



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

EDUARDO PEREIRA NEGRE

**APROVEITAMENTO DE ESCAMA DE PEIXE PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO
ATIVADO E SUAS APLICAÇÕES**

**PALMAS
2024**

EDUARDO PEREIRA NEGRE

**APROVEITAMENTO DE ESCAMA DE PEIXE PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO
ATIVADO E SUAS APLICAÇÕES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal do Tocantins, Campus Palmas, como exigência parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza

PALMAS

2024

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

N385a Negre, Eduardo Pereira
 Aproveitamento de escama de peixe para produção de carvão
 ativado e suas aplicações / Eduardo Pereira Negre. – PALMAS, TO,
 2024.
 40 p. : il. color.

 Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia
 Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
 Tocantins, Campus Palmas, PALMAS, TO, 2024.

 Orientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza

 1. Escama de peixe. 2. Pirólise. 3. Carvão ativado. I. Pedroza,
 Marcelo Mendes. II. Título.

CDD 624

FOLHA DE APROVAÇÃO

EDUARDO PEREIRA NEGRE

APROVEITAMENTO DE ESCAMA DE PEIXE PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO E SUAS APLICAÇÕES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal do Tocantins, Campus Palmas, como exigência parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 28/06/2024

BANCA AVALIADORA



Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza

Orientador

(IFTO)



Prof. Dra. Elaine da Cunha Silva Paz

(IFTO)



Eng. Me. Ranyere do Nascimento Lôbo

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me conceder força, sabedoria e saúde para concluir esta etapa tão importante da minha vida. Sua presença constante foi essencial para enfrentar os desafios e superar os obstáculos.

À minha família, expresso minha eterna gratidão pelo apoio incondicional e amoroso. Vocês foram meu porto seguro, oferecendo amor e encorajamento em todos os momentos, motivando-me a seguir em frente.

Aos meus amigos, agradeço pela compreensão, incentivo e palavras de motivação. Vocês tornaram este caminho mais leve e agradável com sua companhia e celebrando cada conquista ao meu lado.

Ao meu orientador, expresso minha profunda gratidão pela orientação, paciência e dedicação. Seus conselhos e ensinamentos foram cruciais para o desenvolvimento deste trabalho e para meu crescimento pessoal e acadêmico.

Por fim, agradeço a todos que colaboraram para este trabalho. Cada contribuição, direta ou indireta, foi indispensável para alcançar este objetivo, e sou extremamente grato por todo o apoio recebido.

RESUMO

A crescente preocupação com a qualidade da água é cada vez mais urgente, dada a crescente produção industrial e as atividades cotidianas que contribuem para sua contaminação. Isso acarreta sérias consequências para a saúde humana devido à transmissão de doenças por água poluída. Embora vários métodos tenham sido desenvolvidos para tratar a água contaminada, muitos enfrentam desafios como alto custo e baixa eficiência. Nesse cenário, a adsorção emerge como uma solução promissora, especialmente com o uso do carvão ativado. O estudo envolveu a coleta de escamas de peixe de supermercados locais, seguida por processos de lavagem e secagem. A caracterização da biomassa incluiu a análise imediata dos teores de umidade (6,5%), material volátil (42,1%), cinzas (40,2%) e carbono fixo (11,2%). Para a pirólise, um reator de leito fixo com vapor de água como gás de arraste foi utilizado, a temperatura foi mantida a 650 °C, com uma taxa de aquecimento de 30 °C por minuto e um tempo de reação de 30 minutos, apresentando rendimento médio de 32,71% de carvão. O carvão produzido foi caracterizado seguindo os métodos da biomassa onde foram obtidos os teores de umidade (3,1%), material volátil (19,2%), cinzas (51,3%) e carbono fixo (26,4%). O teste de adsorção foi conduzido utilizando o carvão ativado obtido e o corante Azul de Metileno, empregando o Delineamento de Faces Centradas para analisar os efeitos das variáveis independentes: massa de carvão e concentração da solução corante. O carvão ativado demonstrou eficiência consistente em todas as faixas de massa testadas, com maior capacidade de adsorção observada em concentrações mais elevadas de corante e menor quantidade de massa. O maior valor da razão de adsorção de 5,50 mg/g foi obtido no experimento 3, utilizando uma massa de carvão de 0,4 g e uma concentração de corante de 100 mg/L. Por outro lado, a menor razão de 0,56 mg/g foi observada no experimento 2, com uma massa de carvão de 1 g e uma concentração de corante de 20 mg/L. Dessa forma, analisando os resultados, indica-se que o carvão ativado produzido pela pirólise da escama de peixe é um material eficaz para adsorção.

Palavras-chave: Peixe. Escama de peixe. Pirólise. Carvão ativado. Adsorção.

ABSTRACT

PEREIRA NEGRE, Eduardo. **Aproveitamento de escama de peixe para produção de carvão ativado e suas aplicações**. 2024. 40 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2024.

