

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS

Departamento de Engenharia Química

G

E

Q



Trabalho de Conclusão de Curso

**ADSORÇÃO DE BENZENO E TOLUENO EM
SOLUÇÃO AQUOSA COM USO DE BIOCARVÃO
PROVENIENTE DE PROCESSO DE PIRÓLISE DE
BIOMASSA**

Ana Caroline Alves de Souza

***Orientador: Jorge Vinícius Fernandes Lima
Cavalcanti***

Recife/PE

2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

ANA CAROLINE ALVES DE SOUZA

**ADSORÇÃO DE BENZENO E TOLUENO EM SOLUÇÃO AQUOSA COM USO DE
BIOCARVÃO PROVENIENTE DE PROCESSO DE PIRÓLISE DE BIOMASSA**

Recife

2023

ANA CAROLINE ALVES DE SOUZA

**ADSORÇÃO DE BENZENO E TOLUENO EM SOLUÇÃO AQUOSA COM USO DE
BIOCARVÃO PROVENIENTE DO PROCESSO DE PIRÓLISE DE BIOMASSA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Química da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Química.

Orientador (a): Jorge Vinícius Fernandes Lima Cavalcanti

Recife

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Souza, Ana Caroline Alves de.

Adsorção de benzeno e tolueno em solução aquosa com uso de biocarvão
proveniente de processo de pirólise de biomassa / Ana Caroline Alves de Souza. -
Recife, 2023.

44p : il., tab.

Orientador(a): Jorge Vinícius Fernandes Lima Cavalcanti

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Química -
Bacharelado, 2023.

1. Biocarvão. 2. Adsorção. 3. Tolueno. 4. Benzeno. I. Cavalcanti, Jorge
Vinícius Fernandes Lima. (Orientação). II. Título.

660 CDD (22.ed.)

ANA CAROLINE ALVES DE SOUZA

**ADSORÇÃO DE BENZENO E TOLUENO EM SOLUÇÃO AQUOSA COM USO DE
BIOCARVÃO PROVENIENTE DO PROCESSO DE PIRÓLISE DE BIOMASSA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Química da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Química.

Aprovado em: 28/09/2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jorge Vinícius Fernandes Lima Cavalcanti (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Dra. Bruna Figueiredo do Nascimento (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dra. Fernanda Araújo Honorato (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

À todos os meus familiares, principalmente meus pais e meu irmão, que me apoiaram e foram o meu suporte durante todos esses anos de graduação em Engenharia Química.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Jorge Vinicius Fernandes Lima Cavalcanti, pela orientação, disponibilidade e estímulo a procura constante pelo conhecimento.

Por fim, agradeço a Deus, que não me deixou desistir quando as dificuldades apareciam ao longo dos anos de graduação.

RESUMO

Devido a ineficiência dos processos mais conhecidos em tratamento de água na remoção dos compostos provenientes de águas industriais do segmento de Petróleo se tem a busca de tratamentos complementares, como por exemplo, a adsorção. Diante disso, o presente trabalho abordou o estudo da eficiência de adsorção de um biocarvão, proveniente da pirólise da biomassa, matéria-prima de alta disponibilidade, que se renova facilmente e é de baixo custo no território brasileiro devido à alta atividade do setor agrícola, na remoção de benzeno e tolueno. O biocarvão foi caracterizado utilizando as técnicas de microscopia de varredura eletrônica (MEV), difração de raio-X (DRX) e análises microporosimétricas. Quanto aos ensaios de adsorção, foram realizados experimentos de equilíbrio de adsorção para os sistemas mono e bicomponente. De acordo com as caracterizações, foi observado que o biocarvão possui predominância de mesoporos com área superficial BET de $426,2 \text{ m}^2/\text{g}$ e, de acordo com o DRX, apresenta características de estruturas amorfas. Nos estudos de equilíbrio, o carvão comercial obteve resultados melhores de capacidade de adsorção, se tornando mais favorável a adsorção. Os dados experimentais apresentaram, para o sistema monocomponente, melhor ajuste para a isoterma de Langmuir-Freundlich, tendo como capacidade máxima de adsorção do biocarvão para o tolueno e benzeno, respectivamente, $(168,55 \pm 33,57) \text{ mg/g}$ e $(77,24 \pm 1,41) \text{ mg/g}$. Mas o biocarvão teve resultados satisfatórios, pois ele não é ativado. Logo, há possibilidade de elevar a área superficial dele e, conseqüentemente, aumentar sua capacidade de adsorção.

Palavras-chave: Biocarvão; Adsorção; Tolueno; Benzeno;

ABSTRACT

Due to the inefficiency of the best-known water treatment processes in removing compounds from industrial waters in the Petroleum segment, there is a search for complementary treatments, such as adsorption. In view of this, the present work addressed the study of the adsorption efficiency of a biochar, originating from the pyrolysis of biomass, a highly available raw material, which is easily renewed and is low cost in Brazilian territory due to the high activity of the agricultural sector, in the removal of benzene and toluene. The biochar was presented using scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD) and microporosimetric analysis techniques. As for the adsorption tests, adsorption equilibrium experiments were carried out for the mono- and two-component systems. According to the characterizations, it was observed that the biochar has a predominance of mesopores with a BET surface area of $426.2 \text{ m}^2/\text{g}$ and, according to XRD, it presents characteristics of amorphous structures. In equilibrium studies, commercial coal obtained better results in terms of adsorption capacity, making it more favorable to adsorption. The experimental data proved, for the single-component system, a better fit for the Langmuir-Freundlich isotherm, with the maximum biochar adsorption capacity for toluene and benzene, respectively, $(168,55 \pm 33,57) \text{ mg/g}$ and $(77,24 \pm 1,41) \text{ mg/g}$. But biochar has had overwhelming results because it is not activated. Therefore, there is the possibility of increasing its surface area and, consequently, increasing its adsorption capacity.

Keywords: Biochar; Adsorption; Toluene; Benzene;

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Estrutura molecular do benzeno	14
Figura 2 –	Estrutura molecular do tolueno	14
Figura 3 –	Etapas da cinética de adsorção	18
Figura 4 –	Formas de uma isoterma de adsorção	19
Figura 5 –	Grupos funcionais no carvão ativado	22
Figura 6 –	Microestruturas do biocarvão e do carvão comercial ampliadas em 1000x 2000x 3000x 5000x e 10000x	26
Figura 7 –	Análise de difração de raio-x do carvão comercial (CC) e biocarvão (BC)	27
Figura 8 –	Representação das curvas de equilíbrio do benzeno em um sistema monocomponente para o carvão comercial (■) e o carvão pirolisado (□)	32
Figura 9 –	Representação das curvas de equilíbrio do tolueno em um sistema monocomponente para o carvão comercial (●) e o carvão pirolisado (○)	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Áreas superficiais dos carvões, volume e diâmetro dos poros	28
Tabela 2 –	Dados do estudo de equilíbrio para o tolueno e benzeno em um sistema monocomponente	29
Tabela 3 –	Dados do estudo de equilíbrio para o tolueno e benzeno em um sistema bicomponente	30
Tabela 4 –	Parâmetros adsortivos do tolueno nos modelos de equilíbrio (27°C)	33
Tabela 5 –	Parâmetros adsortivos do benzeno nos modelos de equilíbrio (27°C)	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Å	Angstrom
BET	Brunauer, Emmett e Teller
BJH	Barret, Joyner e Hallendy
BTEX	Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e p-Xileno
BTX	Solução com os compostos benzeno, tolueno e p-xileno
BC	Biocarvão
°C	Graus Celsius
C ₀	Concentração inicial do adsorvato
C _{eq}	Concentração do adsorvato no equilíbrio
CC	Carvão comercial
CO ₂	Dióxido de carbono
DRX	Análise de difração de raio-X
FTIR	Infravermelho com transformada de Fourier
g	Grama
HPLC	Cromatografia líquida de alta eficiência
pH	Potencial hidrogeniônico de uma solução
K _L	Constante de adsorção de Langmuir
K _F	Constante de adsorção de Freundlich
K _{FL}	Constante de adsorção de Langmuir-Freundlich
L	Litro
LCA	Laboratório de Carvão Ativado
m _s	Massa do adsorvente
Mesh	Número de abertura por polegada
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
q _{eq}	Constante de capacidade de adsorção no equilíbrio
q _{max}	Capacidade máxima de adsorção
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
UV	Radiação ultravioleta
V	Volume

