techniques on the adsorption kinetics of 4-chlorophenol on granular activated carbon. **Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis**, v. 116, n. 1, p. 261–271, 2015.

KÜTAHYALI, C.; ERAL, M. Selective adsorption of uranium from aqueous solutions using activated carbon prepared from charcoal by chemical activation. **Separation and Purification Technology**, v. 40, n. 2, p. 109–114, 2004.

KYZAS, G. Z. et al. Effect of agitation on batch adsorption process facilitated by using nanobubbles. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 607, n. July, p. 125440, 2020.

LAKSACI, H. et al. Valorization of coffee grounds into activated carbon using physic - Chemical activation by KOH/CO<sub>2</sub>. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 5, n. 5, p. 5061–5066, 2017.

LEE, S.; WONG, J. H.; LIU, S. J. Fluorescence and raman study of pH effect on the adsorption orientations of methyl red on silver colloids. **Applied Spectroscopy**, v. 65, n. 9, p. 996–1003, 2011.

LI, W. et al. Adsorption characteristics of dyes in columns of activated carbon prepared from paper mill sewage sludge. **Chemical Engineering Journal**, v. 178, p. 197–203, 2011.

MACHESKY, M. L. et al. On the temperature dependence of intrinsic surface protonation equilibrium constants: An extension of the revised MUSIC model. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 239, n. 2, p. 314–327, 2001.

MALVESTIO, A. C. **Estudo da adsorção de ácidos graxos voláteis através de troca iônica em ensaios em batelada e coluna de leito fixo.** (Monografia). Escola de Engenharia de São Carlos - Engenharia Ambiental, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. 71 p.

MARTINEZ, M. S. et al. Remoção dos herbicidas Diuron e Hexazidona de água por adsorção em carvão ativado. **DAE**, v. 185, p. 35–39, 2011.

MASTURI et al. The effect of thermal activation for natural zeolite on the performance of ceramic membrane as Pb<sup>2+</sup> ion adsorption The effect of thermal activation for natural zeolite on the performance of ceramic membrane as Pb<sup>2+</sup> ion adsorption. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1170, p. 1–7, 2019.

MESTRE, A. S. et al. Activated carbons prepared from industrial pre-treated cork: Sustainable adsorbents for pharmaceutical compounds removal. **Chemical Engineering Journal**, v. 253, n. 106637, p. 408–417, 2014.

MING-TWANG, S. et al. Potassium hydroxide-treated palm kernel shell sorbents for the efficient removal of methyl violet dye. **Desalination and Water Treatment**, v. 84, p. 262-270, 2017.

MONSALVO, V. M.; MOHEDANO, A. F.; RODRIGUEZ, J. J. Activated carbons from sewage sludge. Application to aqueous-phase adsorption of 4-chlorophenol. **Desalination**, v. 277, n. 1–3, p. 377–382, 2011.

NAMASIVAYAM, C.; SANGEETHA, D. Removal of molybdate from water by adsorption onto ZnCl<sub>2</sub> activated coir pith carbon. **Bioresource Technology**, v. 97, n. 10, p. 1194–1200, 2006.

NAUSHAD, M. et al. Nickel ferrite bearing nitrogen-doped mesoporous carbon as efficient adsorbent for the removal of highly toxic metal ion from aqueous medium. **Chemical Engineering Journal**, v. 330, p. 1351–1360, 2017.

ONG, S. T.; LEE, C. K.; ZAINAL, Z. Removal of basic and reactive dyes using ethylenediamine modified rice hull. **Bioresource Technology**, v. 98, n. 15, p. 2792–2799, 2007.

PEÑA-GUZMÁN, C. et al. Emerging pollutants in the urban water cycle in Latin America: A review of the current literature. **Journal of Environmental Management**, v. 237, p. 408–423, 2019.

PŘEDOTA, M. et al. Electric double layer at the rutile (110) surface. 4. effect of temperature and pH on the adsorption and dynamics of ions. **Journal of Physical Chemistry C**, v. 117, n. 44, p. 22852–22866, 2013.

RADHIKA, R. et al. Adsorption performance of packed bed column for the removal of perchlorate using modified activated carbon. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 117, p. 350–362, 2018.

RENGARAJ, S. et al. Agricultural solid waste for the removal of organics: Adsorption of phenol from water and wastewater by palm seed coat activated carbon. **Waste Management**, v. 22, n. 5, p. 543–548, 2002.

REYNOLDS, T. D.; RICHARDS, P. A. **Unit operations and processes in environmental engineering**. 2<sup>a</sup> Edição. Boston: PWS Publishing Company, 1995.

SCHREIBER, B. et al. Adsorption of dissolved organic matter onto activated carbon - The influence of temperature, absorption wavelength, and molecular size. **Water Research**, v. 39, n. 15, p. 3449–3456, 2005.

SOTELO, J. L. et al. Adsorption of methyl ethyl ketone and trichloroethene from aqueous solutions onto activated carbon fixed-bed adsorbers. **Separation and Purification Technology**, v. 37, n. 2, p. 149–160, 2004.

TAKA, A. L. et al. Chitosan nanocomposites for water treatment by fixed-bed continuous flow column adsorption: A review. **Carbohydrate Polymers**, v. 255, p. 117398, 2021.

TAN, G.; XIAO, D. Adsorption of cadmium ion from aqueous solution by ground wheat stems. **Journal of Hazardous Materials**, v. 164, p. 1359–1363, 2009.

TEODOSIU, C. et al. Emerging pollutants removal through advanced drinking water treatment: A review on processes and environmental performances assessment. **Journal of Cleaner Production**, v.197, p. 1210–1221, 2018.

VIOTTI, P. V. et al. Diclofenac removal from water by adsorption on *Moringa oleifera* pods and activated carbon: Mechanism, kinetic and equilibrium study. **Journal of Cleaner Production**, v. 219, p. 809–817, 2019.

VOLTAN, P. E. N. et al. Predição da performance de carvão ativado granular para remoção de herbicidas com ensaios em coluna de escala reduzida. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 21, n. 2, p. 241–250, 2016.

WIŚNIEWSKA, M. Temperature study of nonionic polymers adsorption at the alumina - Solution interface. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 90, n. 11, p. 3608–3614, 2007.