The growing concern about water quality is increasingly urgent, given the growing industrial production and everyday activities that contribute to its contamination. This has serious consequences for human health due to the transmission of diseases through polluted water. Although several methods have been developed to treat contaminated water, many face challenges such as high cost and low efficiency. In this scenario, adsorption emerges as a promising solution, especially with the use of activated carbon. The study involved collecting fish scales from local supermarkets, followed by washing and drying processes. Biomass characterization included immediate analysis of moisture content (6.5%), volatile material (42.1%), ash (40.2%) and fixed carbon (11.2%). For pyrolysis, a fixed bed reactor with water vapor as carrier gas was used, the temperature was maintained at 650 °C, with a heating rate of 30 °C per minute and a reaction time of 30 minutes, presenting an average yield. 32.71% coal. The charcoal produced was characterized following biomass methods where moisture (3.1%), volatile material (19.2%), ash (51.3%) and fixed carbon (26.4%) were obtained. The adsorption test was conducted using the activated carbon obtained and the dye Methylene Blue, using Centered Face Design to analyze the effects of the independent variables: carbon mass and concentration of the dye solution. Activated carbon demonstrated consistent efficiency across all mass ranges tested, with greater adsorption capacity observed at higher dye concentrations and lower mass amounts. The highest adsorption ratio value of 5.50 mg/g was obtained in experiment 3, using a charcoal mass of 0.4 g and a dye concentration of 100 mg/L. On the other hand, the lowest ratio of 0.56 mg/g was observed in experiment 2, with a charcoal mass of 1 g and a dye concentration of 20 mg/L. Therefore, analyzing the results, it is indicated that the activated carbon produced by the pyrolysis of fish scales is an effective material for adsorption.

Keywords: Fish. Fish scale. Pyrolysis. Activated charcoal. Adsorption.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma dos procedimentos experimentais a serem conduzidos	18
Figura 2 - Escama de peixe coletada	19
Figura 3 - Biomassa antes da pirólise	22
Figura 4 - Autoclave vertical	22
Figura 5 - Equipamentos utilizados na pirólise	23
Figura 6 - Shaker TE 141 com amostras durante ensaio de adsorção.....	24
Figura 7 - Frascos prontos para o experimento.....	26
Figura 8 - Solução de concentração 60mg/L antes e após a adsorção	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variáveis independentes e níveis empregados	25
Tabela 2 - Experimentos propostos pela metodologia	26
Tabela 3 - Comparativo entre trabalhos de análise imediata	27
Tabela 4 - Rendimento do carvão ativado a 650 °C	28
Tabela 5 - Análise imediata do carvão da escama de peixe e comparação com outros estudos.....	29
Tabela 6 - Resultado do teste de adsorção em relação à massa de carvão e à concentração de corante	30
Tabela 7 - Coeficientes de regressão e valores estatísticos para determinação da razão de adsorção	31
Tabela 8 - Análise de variância para a razão de adsorção utilizando ANOVA.	33

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Influência das variáveis na razão de adsorção	32
Gráfico 2 - Predição do modelo da razão de adsorção	32
Gráfico 3 - Superfície da razão de adsorção em relação às variáveis	34
Gráfico 4 - Curvas de nível da razão de adsorção em relação às variáveis.....	34

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Problema de pesquisa.....	13
1.2	Justificativa.....	13
1.3	Objetivos	13
1.3.1	Objetivo Geral.....	13
1.3.2	Objetivos Específicos	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	Produção de peixe no Tocantins, Brasil e no mundo	14
2.2	Características da escama de peixe	15
2.3	Carvão ativado	15
2.4	Pirólise.....	16
2.5	Pesquisas sobre a pirólise de escama de peixe	17
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	18
3.1	Coleta da escama de peixe	19
3.2	Caracterização da biomassa	19
3.2.1	Umidade	19
3.2.2	Material Volátil	20
3.2.3	Cinzas.....	20
3.2.4	Carbono fixo	21
3.3	Pirólise da escama de peixe	21
3.4	Caracterização do carvão	23
3.4.1	Umidade	23
3.4.2	Material volátil.....	24
3.4.3	Cinzas.....	24
3.4.4	Carbono fixo	24
3.5	Ensaio de adsorção.....	24
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
4.1	Caracterização da biomassa	27
4.2	Rendimentos de carvão nos ensaios de pirólise.....	28
4.3	Caracterização do carvão	29

4.4	Teste de adsorção	29
4.4.1	Razão de adsorção (Y_1)	31
5	CONCLUSÃO.....	35
	REFERÊNCIAS.....	36

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a crescente produção industrial e as complexas atividades da vida cotidiana afetam seriamente a segurança da qualidade da água, resultando em uma série de problemas, como poluição microbiana e poluição por corantes (Yang *et al.*, 2023). A água contaminada se tornará um vetor para a transmissão de doenças, representando uma séria ameaça à saúde humana. (Rodwihok *et al.*, 2021).

Para purificar o ambiente aquático, diversos métodos, incluindo precipitação química, troca iônica, tratamento eletroquímico e de membrana, foram desenvolvidos e aplicados na eliminação de vários poluentes. No entanto, o alto custo de remoção, baixa eficiência e poluição secundária também têm preocupado a maioria dos pesquisadores. Nessa necessidade urgente, a adsorção tem sido amplamente utilizada para a remoção de uma variedade de poluentes orgânicos e inorgânicos (Xia *et al.*, 2022).

Considerando o custo de capital, praticidade e conservação ambiental, o carvão ativado tem recebido interesse particular e é produzido a partir de resíduos biológicos em condições anóxicas por meio de pirólise (Lehmann *et al.*, 2021).

As qualidades únicas do carvão ativado, que incluem uma grande área de superfície, alta porosidade, grupos funcionais, alta capacidade de troca de cátions e estabilidade, tornam-no adequado para uma ampla variedade de aplicações. A rápida e simples produção, a segurança ambiental, a reciclabilidade e a relação custo-eficácia são apenas alguns dos benefícios (Chen *et al.*, 2018; Thomas *et al.*, 2019).