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	EFLUENTES CONTAMINADOS COM HIDROCARBONETOS	13
2.2	O BENZENO	13
2.3	O TOLUENO	14
2.4	TÉCNICAS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES	15
2.5	ADSORÇÃO	16
2.5.1	Cinética de Adsorção	17
2.5.2	Equilíbrio de Adsorção	18
2.5.2.1	Isoterma de Langmuir	19
2.5.2.2	Isoterma de Langmuir-Freundlich	20
2.6	MATERIAIS ADSORVENTES	21
2.6.1	Carvão ativado	21
2.6.2	Materiais adsorventes provenientes de biomassa pirolisada	21
3	MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1	PRODUÇÃO DO CARVÃO PIROLISADO	23
3.2	CARACTERIZAÇÃO DOS ADSORVENTES	23
3.2.1	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	23
3.2.2	Difração de raio-X (DRX)	24
3.2.3	Análise microporosimétrica	24
3.3	PREPARAÇÃO DAS SOLUÇÕES	24
3.3.1	Quantificação do adsorvato	25
3.4	ENSAIOS DE ADSORÇÃO	25
3.4.1	Experimentos de equilíbrio de adsorção	25
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS CARVÕES	26
4.1.1	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	26
4.1.2	Difração de raio-X (DRX)	27
4.1.3	Análise microporosimétrica	28
4.2	ENSAIOS DE ADSORÇÃO	28

4.2.1	Equilíbrio de adsorção monocomponente	28
4.2.2	Equilíbrio de adsorção bicomponente	30
4.2.3	Isoterma de adsorção	31
5	CONCLUSÃO	35
	REFERÊNCIAS	36

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento da industrialização variados tipos de poluentes (inorgânicos ou orgânicos) são inseridos de forma contínua em ambientes aquáticos por meio de efluentes industriais, diminuindo a disponibilidade de água limpa. Diante disso, se tem a demanda de novos métodos de tratamento e reutilização de água (Khurshid *et al*, 2021).

Como foco deste trabalho, a indústria do Petróleo tem sido um dos principais causadores de poluição ambiental. Isso porque o efluente industrial gerado por meio da extração de petróleo contém inúmeros compostos como, hidrocarbonetos poliaromáticos e monoaromáticos, óleo dissolvido, materiais radioativos, metais pesados, entre outros compostos químicos da produção (Jimenez *et al*, 2018).

Os hidrocarbonetos monoaromáticos BTEX (benzeno, tolueno e isômeros de xileno), são normalmente utilizados como solventes. O benzeno é um composto orgânico inflamável, pouco solúvel em água e volátil e é um dos dez maiores causadores de problemas na saúde humana. Enquanto o tolueno é um composto orgânico que além de estar na composição da gasolina, também pode ser empregado em revestimentos, solventes em tintas, fabricação de polímeros e borracha (Ministério da Saúde, 2022; Greenview, 2023).

Ao serem inseridos de forma contínua e sem tratamento no meio ambiente pelos efluentes petroquímicos, estes compostos, cancerígenos e tóxicos, geram impactos negativos a saúde humana e a natureza (Bezerra *et al*, 2022).

Mesmo com o uso dos processos mais conhecidos de tratamento de água (coagulação e floculação, por exemplo) a remoção dos compostos BTX são ineficientes. Logo, não garantem a remoção desses compostos a níveis aceitáveis pela legislação (Neff; Lee; Deblois, 2011). Diante disso, se tem a necessidade da realização de tratamentos complementares, como adsorção por meio de carvão ativado ou biocarvão.

A adsorção recentemente começou a atrair mais atenção por causa da sua elevada eficiência em remover poluentes orgânicos facilmente e a disponibilidade de se ter vários materiais adsorventes. Entretanto, o custo e sua eficiência dependem do material (Adeniyi; Ighalo, 2019).

Por meio da pirólise os resíduos de biomassa são transformados em biocarvão. A biomassa tem alta disponibilidade, se renova facilmente e é de baixo

custo. Além disso, a queima da biomassa pode evitar a emissão de CO₂. Logo, devido aos benefícios já citados, o uso do biocarvão derivado da pirólise tem alta relevância em pontos ambientais (Ye *et al*, 2015).

Assim, o presente trabalho tem como objetivo geral estudar a adsorção de Benzeno e Tolueno em efluentes aquosos (simulados), por meio de um biocarvão, que é resíduo de um processo de pirólise, e comparar seu desempenho com o do carvão ativado comercial. Tendo também, os seguintes pontos como objetivos específicos:

- Realizar a caracterização dos adsorventes, usando as técnicas de microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de raio-X (DRX) e análises microporosimétrica.
- Efetuar estudos de equilíbrio de adsorção mono e bicomponente.
- Testar o modelo de equilíbrio adsorativo homogêneo (Langmuir) e heterogêneo (Langmuir-Freundlich).
- Efetuar uma análise comparativa da eficiência de remoção do benzeno e tolueno, entre o carvão ativado comercial e o biocarvão.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 EFLUENTES CONTAMINADOS COM HIDROCARBONETOS

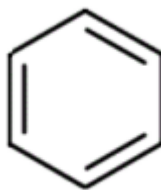
A contaminação de efluentes com hidrocarbonetos é um risco a vida humana e a biodiversidade aquática. Vários acidentes ambientais ocorreram nos últimos anos envolvendo toda a cadeia produtiva do Petróleo, desde a extração até o armazenamento (AgSolve, 2023).

Dependendo da dose e da exposição aos efluentes contaminados com os compostos BTX, pode ocorrer efeitos adversos à saúde humana e ecossistemas. A exposição crônica ao benzeno pode acarretar distúrbios imunológicos, neurológicos, hematológicos e endócrinos (Cruz *et al*, 2017). Enquanto a exposição ao tolueno, pode causar intoxicação (tonturas, desorientação, confusão e cefaleia) (Ecycle, 2023). Logo, encontrar tratamentos econômicos e renováveis de remoção desses compostos da água é de extrema importância para se ter uma água mais segura.

Com a elevada quantidade de poluentes é de extrema importância se ter tecnologias que removam os mesmos, que se encontram em resíduos gasosos e líquidos. Entretanto, somente com os métodos físico-químicos tradicionais não se tem a remoção adequada, e com os métodos de tratamentos biológicos é encontrado resistência das substâncias a serem removidas. Com isso, a técnica de adsorção se mostra uma opção relevante (Nascimento *et al*, 2020).

2.2 O BENZENO

O benzeno é um composto orgânico aromático, inflamável, líquido, muito tóxico e incolor, que constitui a base dos hidrocarbonetos aromáticos, uma vez que, eles devem possuir de forma obrigatória o anel aromático (núcleo de benzeno). Geralmente são extraídos do carvão mineral e de várias operações da indústria petroquímica (Cetesp, 2023). A estrutura do benzeno está representada na Figura 1 abaixo.

Figura 1: Estrutura molecular do benzeno

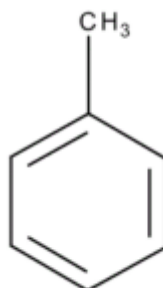
Fonte: Merck (2023).

Ao ser inalado ou ingerido o benzeno pode causar enjojo, cefaleia, irritação no estômago, irritação aos olhos, aceleração do ritmo cardíaco, tremor, vômito, sonolência e morte.

Deste modo, a remoção de benzeno de efluentes é de extrema importância devido à sua toxicidade e a sua relação com doenças como leucemia, hipoplasia medular, síndromes mielodisplásicas, entre vários outros (Cetesp, 2023).

2.3 O TOLUENO

O tolueno é um composto orgânico aromático, volátil, inflamável, de odor característico, incolor e causa danos à saúde se inalado ou ingerido. Além de ser usado como matéria-prima de tintas e cola, o tolueno também está presente na composição de alguns produtos químicos, como o poliuretano (Ecycle, 2023). Sua estrutura está representada na Figura 2 abaixo.

Figura 2: Estrutura molecular do tolueno

Fonte: Merck (2023).