Devido ao seu baixo custo e às suas características especiais, incluindo construção porosa, grande área de superfície específica e muitos grupos funcionais de superfície, o carvão ativado tem sido reconhecido como um material versátil adequado para aplicações energéticas e ambientais. As principais fontes incluem resíduos agrícolas e florestais, subprodutos e resíduos industriais, materiais de resíduos sólidos municipais e alguns materiais não convencionais, entre eles pneus, papel reciclado e ossos (Xia *et al.*, 2022).

Assim, escamas de peixe, uma espécie de resíduo alimentar, podem ser utilizadas para preparar carvão ativado, pois possuem uma estrutura tridimensional altamente ordenada e são compostas principalmente por fibras proteicas e hidroxiapatita (Ikoma *et al.*, 2003). O primeiro pode fornecer a fonte de carbono e o último pode servir como modelo natural para a formação de uma estrutura porosa

durante a pirólise. Além disso, o peixe é abundante na natureza (Dou *et al.*, 2022).

O objetivo deste estudo é realizar a pirólise da escama de peixe para produção de carvão ativado, destinado à aplicação como material adsorvente. Para alcançar esse propósito, os objetivos específicos incluem a caracterização da biomassa, a condução da pirólise em um reator de leito fixo, a avaliação das propriedades do carvão ativado obtido e a utilização desse material no processo de adsorção de corante químico.

1.1 Problema de pesquisa

Diante da crescente escassez de água potável e da preocupação com a quantidade significativa de resíduos gerados pela pesca e aquicultura, como as escamas de peixe frequentemente descartadas sem aproveitamento adequado, surge a necessidade de buscar soluções sustentáveis. Nesse contexto, considera-se a possibilidade de utilizar as escamas de peixe para a produção de carvão ativado, visando ao tratamento de águas contaminadas. Diante desse cenário, investigar a viabilidade de transformar esses resíduos em recursos úteis torna-se essencial.

Portanto, qual é a eficácia do carvão ativado derivado das escamas de peixe na remoção de poluentes da água?

1.2 Justificativa

Considerando os resíduos provenientes da indústria pesqueira, onde as escamas de peixe frequentemente são descartadas sem aproveitamento, torna-se crucial buscar maneiras de reutilizar esse material. Diante desse contexto, propõe-se investigar as características dos produtos resultantes da pirólise das escamas de peixe, com foco na produção de carvão ativado destinado ao tratamento de água.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Efetuar a pirólise da escama de peixe visando à produção de carvão ativado, com a finalidade de aplicá-lo como material adsorvente.

1.3.2 Objetivos Específicos

- I. Caracterizar a biomassa em análise;
- II. Realizar a pirólise da biomassa em reator de leito fixo;
- III. Avaliar as propriedades do carvão ativado produzido;
- IV. Empregar o carvão ativado no processo de adsorção de corante químico.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Produção de peixe no Tocantins, Brasil e no mundo

O Tocantins é um dos maiores produtores de formas jovens de tilápia, abastecendo São Paulo, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais e Goiás. A piscicultura no estado, autossuficiente em ração, teve um leve crescimento em 2023, totalizando 17.556 toneladas, um aumento de 1,16% em relação ao ano anterior, que registrou 17.350 toneladas. Em 2021, a produção foi de 16.250 toneladas. O estado manteve a 18ª posição no ranking de produção de peixes de cultivo do Brasil nos últimos três anos. Em 2023, foram capturadas 17.136 toneladas de espécies nativas e 420 toneladas de tilápia. As espécies nativas representaram 97,61% da produção total, enquanto a tilápia correspondeu a 2,39%. (Associação Brasileira da Piscicultura, 2024).

Em 2023, o Brasil produziu 887.029 toneladas de peixes de cultivo, um crescimento de 3,1% em relação ao ano anterior, conforme levantamento da Associação Brasileira da Piscicultura (Peixe BR). A tilápia representou 65,3% da produção total, com 579.080 toneladas. Os peixes nativos contribuíram com 263.479 toneladas, correspondendo a 29,7% do total, e outras espécies, como carpa, truta e pangasius, somaram 44.470 toneladas, equivalentes a 5%. Nos últimos 10 anos, a produção de peixes de cultivo aumentou de 578.800 para 887.029 toneladas, uma alta de 53,25%, com uma média de crescimento anual de 5,325% (Associação Brasileira da Piscicultura, 2024).

O volume da produção global de peixes atingiu 186,6 milhões de toneladas em 2023, um aumento em relação às 184,6 milhões de toneladas em 2022. O peixe é um dos alimentos mais consumidos no mundo e está se tornando cada vez mais popular

ao longo do tempo. O país que mais captura peixes é a China, seguida por Indonésia e Índia (Shahbandeh, 2024).

2.2 Características da escama de peixe

As escamas de peixe consistem em duas substâncias: orgânicas (proteínas) e inorgânicas (minerais). De acordo com pesquisas, a fração inorgânica remove contaminantes a uma taxa 75% maior do que a porção orgânica. Para determinar os componentes orgânicos e inorgânicos do adsorvente, os pesquisadores utilizam um procedimento de calcinação gravimétrica. A 600–700 °C, a fração orgânica evapora, enquanto a porção inorgânica permanece como resíduo. A principal utilização da escama de peixe é para a extração de hidroxiapatita, que pode ser utilizada para adsorção e é eficaz na adsorção de numerosos poluentes tóxicos, podendo ser empregada para a conservação ambiental (Gadore *et al.*, 2024; Verma *et al.*, 2023; Lu; Zhao, 2024).