A remoção de tolueno de efluentes tem importância devido aos seus danos à saúde, por causa da sua alta volatilidade, causando sérios problemas no sistema respiratório se inalado, uma vez que, ele passa a ser conduzido rapidamente para os pulmões e sendo levado para a corrente sanguínea (Ecycle, 2023).

Além disso, o tolueno pode alterar o sistema nervoso central, causando uma dependência, de forma semelhante ao álcool. E seus efeitos mais agudos acarreta desorientação, narcose e alucinações (Ecycle, 2023).

2.4 TÉCNICAS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES

No tratamento de efluentes (baseada em uma estação de tratamento de efluentes) existem os seguintes níveis: tratamento preliminar, primário, secundário e terciário. No tratamento preliminar ocorre os tratamentos físicos, de forma que os materiais em suspensão são removidos por unidades de gradeamento e desarenação, o que auxilia nas próximas técnicas de tratamento (Kurita, 2023).

No tratamento primário ocorre a remoção dos sólidos sedimentáveis, fazendo o uso de técnicas físico-químicas, como por exemplo, a flotação, sedimentação e precipitação química. Além disso, parte da matéria orgânica também é removida (Schorr, 2022). Enquanto no tratamento secundário ocorre a remoção de material biodegradável, usando técnicas de sistemas anaeróbicos (filtro anaeróbio, por exemplo), lodos ativados, disposição do solo (escoamento superficial e infiltração lenta, por exemplo), lagoa de estabilização e sistemas aeróbicos (filtros biológicos de baixa e alta carga, por exemplo) (Schorr, 2022).

E por último, o tratamento terciário, onde ocorre a remoção de nutrientes e microrganismos. As técnicas mais comuns de tratamento terciários são adsorção, desnitrificação, cloração, remoção do fósforo e radiação ultravioleta (Schorr, 2022).

A adsorção se sobressai das outras técnicas de tratamento de efluentes uma vez que ela tem a capacidade de remover compostos inorgânicos e orgânicos. Além

de que os materiais adsorventes podem ser reutilizados, o que torna a técnica mais econômicas do que as outras (Alphenz, 2023).

2.5 ADSORÇÃO

A adsorção é uma técnica antiga, utilizada para melhorar o sabor de um líquido ao tratá-lo com carvão vegetal. No século 15 foi descoberto que alguns materiais removiam a cor de soluções e, o carvão de osso, no século 18, foi utilizado de forma comercial para descolorir soluções com açúcar. No século 19 já se usava o carvão vegetal em respiradores nos hospitais para se ter a purificação do ar, onde a primeira operação aconteceu em 1920 (Brinques, 2005).

A adsorção estuda a capacidade de alguns sólidos de concentrar na sua superfície fluidos (líquidos ou gasosos), de forma que os componentes desses fluidos se separem (Nascimento *et al*, 2020).

O processo adsorptivo pode ser classificado em duas formas de acordo com a natureza das forças de ligação envolvidas: a adsorção física (fisissorção) e a adsorção química (quimissorção) (Moura, 2012).

A relação do adsorvato (componente de fase gasosa ou líquida que será retido na superfície do adsorvente) à superfície do adsorvente (componente sólido que retém em sua superfície o adsorvato), na adsorção física, ocorre por meio de uma interação relativamente fraca, que se relaciona com as forças Van der Waals, forças que são semelhantes à de coesão molecular. Enquanto a adsorção química, se dá por uma troca ou uma partilha de elétrons entre as moléculas do adsorvato e a superfície do adsorvente resultando em uma reação química. Logo, a ligação realizada na adsorção química é mais forte que a que a adsorção física (Nascimento *et al*, 2020).

Dentre as diferenças entra a adsorção física e química, se tem a especificidade do processo. A quimissorção é específica e nem todas as superfícies sólidas apresentam sítios ativos com o potencial de adsorver quimicamente o adsorvato; enquanto a adsorção física, ela é inespecífica. Outra diferença é que a adsorção física não é localizada, uma vez que, se dá em toda a superfície do adsorvente, já a adsorção química só acontece em sítios ativados, logo, localizada (Nascimento *et al*, 2020).

Os parâmetros que influenciam durante a adsorção estão relacionados a natureza do adsorvente/adsorvato e as condições de operação da adsorção. Em relação ao adsorvente geralmente é analisado a área superficial, densidade, hidrofobicidade, tamanho do poro, por exemplo. No adsorvato é analisado a polaridade, solubilidade, tamanho da molécula, se ele é ácido ou básico. Durante a execução da adsorção, os principais fatores que são levados em consideração são: temperatura, natureza do solvente e pH (Nascimento *et al*, 2020).

2.5.1 Cinética de Adsorção

Quando a adsorção ocorre em solução, é diminuída a concentração do adsorvato com o passar do tempo até a sua estabilização. Ao estabilizar, a quantidade do adsorvato adsorvida fica em equilíbrio dinâmico com o adsorvente, onde essa é a quantidade adsorvida do adsorvato. O tempo de equilíbrio é o tempo em que se dá a chegada a esse estágio, já a quantidade do analito que ficou retido conota o que o adsorvente tem de adsorver (q_{eq}), no equilíbrio, nas condições pré-estabelecidas de operação. A equação 1 mostra um balanço de massa, onde se pode calcular a massa de adsorbato retido, em mg, por unidade de massa de adsorvente, em g (Moura, 2012).

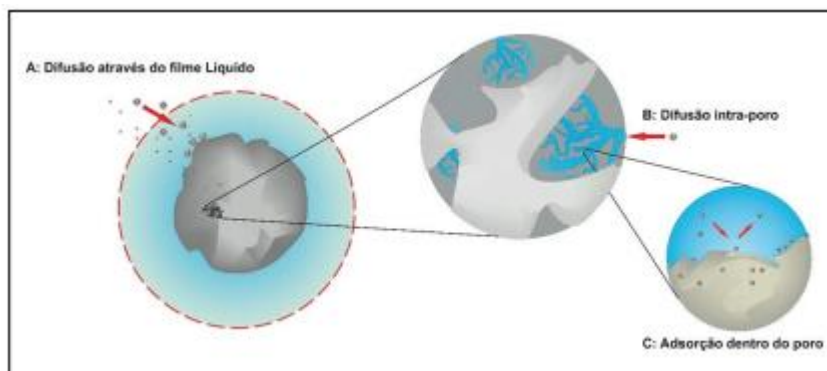
$$q_{eq} = \frac{(C_o - C_{eq})}{m_s} x V \quad \text{Equação 1}$$

O C_o é a concentração inicial do adsorvato, em mg/L, e C_{eq} é a concentração do adsorvato no equilíbrio, em mg/L. Já o m_s mostra a massa, em g, do adsorvente e V é o volume, em L, da solução a ser tratada (Moura, 2012).

Na adsorção líquido-sólido se dá a transferência do soluto, que está na solução, para o sítio de adsorção no adsorvente. O soluto passa através das seguintes fases sucessivas: a mobilidade pela solução, a difusão intercamada e por entre os poros das partículas adsorventes e a etapa de ligação do adsorvato ao sítio de adsorção disponível no adsorvente, o que é interessante para a definição do mecanismo de cinética de adsorção (Moura, 2012).

A cinética de adsorção é dada como a taxa de remoção do soluto que é adsorvido (adsorvato) relacionada ao tempo, e ela ocorre por meio de três etapas: transferência da massa exterior (migração de íons/moléculas da fase líquida para a superfície do adsorvente), difusão no poro (difusão das moléculas do líquido para entrar nos poros) e difusão na superfície (total difusão das moléculas adsorvidas na superfície do poro). Essas etapas são descritas na Figura 3.

Figura 3 – Etapas da cinética de adsorção



Fonte: Nascimento *et al* (2020).

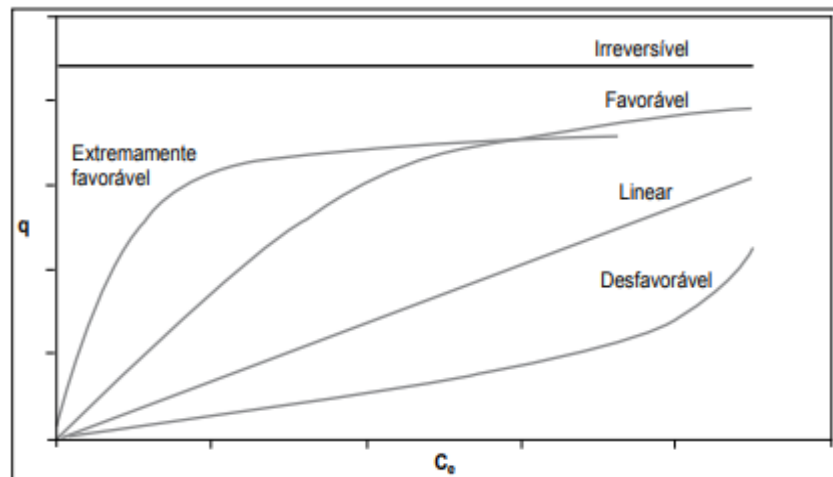
2.5.2 Equilíbrio de Adsorção

O equilíbrio de adsorção ocorre quando a quantidade determinada de um adsorvente entra em contato com o adsorvato (solute adsorvável), de forma que as moléculas/íons do adsorvato tenham tendência a migrar para a superfície do adsorvente até formar o equilíbrio. Com isso, a concentração do adsorvato na fase líquida se mantém constante. No equilíbrio é obtida a capacidade do adsorvente de adsorção, por meio da relação massa do adsorvente e concentração do adsorvato (Nascimento *et al.*, 2020).

Isoterma de adsorção é uma representação matemática que mostra quantitativamente a adsorção, mediante temperatura constante. Se tem vários modelos de isotermas, dentre eles temos o de Langmuir, Freundlich, Redlich-Peterson e Temkin (Moura, 2012, p). E por meio da análise dos estudos existentes com adsorção, se observou que os modelos tradicionais, Langmuir, Freundlich e Langmuir-Freundlich, são os mais empregados e adequados para os sistemas.

A Figura 4 abaixo mostra as possíveis formas que uma isoterma de adsorção pode ter. Quanto mais côncava a isoterma é, maior é a capacidade de adsorção do material (Nascimento *et al*, 2020).

Figura 4 – Formas de uma isoterma de adsorção.



Fonte: NASCIMENTO *et al* (2020).

A isoterma linear conota que a concentração do fluido é proporcional a quantidade de soluto. A isoterma desfavorável conota a menor capacidade de adsorção em baixas concentrações. A isoterma favorável indica a alta capacidade de adsorção a concentrações baixa. E por fim, a isoterma irreversível, mostra que a concentração do fluido independe da quantidade do soluto.

2.5.2.1 Isoterma de Langmuir

O modelo de Langmuir é o mais aplicado para se definir os parâmetros de adsorção. Com esse modelo o adsorvente tem uma quantidade limitada de sítios de adsorção na superfície, de mesma energia. A adsorção acontece somente nos sítios livres até que todos estejam ocupados; quando se alcança o equilíbrio não ocorre interação entre as moléculas adsorvidas e nem entre elas e o meio. O equilíbrio é alcançado quando a quantidade adsorvida atinge a estabilidade, independentemente da quantidade do adsorbato. A isoterma é representada na equação 2.

$$q_{eq} = \frac{q_{max} K_L C_{eq}}{1 + K_L C_{eq}}$$

Equação 2

Em que q_{eq} da equação mostra a quantidade de soluto adsorvido no equilíbrio por unidade de massa de adsorvente e o C_{eq} mostra a concentração no equilíbrio, em mg/L. O K_L se dá em L/mg e relaciona-se com as forças de interação adsorvente-adsorbato, e o q_{max} é expresso em mg/g e mostra a capacidade máxima de adsorção (Leandro-silva *et al*, 2020).

2.5.2.2 Isoterma de Langmuir-Freundlich

O modelo de Freundlich se dá na existência de uma estrutura em multicamadas não prevendo a saturação de superfície. O sólido é considerado heterogêneo, enquanto se utiliza uma distribuição exponencial com o intuito de caracterizar os diversos tipos de sítios adsorptivos que apresentam energias adsorptivas distintas. Essa técnica não apresenta linearidade quando está em baixas concentrações, mas se mantém côncava a baixa concentração (Almeida, 2010).

O Modelo Langmuir-Freundlich resultada da combinação dos modelos de Langmuir e Freundlich, mas tem um elevado grau de generalização. A isoterma está mostrada na equação 4.

$$q_{eq} = \frac{q_{max} K_{LF} C_{eq}^{\frac{1}{n}}}{1 + K_{LF} C_{eq}^{\frac{1}{n}}}$$

Equação 3

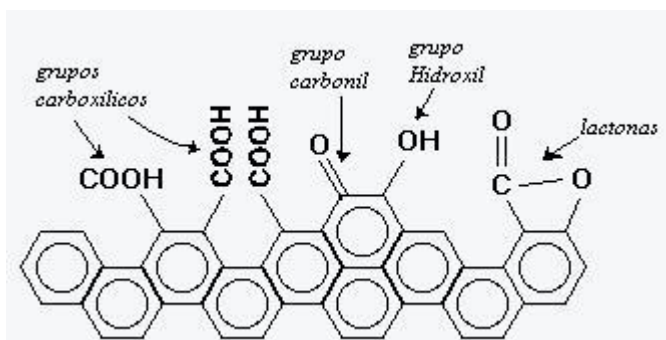
Em que q_{eq} da equação 4 mostra a quantidade de soluto adsorvido no equilíbrio por unidade de massa de adsorvente e o C_{eq} mostra a concentração no equilíbrio, em mg/L. O K_{LF} se dá em L/mg e relaciona-se com as forças de interação adsorvente-adsorbato, n está relacionado com a heterogeneidade do sólido e o q_{max} é expresso em mg/g e mostra a capacidade máxima de adsorção.

2.6. MATERIAIS ADSORVENTES

2.6.1 Carvão Ativado

O carvão ativado pode ser adquirido de uma diversidade de materiais carbonáceos (madeira, casca de coco, hulhas, açucares, entre outros) e sua estrutura é formada por camadas hexagonais de carbonos tetraédricos interligados pelos vértices, contendo também alguns elementos e grupos funcionais (carboxílicos, hidroxila, carbonila, entre outros) que tem notoriedade na reatividade e nas propriedades de adsorção do carvão. A Figura 5 mostra as representações dos possíveis grupos funcionais presentes no carvão ativado (UFSJ, 2023).

Figura 5 – Grupos funcionais no carvão ativado



Fonte: UFSJ (2023).

2.6.2 Materiais adsorventes provenientes de biomassa pirolisada

A pirólise se dá na decomposição dos componentes da matéria orgânica, em condições de sem oxigênio, que gera o bio-óleo, o biocarvão e gás de síntese (syngas). É conhecido como o principal método para geração de carvão (Tripathi; Sahu; Ganesan, 2016).

Com a superfície heterogênea, o biocarvão tem diferentes mecanismos de sorção, uma vez que nele se tem frações não carbonizadas e carbonizadas coexistindo. As três vias de sorção se dão dependendo das forças intermoleculares que há na interação da fase sorbato-imóvel (Masebinu *et al*, 2019).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 PRODUÇÃO DO CARVÃO PIROLISADO

O biocarvão foi obtido por meio da pirólise da madeira residual, de moveis antigos da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), em um gaseificador de biomassa de fluxo descendente, em ambiente com deficiência de oxigênio no Laboratório de Carvão Ativado (LCA) localizado na UFPB. Por fim, o material resultante foi macerado e peneirado com o auxílio de uma peneira de 100 Mesh, de forma que tivesse uma granulometria semelhante ao carvão comercial.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS ADSORVENTES

Os experimentos de adsorção foram realizados usando o biocarvão pirolisado e o carvão ativado comercial da marca SYNTH. Assim, esses adsorventes foram caracterizados utilizando as técnicas de microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de raios-X (DRX) e análises microporosimétricas com o intuito de observar as diferenças estruturais destes materiais. As caracterizações dos carvões utilizados estão presentes em Nascimento *et al.* (2022).