As escamas de peixe possuem uma estrutura de duas camadas única de colágeno-hidroxiapatita e auto-biomassa rica em grupos ativos de N e P (Pati *et al.*, 2010). Beneficiando-se do alto rendimento, estrutura única e ricos grupos funcionais de sítios ativos, o fósforo de peixe é esperado para ser um precursor promissor para preparar carvão ativado. Além disso, vários resultados de pesquisa nos permitiram prever a preparação eficiente de carvão ativado, com escamas de peixe como precursor (Xia *et al.*, 2022).

As escamas de peixe são ricas em proteínas, cálcio, vitaminas, gorduras e minerais, e foram amplamente utilizadas na preparação de gelatina e suprimentos médicos. Aproveitar ao máximo as características físicas do carvão ativado de escamas de peixe e utilizar os resíduos de escamas de peixe é um tópico que as pessoas vêm discutindo há muito tempo (Zhang *et al.*, 2023).

2.3 Carvão ativado

As qualidades únicas do carvão ativado, que incluem uma grande área superficial, alta porosidade, grupos funcionais, alta capacidade de troca catiônica e estabilidade, são adequadas para uma ampla variedade de aplicações. A produção

rápida e simples, ambientalmente segura, reciclável e econômica do carvão são apenas alguns benefícios (Chen *et al.*, 2019; Thomas *et al.*, 2019).

Numerosas pesquisas demonstraram a eficácia do carvão ativado na remoção de vários poluentes. Os parâmetros de pirólise, como as condições de reação (temperatura, tempo de residência, taxa de aquecimento, pressão) e o tipo de matéria-prima, influenciam significativamente o rendimento e as propriedades do carvão ativado (Amalina *et al.*, 2022).

Sua estrutura básica e propriedades também variam de acordo com o tipo de reator utilizado no método de carbonização. A conversão termoquímica é uma técnica comum para a produção de carvão ativado. Recentemente, o carvão ativado, um produto da conversão termoquímica de biomassa, tem recebido considerável aplicação na remoção de diversos poluentes devido aos seus benefícios econômicos e de abundância (Tang *et al.*, 2019; Yu *et al.*, 2017; Xiu *et al.* 2017).

2.4 Pirólise

Pirólise, carbonização hidrotérmica (HTC), gaseificação, carbonização rápida e torrefação são processos termoquímicos comuns para produzir carvão ativado (Amalina *et al.*, 2022). Dentre as tecnologias utilizadas para aproveitamento de biomassas, a pirólise apresenta muitas vantagens comparadas às demais. Esse tipo de tratamento térmico tem como objetivo principal obter produtos com densidade energética mais alta e melhores propriedades do que àquelas da biomassa inicial (Pedroza *et al.*, 2011).

A pirólise é o processo mais utilizado para a produção de carvão ativado. Em condição deficiente em oxigênio, as moléculas orgânicas na biomassa degradam-se a uma temperatura específica. A eficiência térmica, o tempo de residência, o tipo de biomassa e o aquecimento afetam o produto da pirólise (Leng *et al.*, 2021; Sakhiya *et al.*, 2020). Os principais produtos obtidos durante a pirólise de biomassa são o bio-óleo (líquido), o carvão (sólido) e a fração gasosa. Devido a seus poderes energéticos, esses materiais obtidos possuem utilizações potenciais diversas (Pedroza *et al.*, 2011).

A temperatura é o principal fator que influencia as propriedades do carvão ativado, enquanto o carvão é composto completamente de carbono e cinzas. Assim, o papel e a eficácia do carvão ativado em muitas áreas dependem da biomassa

utilizada para produzi-lo. A caracterização do carvão é fundamental para determinar a análise elemental do material, grupos funcionais da superfície, estabilidade e estrutura (Amalina *et al.*, 2022).

2.5 Pesquisas sobre a pirólise de escama de peixe

Xie *et al.* (2023) avaliaram o potencial de uma tecnologia desenvolvida para a remoção eficiente e segura do diclofenaco sódico (DS) através da síntese de carvão ativado de escamas de peixe por meio da co-pirolise de escamas de peixe e ácido fosfórico (H_3PO_4). Esta abordagem resultou em um carvão com propriedades superiores de adsorção de DS, alcançando uma capacidade de adsorção significativamente alta, além de demonstrar eficácia em condições reais de água.

Xia *et al.* (2022) investigaram o efeito do preparo do carvão ativado a partir de escamas de peixe na extração eficiente de urânio ($U(VI)$) de águas residuais radioativas. O carvão demonstrou alta capacidade de adsorção do $U(VI)$, apresentando propriedades favoráveis para a captura eficiente do contaminante. Além disso, foram examinados os efeitos do pH e tempo de contato, destacando também a viabilidade a longo prazo do material para a dessorção e reutilização. A análise espectral caracterizou os grupos carboxila/amino como importantes na imobilização do $U(VI)$, contribuindo para uma compreensão mais profunda dos mecanismos de adsorção.

Achieng *et al.* (2019) avaliou o potencial do carvão ativado de escamas de peixe Tilápia (*Oreochromis niloticus*) como adsorvente na remoção do corante índigo carmim (ICD) de soluções aquosas. Sendo sintetizados por pirólise em uma faixa de temperatura específica e caracterizados quanto a diversas propriedades, como carga superficial, grupos funcionais, estabilidade térmica, tamanho de partículas, composição elemental, entre outras. Experimentos em batelada foram conduzidos para investigar a influência de vários parâmetros no processo de adsorção do corante. Os resultados indicaram alta eficácia na remoção do ICD, com análise adicional dos parâmetros cinéticos e termodinâmicos do processo.