3.2.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi realizada para observar a estrutura superficial dos adsorventes. As imagens foram obtidas utilizando-se microscópio eletrônico de varredura da marca TESCAN, modelo VEGA 3, usando uma tensão de 5 kV com sinal de elétrons secundários em diferentes ampliações.

3.2.2 Difração de raio-X (DRX)

Os difratogramas de raio-X foram obtidos usando difratômetro de raios-X da marca BRUKER, modelo D8 ADVANCE, utilizando radiação Cu-K α com tensão de 30 kV, no intervalo de ângulo de Bragg (2θ) entre 5° e 80°, com passos de 0,02°.min⁻¹, onde serão avaliadas as modificações na estrutura cristalina dos materiais.

3.2.3 Análise microporosimétrica

A área superficial foi determinada usando o método de multiponto BET – Brunauer, Emmett e Teller, enquanto o volume e o tamanho dos poros foram determinados pelo método BJH – Barret, Joyner e Hallendy usando com microporosímetro marca MICROMERITICS, modelo ASAP 2020, no Laboratório do Microrreatores Aplicados a Indústria Química

3.3 PREPARAÇÃO DAS SOLUÇÕES

Foram preparadas as seguintes soluções que:

- Solução de 100mg/L (50:50 de proporção de benzeno e tolueno) diluído em 1000 mL de água destilada (solução matriz 1)
- Solução de 100 mg/L de benzeno (P.A, Química Moderna) diluído em 1000 mL de água destilada (solução matriz 2)
- Solução de 100 mg/L de tolueno (P.A, Química Moderna) diluído em 1000 mL de água destilada (solução matriz 3)

3.3.1 Quantificação do Adsorvato

O benzeno e o tolueno foram quantificados por cromatografia líquida de alta eficiência empregando um cromatógrafo da marca Shimatzu equipado com coluna C-18 Phenomenex operando em fase reversa (5 μ m; 4,60 x 250 mm) e detector espectrofotométrico de ultra-violeta/visível (UV/Vis). Os experimentos foram realizados tendo como fase móvel a solução de metanol/água destilada (70:30) a com vazão de aproximadamente 1 mL/min. Desse modo, a identificação do benzeno e do tolueno foi realizada com base em seus comprimentos de onda característico de 254 nm e 254 nm, respectivamente. Os dados foram adquiridos por meio do software Peaksimple II da SRI Instruments.

3.4 ENSAIOS DE ADSORÇÃO

3.4.1 Experimentos de equilíbrio de adsorção

Os experimentos foram realizados adicionando 100mL de cada uma das soluções matrizes em frascos âmbar contendo diferentes massas de cada carvão (0,01; 0,02; 0,03; 0,04; 0,05; 0,06; 0,07; 0,08; 0,09 g). As soluções foram mantidas em agitação constante de 200 rpm em uma mesa agitadora do tipo *shaker* durante duas horas.

Findado o tempo, as amostras foram filtradas para separar o carvão da solução com o auxílio de papel de filtro (12,5 cm de diâmetro, classe A). Por fim, a quantidade de material adsorvido foi calculada usando a Equação 1. Para ajuste dos dados experimentais de equilíbrio obtidos foram utilizadas as isotermas de Langmuir (Equação 2) e Langmuir-Freundlich (Equação 3).

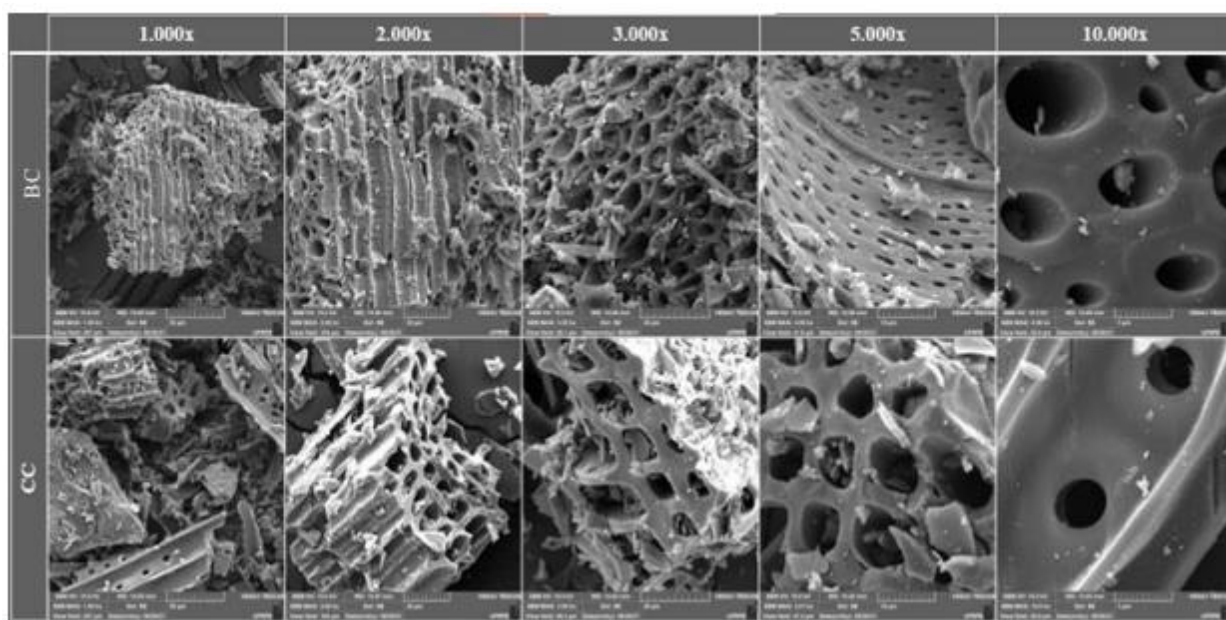
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS CARVÕES

4.1.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A Figura 6 mostra a microestrutura do Carvão Comercial (CC) e do biocarvão (BC) em variadas ampliações.

Figura 6 – Microestruturas do biocarvão e do carvão comercial ampliadas em 1000x 2000x 3000x 5000x e 10000x.



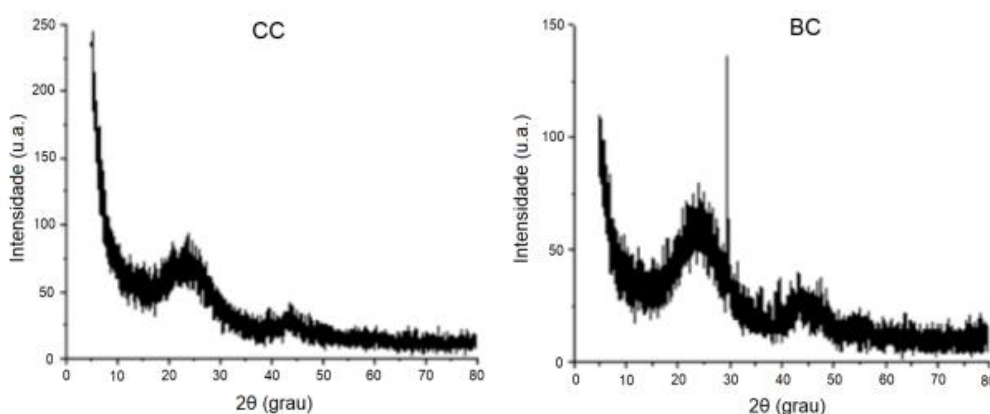
Fonte: Nascimento *et al.* (2022).

A partir das imagens foi observado que os carvões possuem predominância de mesoporos uniformes e o biocarvão possui distribuição variada deles, que pode ter se originado por causa da matéria-prima usada, a madeira. A estrutura mesoporosa é confirmada também pelas análises microporosimétricas.

4.1.2 Difração de raio-x (DRX)

A Figura 7 mostra os difratogramas de raio-X para o do carvão comercial (CC) e biocarvão (BC).

Figura 7 – Análise de difração de raio-x do carvão comercial (CC) e biocarvão (BC).



Fonte: Nascimento *et al.* (2022).

Com base na Figura 7, os adsorventes apresentaram um padrão típico de estruturas amorfas, pois não foi observado picos de difrações característicos de estruturas cristalinas. O difratograma CC apresentou uma estrutura predominante amorfo com ausência total de picos agudos, mas apresentou a formação de duas reflexões amplas com intensidade em torno de 20° e 40° que correspondem aos índices de miller de (002) e (100) da estrutura do grafite característico de materiais grafíticos (SOUZA *et al.*, 2018). Essas reflexões também foram observadas no difratograma de BC, no entanto, foi observado um pico em $2\theta = 26^\circ$ que pode estar relacionado a presença de calcita na amostra. Resultados semelhantes foram observados por Nascimento *et al.* (2020) ao utilizar biocarvão obtido a partir da gaseificação de lascas de madeira.

4.1.3 Análise microporosimétrica

A área superficial, o volume e o diâmetro dos poros foram determinados pelo método BET e BJH, onde os dados são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Áreas superficiais dos carvões, volume e diâmetro dos poros.

Carvão	Área superficial (m²/g)	Volume dos poros (cm³/g)	Diâmetro dos poros (Å)
Biocarvão	426,2	0,072	35,9
Carvão comercial	549,1	0,105	39,5

Fonte: Nascimento *et al.* (2022).

De acordo com a Tabela 1, foi observado que o carvão comercial possui área superficial (549,1 m².g⁻¹) e volume de poros (0,105 cm³.g⁻¹) maiores quando comparados ao biocarvão (426,2 m².g⁻¹ e 0,072 cm³.g⁻¹, respectivamente). Essa diferença já era esperada, pois o carvão comercial sofre ativação, que remove impurezas presente em sua estrutura provocando a desobstrução dos poros, o que não ocorre com o biocarvão.

Ao observar os resultados do diâmetro de poros para dos dois adsorventes (35,9 Å para o biocarvão e 39,5 Å para o carvão comercial) pode se concluir que os materiais apresentam estrutura mesoporosa, pois, conforme a literatura esses materiais possuem diâmetro médio de poros entre 2nm e 50 nm (THOMMES *et al.*, 2015).

4.2 ENSAIOS DE ADSORÇÃO

4.2.1 Equilíbrio de adsorção monocomponente

Os resultados obtidos para os experimentos monocomponentes referentes ao estudo de equilíbrio de adsorção para o tolueno e benzeno variando as massas dos carvões estão expostos na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados do estudo de equilíbrio para tolueno e benzeno em um sistema monocomponente

m (g)	q_{eq} Tolueno (mg/g)		q_{eq} Benzeno (mg/g)	
	CC	BC	CC	BC
0,08	120,20	58,98	118,10	48,35
0,07	130,20	62,97	126,50	51,97
0,06	145,70	69,33	139,20	56,10
0,05	156,30	75,85	156,70	61,46
0,04	172,40	82,44	170,50	63,58
0,03	199,00	86,74	202,50	69,02
0,02	239,20	104,66	235,30	69,06
0,01	256,40	110,21	241,30	70,43

CC – Carvão Comercial e BC- Biocarvão

Fonte: A autora (2023).

Com base nos dados da Tabela 2, pode-se observar que para ambos os contaminantes a medida em que se diminui a massa dos carvões nas amostras ocorre um aumento da capacidade de adsorção q_{eq} . Esse efeito já era esperando, pois conforme a Equação 1, a adsorção de tolueno e benzeno por unidade de massa é inversamente proporcional à massa de adsorvente, assim, quando este está em excesso suas partículas tendem a se empilharem, reduzindo os locais ativos para a adsorção (NASCIMENTO *et al.*, 2020).

Ademais, ainda conforme a Tabela 2, a capacidade de adsorção (q_{eq}) para cada massa de carvão foi maior para o carvão comercial do que para o pirolisado, logo, o carvão CC foi mais eficiente em remover o tolueno e o benzeno em um sistema monocomponente. Isso provavelmente deve ocorrer por causa de sua maior

área superficial, uma vez que a intensidade da adsorção tem proporcionalidade direta com a área superficial.

4.2.2 Equilíbrio de adsorção bicomponente

Os resultados obtidos para os experimentos bicomponentes para o estudo de equilíbrio de adsorção de tolueno e benzeno variando as massas dos carvões estão expostos na Tabela 3.

Tabela 3 – Dados do estudo de equilíbrio para tolueno e benzeno em sistema bicomponente

m (g)	q_{eq} Tolueno (mg/g)		q_{eq} Benzeno (mg/g)	
	CC	BC	CC	BC
0,08	45,40	52,40	20,00	18,30
0,07	50,10	57,40	21,50	19,80
0,06	53,00	63,20	22,50	20,90
0,05	56,10	70,20	25,30	23,00
0,04	65,40	73,50	29,50	25,80
0,03	75,90	80,90	33,10	29,50
0,02	90,20	85,30	43,00	33,40
0,01	93,80	86,40	46,50	34,40

CC – Carvão Comercial e BC- Biocarvão

Fonte: A autora (2023).

Com os dados da Tabela 3, pode-se observar que a medida em que se diminui a massa dos carvões nas amostras ocorre um aumento da capacidade de adsorção q_{eq} .

Como a capacidade de adsorção q_{eq} para cada massa de carvão foi maior para o carvão comercial do que para o biocarvão, logo, o carvão CC foi mais eficiente em remover o benzeno em um sistema bicomponente.

Em um sistema de bicomponente, o carvão BC teve uma maior eficiência de remoção de tolueno do sistema nos pontos em que a massa do carvão era maior (as amostras que tinham entre 0,08g à 0,03g de carvão pirolisado). Já nos pontos em que se teve as duas menores massas de carvão, o carvão comercial teve uma melhor eficácia de remoção do tolueno no sistema bicomponente). E isso se deu pois quando se tinha uma maior massa e conseqüentemente menor concentração da solução de benzeno e tolueno, a preferência de adsorção do carvão foi para o tolueno, logo, se fez o uso da ferramenta da seletividade de um sistema multielementar (Nascimento *et al.*, 2020).

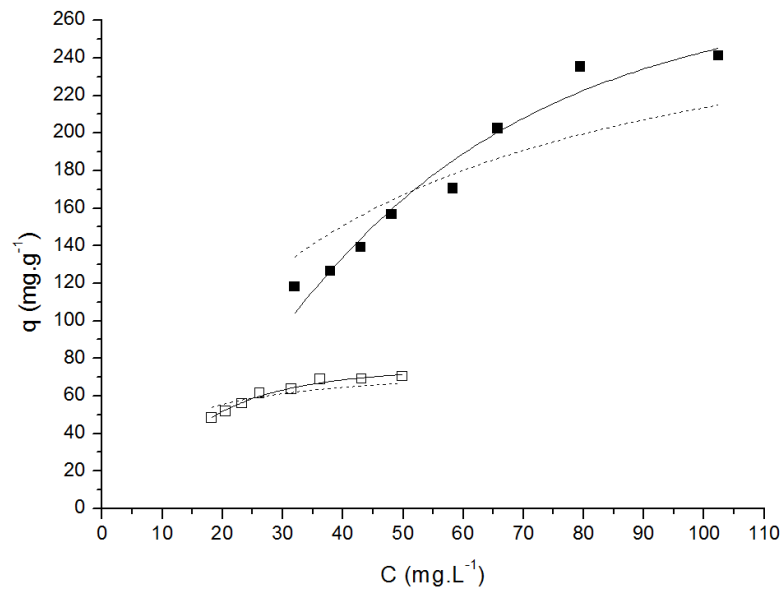
Comparando os dados de estudo de equilíbrio de sistema monocomponente e bicomponente, nota-se que a capacidade de adsorção foi maior para o sistema monocomponente tanto para o carvão comercial quanto para o biocarvão. Isso pode ter acontecido por causa que foi mantida a mesma concentração do benzeno e tolueno nos dois sistemas e no sistema bicomponente, o benzeno e tolueno competiam pelos sítios ativos de adsorção.

Vale ressaltar também, mais explicitamente no sistema bicomponente, que como as capacidades de adsorção eram maiores para o tolueno, o tolueno tinha mais afinidade com os adsorventes do que o benzeno.