Kumari *et al.* (2024) avaliou o potencial de remoção de fluoreto da água subterrânea utilizando carvão ativado de escamas de peixe. Foram investigados os efeitos de diferentes parâmetros e características na eficiência de remoção de fluoreto, incluindo pH, dose de adsorvente e concentração inicial de fluoreto. Os

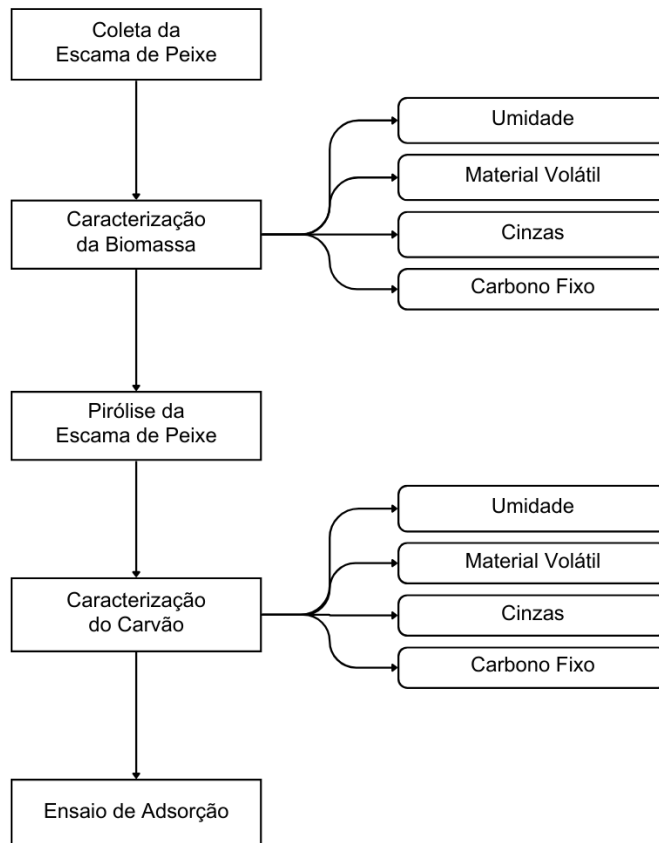
estudos de adsorção em batelada e cinética foram realizados para analisar esses efeitos. Os resultados indicaram uma alta capacidade de adsorção de fluoreto, sugerindo sua promissora aplicação na remoção desse contaminante da água subterrânea.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

No Campus Palmas, do Instituto Federal do Tocantins (IFTO), os ensaios foram executados no Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética (LARSEN). As análises neste estudo foram realizadas conforme mostrado na Figura 1.

Os procedimentos experimentais foram executados conforme as normas e práticas reconhecidas, como aquelas definidas pela Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM).

Figura 1 - Fluxograma dos procedimentos experimentais a serem conduzidos



Fonte: Autor (2024).

3.1 Coleta da escama de peixe

O material coletado foi obtido nos supermercados Gigante e Super Big, ambos localizados em Taquaralto, Palmas, Tocantins, como resultado do descarte durante o processo de limpeza de peixes, onde as escamas de peixe (Figura 2) foram lavadas com água para remover toda a sujeira, e deixadas para secar ao ar em temperatura ambiente por 2 dias.

Figura 2 - Escama de peixe coletada



Fonte: Autor (2024).

3.2 Caracterização da biomassa

A caracterização da amostra envolveu testes para medir os teores de umidade, material volátil, cinzas e carbono fixo. Todos os ensaios foram realizados em triplicata.

3.2.1 Umidade

A determinação do teor de umidade seguiu a norma ASTM D3173-87 e foi calculada conforme a Equação 1. Foi pesada uma massa aproximada de 1g da amostra, a qual foi adicionada a um cadinho de porcelana com peso constante previamente determinado. Em seguida, a amostra foi aquecida em uma estufa à temperatura de 105 °C por um período de 1 hora. Posteriormente, o cadinho foi colocado em um dessecador por 15 minutos e, após esse intervalo, foi pesado.

$$Umididade (\%) = \frac{(a-b)}{(c)} * 100 \quad (\text{Equação 1})$$

a = peso próprio do cadinho + peso da amostra (em gramas);

b = peso próprio do cadinho + peso da amostra pós aquecimento na estufa (em gramas);

c = peso da amostra inicial (em gramas).

3.2.2 Material Volátil

O teor de material volátil foi determinado conforme a Equação 2, de acordo com o método sugerido por Sánchez *et al.* (2009). Para isso, foi pesada cerca de 1g da amostra em um cadinho de porcelana com peso constante previamente determinado. A amostra foi então aquecida em um forno mufla a 850° C por 7 minutos, e seu peso foi medido após esse processo.

$$Material\ Volátil (\%) = \left(\frac{a-b}{c} \right) * 100 \quad (\text{Equação 2})$$

a = peso próprio do cadinho + peso da amostra inicial (em gramas);

b = peso próprio do cadinho + peso da amostra pós aquecimento no forno (em gramas);

c = peso da amostra inicial (em gramas).

3.2.3 Cinzas

O teor de cinzas foi determinado de acordo com a norma ASTM D3174-04, e o resultado obtido utilizando a Equação 3. O cálculo do teor de cinzas seguiu o método proposto por Sánchez *et al.* (2009), no qual uma massa aproximada de 1g da amostra foi adicionada a cadinhos de porcelana com peso constante previamente determinado. As amostras foram submetidas à calcinação a uma temperatura de 710 °C por 1 hora em um forno mufla.

$$Cinzas (\%) = \frac{(a-b)}{(c)} * 100 \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

a = peso próprio do cadinho + peso da amostra pós aquecimento em forno mufla (em gramas);

b = peso próprio do cadinho (em gramas);

c = peso da amostra inicial (em gramas).