4.2.3 Isoterma de adsorção

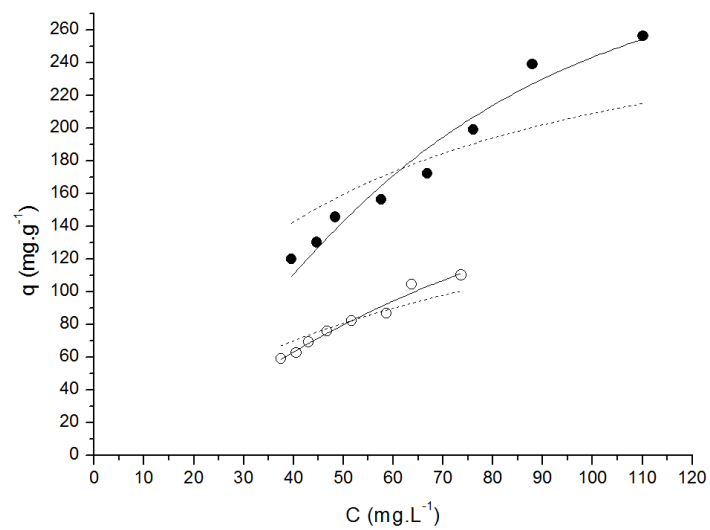
As isotermas de Langmuir e Langmuir-Freundlich em suas formas não lineares foram aplicadas aos dados de equilíbrio obtidos na Tabela 2 e são mostradas nas Figuras 8 e 9. A isoterma de Freundlich não foi aplicada, uma vez que a isoterma de Langmuir-Freundlich, neste trabalho, já contemplava a mesma.

Figura 8 – Representação das curvas de equilíbrio do benzeno em um sistema monocomponente para o carvão comercial (■) e o carvão pirolisado (□).



Fonte: A autora (2023).

Figura 9 – Representação das curvas de equilíbrio do tolueno em um sistema monocomponente para o carvão comercial (●) e o carvão pirolisado (○).



Fonte: A autora (2023).

Com base nas Figuras 8 e 9, é possível afirmar que as isotermas mostradas para o carvão comercial são mais favoráveis a adsorção do que as do biocarvão, o que é comprovado pela elevada capacidade de adsorção. Os valores da capacidade máxima de adsorção, coeficientes de correlação e demais constantes obtidas para os modelos são mostrados nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 – Parâmetros adsorptivos do tolueno nos modelos de equilíbrio (27°C)

Modelos	Parâmetros	CC	BC
Langmuir	$q_{\text{máx}}$ (mg. g ⁻¹)	306,38 ± 15,25	113,65 ± 6,58
	K_L (L.g ⁻¹)	0,023 ± 0,003	0,052 ± 0,012
	R^2	0,74	0,47
Langmuir-Freundlich	$q_{\text{máx}}$ (mg.g ⁻¹)	315,93 ± 27,19	168,55 ± 33,57
	K_{LF} (L.g ⁻¹)	(5,27 ± 0,54) 10 ⁻⁴	(1,27 ± 0,25) 10 ⁻³
	1/n	1,86	1,58
	R^2	0,96	0,97

CC – Carvão Comercial e BC- Biocarvão

Por meio dos dados contidos na Tabela 4 é possível notar que para o tolueno o modelo que mais se adequa aos dados experimentais é o modelo de Langmuir-Freundlich, pois o seu R^2 é mais próximo de 1, o que conota a baixa dispersão dos resultados, e as capacidades máximas de adsorção são maiores do que as do modelo de Langmuir.

Com a isoterma de Langmuir-Freundlich, quando o adsorvado se encontra em baixas concentrações o modelo é reduzido a isoterma de Freundlich (n tende a 1), enquanto com altas concentrações, ao modelo de Langmuir (n tende a 0). Além disso, o valor de n está entre 0 e 1, o que conota a superfície heterogênea dos carvões e adsorção favorável (Nascimento *et al.*, 2020). Os ajustes ocorreram de forma semelhantes aos carvões no modelo de Langmuir-Freundlich.

Tabela 5 – Parâmetros adsortivos do benzeno nos modelos de equilíbrio (27°C)

Modelos	Parâmetros	CC	BC
Langmuir	$q_{\text{máx}}$ (mg.g ⁻¹)	302,27 ± 12,82	78,35 ± 1,77
	K_L (L.g ⁻¹)	0,026 ± 0,003	0,128 ± 0,014
	R^2	0,80	0,78
Langmuir-Freundlich	$q_{\text{máx}}$ (mg.g ⁻¹)	295,67 ± 19,31	77,24 ± 1,41
	K_{LF} (L.g ⁻¹)	(8,03 ± 0,81) 10 ⁻⁴	(5,76 ± 0,24) 10 ⁻³
	1/n	1,88	1,96
	R^2	0,95	0,98

CC – Carvão Comercial e BC- Biocarvão

Por meio dos dados contidos nas Tabela 5 é possível notar que para o benzeno o modelo que mais se adequa aos dados experimentais é o modelo de Langmuir-Freundlich, pois o seu R^2 é mais próximo de 1, o que conota a baixa dispersão dos resultados. Além disso, mesmo que no modelo de Langmuir as capacidades de adsorção sejam maiores do que as do modelo de Langmuir-Freundlich, o modelo de Langmuir não conota a natureza heterogênea dos carvões, logo não seria o melhor ajuste experimental.

O modelo de Langmuir-Freundlich reflete a natureza heterogênea dos adsorventes e adsorção favorável, pois o valor de n está entre 0 e 1. Os ajustes ocorreram de forma semelhantes aos carvões.

5. CONCLUSÃO

A caracterização do biocarvão e do carvão comercial foram realizadas com êxito. Com as técnicas de microscopia de varredura eletrônica (MEV), difração de raio-X (DRX) e análises microporosimétricas foi notado que os carvões tinham características de estrutura amorfa com predominância de mesoporos.

Os estudos de equilíbrio foram realizados com êxito e o melhor modelo que se adequou aos experimentos foi o modelo do Langmuir-Freundlich para o benzeno e para o tolueno. Os dados obtidos com os experimentos utilizando o carvão biocarvão se ajustaram melhor aos modelos de Langmuir-Freundlich. Comparando os dados de estudo de equilíbrio de sistema monocomponente e bicomponente, nota-se que a capacidade de adsorção foi maior para o sistema monocomponente tanto para o carvão comercial quanto para o biocarvão.

Mesmo com o carvão comercial se comportando melhor nas análises cinéticas e de equilíbrio, o biocarvão teve resultados satisfatórios, uma vez que, ele não foi ativado, o que demonstra potencial para o material ser usado de forma alternativa ao carvão mineral, como adsorvente.

REFERÊNCIAS

ACQUASOLUTION. **Conheça as Etapas do Processo de Tratamento de Efluentes**. Disponível em: <https://acquablog.acquasolution.com/etapas-do-processo-de-tratamento-de-efluentes/>. Acesso em 03 jul. 2023.

ADENIYI, A. G.; IGHALO, J. O. Biosorption of pollutants by plant leaves: an empirical review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 7, n. 3, p. 103100, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103100>. Acesso em 03 jul. 2023.

AGSOLVE. **O combustível que você não ver**. Disponível em: <https://www.agsolve.com.br/noticias/o-combustivel-que-voce-nao-ve-hidrocarboneto-na-agua-e-capaz-de-se-dissolver-em-milhoes-de-partes#:~:text=A%20contamina%C3%A7%C3%A3o%20das%20%C3%A1guas%20por,ind%C3%BAstrias%20e%20explora%C3%A7%C3%A3o%20de%20petr%C3%B3leo>. Acesso em 18 set. 2023.

AHMED, M. J.; HAMEED, B. H.; HUMMADI, E. H. Review on recent progress in chitosan/chitin-carbonaceous material composites for the adsorption of water pollutants. **Carbohydrate polymers**, v. 247, p. 116690, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116690>. Acesso em 03 jul. 2023.

ALMEIDA, Ione Lucenir Silva. **Avaliação da Capacidade de Adsorção da Torta de Moringa Oleifera para BTEX em Amostras Aquosas**. Uberlândia, 2010. 70 p. Dissertação. (Pós-graduação em Química) – Universidade Federal de Uberlândia.

ALPHENZ. **Tecnologias de Adsorção.** Disponível em: <https://www.alphenz.com.br/noticias/tipos-de-tecnologias-e-processos-de-adsorcao-para-tratamento-de-agua/>. Acesso em 18 set. 2023.