3.2.4 Carbono Fixo

O teor de carbono fixo foi determinado por diferença, utilizando os resultados dos outros ensaios descritos anteriormente, conforme especificado na Equação 4.

$$\text{Carbono Fixo (\%)} = 100 - [\text{Umidade(\%)} - \text{Cinzas(\%)} - \text{Material Volátil(\%)}]$$

(Equação 4)

3.3 Pirólise da escama de peixe

Neste estudo foram realizados três ensaios de pirólise. Durante cada ensaio, a temperatura foi mantida a 650 °C, com uma taxa de aquecimento de 30 °C por minuto e um tempo de reação de 30 minutos. A biomassa, após passar por processos de lavagem e secagem, foi colocada em uma barca metálica e pesada em uma balança analítica (Figura 3) para aferir a massa da biomassa antes e após a pirólise, visando analisar o rendimento de cada ensaio.

Figura 3 - Biomassa antes da pirólise



Fonte: Autor (2024).

Para a realização da conversão térmica da biomassa, foi utilizado reator de leito fixo tubular de aço, construído em quartzo. O reator possui dimensões de 100 cm de comprimento e 10 cm de diâmetro externo. O aquecimento do reator é realizado por meio de um forno bipartido reclinável, e o sistema operou em regime de batelada, utilizando vapor de água como gás de arraste, proveniente de uma autoclave vertical (Figura 4).

Figura 4 - Autoclave vertical



Fonte: Autor (2024).

O tubo de aço funciona como compartimento para a biomassa, por onde o vapor de água percorre, transportando os produtos gasosos gerados durante a pirólise para fora do leito. Na extremidade de saída do reator, existe um sistema de condensação para converter parte dos vapores em líquidos. O esquema do reator de pirólise utilizado nos ensaios está representado na Figura 5.

Figura 5 - Equipamentos utilizados na pirólise



Fonte: Autor (2024).

3.4 Caracterização do carvão

Este procedimento de caracterização do carvão ativado seguiu a abordagem semelhante à utilizada para a caracterização da biomassa. Os métodos adotados foram os seguintes.

3.4.1 Umidade

O teor de umidade do carvão foi determinado conforme especificado na norma ASTM D3173-87, conforme aplicado previamente para a caracterização da biomassa.

3.4.2 Material volátil

A determinação do teor de material volátil foi realizada de acordo com as instruções da norma ASTM D3175-07.

3.4.3 Cinzas

O teor de cinzas do carvão foi obtido seguindo as orientações da norma ASTM D3174-04.

3.4.4 Carbono fixo

A determinação do teor de carbono fixo foi conduzida conforme descrito no item 3.2.4.

3.5 Ensaio de adsorção

Para o ensaio de adsorção adotou-se a mesa agitadora Shaker TE 141 (Figura 6) com finalidade de promover a adsorção do corante nos poros do carvão ativado de escamas de peixe produzido na temperatura de 650°C e taxa de aquecimento de 30°C por minuto. A agitação da mesa estava sendo mantida a uma velocidade constante de 70 RPM (rotações por minuto), enquanto o tempo de adsorção foi padronizado em 30 minutos.

Figura 6 - Shaker TE 141 com amostras durante ensaio de adsorção



Fonte: Autor (2024).

Para avaliar sua capacidade adsorvente, foi utilizado a solução de corante Azul de Metileno em algumas concentrações diferentes, com um volume fixo de 30 mL, em combinação com diferentes quantidades de carvão ativado. As amostras foram filtradas em papel filtro qualitativo e a concentração de Azul de Metileno resultante determinada em um espectrofotômetro, a 660 nm.

O estudo foi realizado com o auxílio do software "Protimiza Experimental Design" utilizando o delineamento experimental do tipo Delineamento de Faces Centradas (DFC) tem como intuito analisar os efeitos de duas variáveis independentes, massa de carvão e a concentração da solução corante, sobre as variáveis dependentes. Para a análise dos dados, foi adotada a ferramenta estatística "Protimiza Experimental Design", a nível acadêmico, por favorecer a confiabilidade na interpretação e discussão dos resultados.

Neste método, os fatores são codificados em três níveis: (-1), (0) e (+1). Esses códigos correspondem aos níveis mínimo, médio e máximo, respectivamente, conforme indicado na Tabela 1.

Tabela 1 - Variáveis independentes e níveis empregados

Fatores	Unidade	Níveis		
		-1	0	1
Massa do Carvão (X1)	g	0,4	0,7	1
Concentração do Corante (X2)	mg/L	20	60	100

Fonte: Autor (2024).

O número de experimentos necessários para a análise foi determinado pelo programa, estabelecendo o número de repetições genuínas igual 1 e o número de pontos centrais como 3, totalizando 11 experimentos, isso inclui todas as combinações possíveis de níveis, adicionalmente aos três pontos centrais. Dessa forma, os frascos de Erlenmeyer foram numerados e preenchidos conforme mostrado na Figura 7, seguindo as indicações da Tabela 2.

Figura 7 - Frascos prontos para o experimento



Fonte: Autor (2024).