BEZERRA, J. K. de A.; NETO, E. L. de B.; NASCIMENTO, P. F. P. do; NUNES, A. de O.; SOUSA, M. A. dos S. B.; DUARTE, M. M. L. Remoção de benzeno e tolueno em solução aquosa por adsorção usando carvão ativado produzido a partir do lodo de esgoto. **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], v. 8, n. 6, p. 45297–45314, 2022. DOI: 10.34117/bjdv8n6-179. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/49189>. Acesso em: 03 jul. 2023.

BRINQUES, Graziela Brusch. **Adsorção de Tolueno de Solução Aquosa em Leito de Carvão Ativado em Planta Piloto.** Porto Alegre, 2005. 133 p. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

CAO, X., LU, Y., WANG, C., ZHANG, M., YUAN, J., ZHANG, A., SONG, S., BANINLA, Y., KHAN, K., WANG, Y. Hydrogeochemistry and quality of surface water and groundwater in the drinking water source area of na urbanizing region. **Ecotoxicology and Environmental Safety**. v. 186, p. 109628, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109628>. Acesso em: 03 jul. 2023.

CETESP. **Benzeno.** Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2021/05/Benzeno.pdf>. Acesso em: 18 set. 2023.

CRUZ, L. P. S.; ALVES, L. P.; SANTOS, A. V. S.; ESTEVES, M.B.; GOMES, I. V. S.; NUNES L. S. S. Assesment of BTEX concentrations in air ambiente of gas stations using passive sampling and health risks for workers. **Journal of Environmental Protection**, v. 8, p. 12-25, 2017. Disponivel: https://www.scirp.org/html/2-6703164_73364.htm. Acesso em: 03 jul. 2023.

CSA. **Conceitos Básicos em Cromatografia Líquida**. Disponível em: <https://csaeducacional.com.br/materias/conceitos-basicos-em-cromatografia-liquida-hplc>. Acesso em 02 de Set. 2023.

DEZOTTI, Márcia.; **Processos e técnicas para o controle ambiental de efluentes líquidos: Volume 5 da Série Escola Piloto de Engenharia Química**. Editora E-papers. 2008.

DUNCA, Andreea-Mihaela. Water pollution and water quality assessment of major transboundary rivers from Banat (Romania). **Journal of Chemistry**. v. 2018, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2018/9073763>. Acesso em 03 jul. 2023.

ECYCLE. **Tolueno**. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/tolueno/>. Acesso em 03 jul. 2023.

GREENVIEW. **Tolueno**. Disponível em: <https://greenviewgv.com.br/tolueno/>. Acesso em 03 jul. 2023.

JIMENEZ, S.; MICO, M.M.; ARNALDOS, M.; MEDINA, F.; CONTRERAS, S. State of the art of produced water treatment. **Chemosphere**, v. 192, p. 186-208, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.139>. Acesso em: 03 set. 2023.

KHURSHID, H.; MUSTAFA, M. R. U.; RASHID, U.; ISA, M. H.; HO, Y. C.; SHAH, M. M. Adsorptive removal of COD from produced water using tea waste biochar. **Environmental Technology & Innovation**, v. 23, p. 101563, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101563>. Acesso em: 03 set. 2023.

KURITA. **Tratamento de Efluentes**. Disponível em: [https://kurita.com.br/artigos-tecnicos/tratamento-de-efluentes/#:~:text=O%20funcionamento%20de%20uma%20Esta%C3%A7%C3%A3o,terci%C3%A1rio%20\(polimento%20da%20%C3%A1gua\)](https://kurita.com.br/artigos-tecnicos/tratamento-de-efluentes/#:~:text=O%20funcionamento%20de%20uma%20Esta%C3%A7%C3%A3o,terci%C3%A1rio%20(polimento%20da%20%C3%A1gua)). Acesso em 18 set. 2023.

LEANDRO-SILVA, E.; PIPI, A. R. F.; MAGDALENA, A. G.; PIACENTI-SILVA, M. Aplicação dos modelos de Langmuir e Freundlich no estudo da casca de banana como bioadsorvente de cobre (II) em meio aquoso. **SciELO**. v. 25, p. e-12656, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200002.1056>. Acesso em: 03 jul. 2023.

MASEBINU, S. O.; AKINLABI, E. T.; MUZENDA, E.; ABOYADE, A. O. A review of biochar properties and their roles in mitigating challenges with anaerobic digestion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 103, p. 291-307, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.048>. Acesso em: 03 jul. 2023.

MERCK. **Tolueno**. Disponível em: https://www.merckmillipore.com/BR/pt/product/Toluene,MDA_CHEM-108327. Acesso em 03 set. 2023.

MERCK. **Benzeno**. Disponível em: https://www.merckmillipore.com/BR/pt/product/Benzene-D6,MDA_CHEM-101766. Acesso em 03 set. 2023.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Benzeno**. Disponível em: <https://www.gov.br/inca/pt-br/assuntos/causas-e-prevencao-do-cancer/exposicao-no-trabalho-e-no-ambiente/solventes/benzeno>. Acesso em 03 jul. 2023.

MOURA, Cícero Pessoa de. **Estudo de Remoção do Benzeno, Tolueno, p-Xileno e o-Xileno Dissolvidos em Água por Adsorção em Organosílica Periódica Mesoporosa (PMO)**. Fortaleza, 2012. 116 p. Tese. (Pós-graduação em Química) - Universidade Federal do Ceará.

NASCIMENTO, A. C. do; NASCIMENTO, B. F. do; Silva, M. P. da; SANTOS, R. S.; NEVES, T. P.; ARAÚJO, C. M. B. de; LUNA, F. E. T. de; SOBRINHO, M. A. M. Use of charcoal from gasification residues in adsorption pilot plant for the practical application of circular economy in industrial wastewater treatment. **Chemical Engineering Communications**, v. 209, n. 10, p. 1316-1333, 2022.

NASCIMENTO, R. F.; LIMA, A. C. A.; VIDAL, C. B.; MELO, D. Q.; RAULINO, G. S. C. **Adsorção - Aspectos teóricos e aplicações ambientais**. 2a ed. Fortaleza: Imprensa Universitária da Universidade Federal do Ceará, 2020. 309p.

NEFF, J.; LEE, K.; DEBLOIS, E. M. Produced water: overview of composition, fates, and effects. **Produced water: Environmental risks and advances in mitigation technologies**, p. 3-54, 2011. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4614-0046-2_1. Acesso em 03 jul. 2023.

SCHORR, Adriano Souza. **Tratamento de Águas e efluentes**. Freitas Bastos Editora, 2022. 210p.

SOUZA, T. N. V.; CARVALHO, S. M. L. de; VIEIRA, M. G. A.; SILVA, M. G. C. da; BRASIL, D. S. B. Adsorption of basic dyes onto activated carbon: experimental and theoretical investigation of chemical reactivity of basic dyes using DFT-based descriptions. **Applied Surface Science**, v. 448, p. 662-670, 2018.

THOMMES, M.; KANEKO, K.; NEIMARK, A. V.; OLIVIER, J. P.; RODRIGUEZ-REINOSO, F.; ROUQUEROL, J.; SING, K. S. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). **Pure and applied chemistry**, v. 87, n. 9-10, p. 1051-1069, 2015.

TRIPATHI, M.; SAHU, J. N.; GANESAN, P. Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 55, p. 467-481, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.122>. Acesso em: 03 jul. 2023.

UFSJ. **Carvão Ativo**. Disponível em: https://ufsj.edu.br/dcnat/carvao_ativo.php. Acesso em 25 Ago. 2023.

XIANG, W., ZHANG, X., CHEN, J., ZOU, W., HE, F., HU, X., TSANG, D.C.W., OK, Y.S., GAO, B. Biochar technology in wastewater treatment: A critical review. **Chemosphere**. v. 252, p. 126539, 2020. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126539>. Acesso em 03 jul. 2023.

YE, L.; ZHANG, J.; ZHAO, J.; LUO, Z.; TU, S.; YIN, Y. Properties of biochar obtained from pyrolysis of bamboo shoot shell. **Journal of analytical and applied pyrolysis**, v. 114, p. 172-178, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2015.05.016>. Acesso em: 03 jul. 2023.