Tabela 2 - Experimentos propostos pela metodologia

Experimentos	Níveis decodificados		Níveis codificados	
	Massa de carvão (g)	Concentração do corante (mg/L)	X ₁	X ₂
1	0,4	20	-1	-1
2	1	20	1	-1
3	0,4	100	-1	1
4	1	100	1	1
5	0,4	60	-1	0
6	1	60	1	0
7	0,7	20	0	-1
8	0,7	100	0	1
9	0,7	60	0	0
10	0,7	60	0	0
11	0,7	60	0	0

Fonte: Autor (2024).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização da biomassa

A Tabela 3 apresenta os resultados da análise imediata da amostra estudada, incluindo umidade, material volátil, cinzas e carbono fixo. Além disso, os resultados deste estudo são comparados com pesquisas semelhantes da literatura, com o objetivo de confirmar a confiabilidade dos dados.

Tabela 3 - Comparativo entre trabalhos de análise imediata

Variável analítica	Biomassa	Outros autores		
	desta pesquisa	Silva (2019)	Monroe <i>et al.</i> (2024)	Perondi <i>et al.</i> (2018)
Umidade (%)	6,5	11,3	3,8	-
Material volátil (%)	42,1	35,2	67,0	47,63
Cinzas (%)	40,2	45,9	26,0	40,56
Carbono fixo (%)	11,2	7,6	7,0	-

Fonte: Autor (2024).

Verifica-se que os resultados deste estudo, que mostram um alto teor de voláteis (42,1%) e cinzas (40,2%), além de baixos teores de umidade (6,5%) e carbono fixo (11,2%). Quando comparados, esses resultados estão dentro da faixa relatada na literatura para escamas de peixe por Silva (2019), Monroe *et al.* (2024) e Perondi *et al.* (2018), demonstrando similaridade com os dados reportados.

Segundo Melo (2017), o elevado teor de cinzas encontrado nas escamas é atribuído às frações minerais da fase inorgânica, cujo estão relacionadas a presença de hidroxiapatita, que se encontra estruturalmente unida ao colágeno.

De acordo com Almeida (2008), o teor de umidade deve ser inferior a 10% para uma degradação termoquímica eficaz no processo de pirólise. Portanto, os resultados obtidos são satisfatórios, pois a biomassa apresentou características recomendadas pela literatura.

4.2 Rendimentos de carvão nos ensaios de pirólise

O peso do carvão produzido após os ensaios de pirólise foi determinado pela diferença entre os pesos de entrada e saída do reator. O rendimento foi analisado conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Rendimento do carvão ativado a 650 °C

Descrição	Pirólise		
	1	2	3
Peso barca (g)	166,32	166,41	162,63
Peso barca + escama (g)	180,32	185,74	178,59
Peso escama (g)	14,00	19,33	15,96
Peso da barca + carvão (g)	171,23	172,51	167,66
Peso carvão (g)	4,91	6,1	5,03
Rendimento (%)	35,07	31,56	31,52

Fonte: Autor (2024).

O rendimento do carvão ativado a partir da escama de peixe, obtido a uma temperatura de 650 °C e taxa de aquecimento de 30 °C/min, foi determinado pela média dos valores obtidos em três ensaios de pirólise, resultando em 32,71%.

Segundo Machado (2019), a Estação de Tratamento de Água (ETA 006), operada pela BRK Ambiental em Palmas, utiliza carvão ativado para remover cianobactérias durante os meses secos de julho a outubro. Em 2018, a quantidade total de carvão ativado utilizada foi de 10.575 kg, com os seguintes valores mensais: 3025 kg em julho, 1300 kg em agosto, 1550 kg em setembro e 4700 kg em outubro. O custo do carvão ativado foi de R\$ 3,89 por kg, totalizando um gasto de R\$ 41.737,75.

Dessa forma, com base no rendimento médio observado e na umidade da análise imediata da biomassa, uma tonelada de escamas de peixe em base úmida produziria 935 kg de biomassa em base seca, e a partir dessa biomassa seca, seria possível obter cerca de 305,84 kg de carvão ativado por meio do processo de pirólise nas condições apresentadas neste estudo. Considerando o preço de R\$ 3,89 por kg de carvão ativado, 305,84 kg equivaleriam a R\$ 1.189,76.

4.3 Caracterização do carvão

Na Tabela 5, estão os resultados da análise imediata do carvão obtido da escama de peixe a 650°C, comparados com os carvões produzidos por pirólise em outros estudos. Paz (2017) analisou carvão de fibra de coco a 550°C, enquanto Lobô (2021) investigou carvão derivado de podas de árvores (*Syzygium cumini*) a 650°C. Essa comparação visa identificar semelhanças e eventuais diferenças nos resultados obtidos.

Tabela 5 - Análise imediata do carvão da escama de peixe e comparação com outros estudos

Variável analítica	Carvão (650 °C)	Outros autores	
		Paz (2017)	Lobô (2021)
Umidade (%)	3,1	5,8	7,7
Material volátil (%)	19,2	43,8	25,0
Cinzas (%)	51,3	7,2	2,5
Carbono fixo (%)	26,4	43,2	64,8

Fonte: Autor (2024).

O teor de cinzas de 51,3% encontrado neste estudo é superior aos valores relatados para outros tipos de biomassa disponíveis na literatura. Segundo Raveendran et al. (1995), essa composição pode ser atribuída à presença de um elevado teor de silício ou outros componentes inorgânicos, como metais alcalinos e alcalino-terrosos, que podem resultar em valores acima de 25%.

Sabe-se que para um processo de obtenção de energia, a determinação de material volátil e de carbono fixos é de fundamental importância, uma vez que, valores elevados de material volátil e baixo teor de carbono fixo correspondem a uma queima rápida do combustível (Paz, 2017).

4.4 Teste de adsorção

A Tabela 6 apresenta os resultados do ensaio de adsorção do carvão ativado produzido realizado com o Delineamento de Faces Centradas (DFC), conforme descrito na metodologia, para diferentes concentrações de corante e quantidades de carvão.

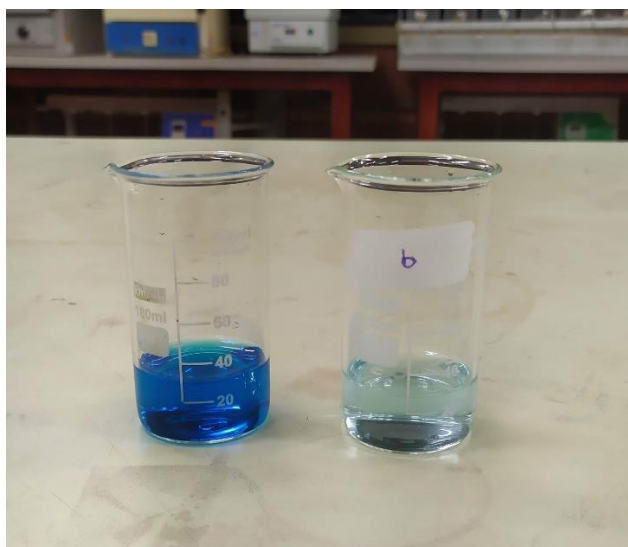
Tabela 6 - Resultado do teste de adsorção em relação à massa de carvão e à concentração de corante

Experimentos	Massa de carvão (g)	Concentração do corante (mg/L)	Razão de adsorção (mg/g)
1	0,4	20	0,83
2	1	20	0,56
3	0,4	100	5,50
4	1	100	2,70
5	0,4	60	3,61
6	1	60	1,73
7	0,7	20	0,74
8	0,7	100	3,74
9	0,7	60	2,32
10	0,7	60	2,30
11	0,7	60	2,31

Fonte: Autor (2024).

A Figura 8 mostra o experimento 6, apresentando a solução de corante com concentração de 60 mg/L antes e após o ensaio de adsorção com 1 g de carvão.

Figura 8 - Solução de concentração 60mg/L antes e após a adsorção



Fonte: Autor (2024).

4.4.1 Razão de adsorção (Y_1)

As respostas obtidas para esta variável refletem a eficácia da remoção do corante pelo carvão nas condições experimentais a que foi submetido. Os coeficientes de regressão relacionados ao planejamento experimental para a resposta da razão de adsorção (Y_1) são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Coeficientes de regressão e valores estatísticos para determinação da razão de adsorção

Fatores	Coeficiente de regressão	Erro padrão	t-calculado	p-valor
Média	2,35	0,08	29,42	0,0000
X_1	-0,83	0,06	-12,98	0,0000
X_1^2	0,26	0,10	2,62	0,0468
X_2	1,64	0,06	25,73	0,0000
X_2^2	-0,18	0,10	-1,81	0,1299
$X_1 * X_2$	-0,63	0,08	-8,13	0,0005

Fonte: Autor (2024).

Como resultado, definiu-se a equação de regressão linear para o modelo estatístico, demonstrando a relação entre os fatores que influenciam a razão de adsorção, conforme representado na Equação 5.

$$Y_1 = 2,35 - 0,83 X_1 + 0,26 X_1^2 + 1,64 X_2 - 0,18 X_2^2 - 0,63 X_1 * X_2$$

(Equação 5)

Onde:

Y_1 = razão de adsorção;

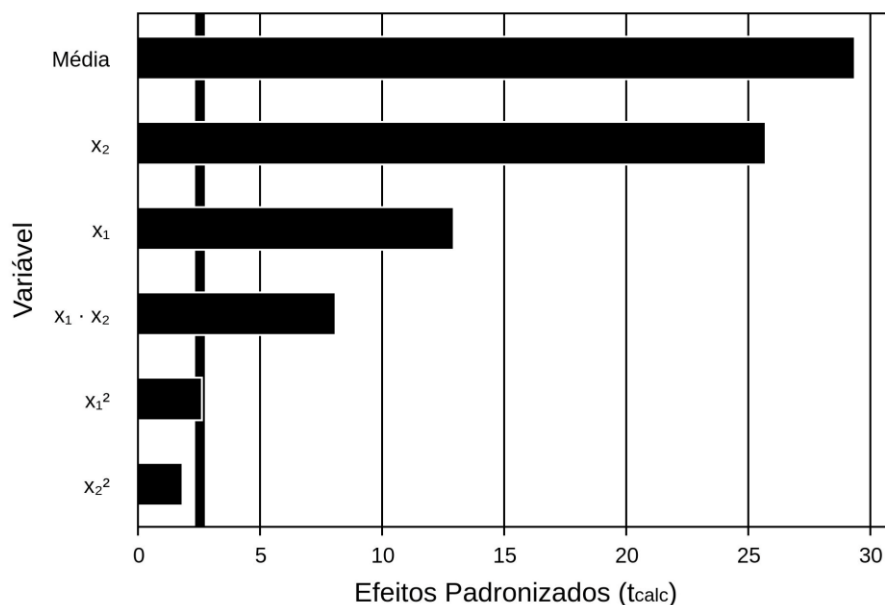
X_1 = massa de carvão (g);

X_2 = concentração do corante (mg/L);

No diagrama de Pareto do Gráfico 1, é possível analisar as variáveis mais significativas que contribuem expressivamente para o modelo da razão de adsorção do carvão neste estudo. Verifica-se que a concentração do corante (X_1), como variável

independente, teve o impacto mais significativo nos resultados, seguida pela massa de carvão (X_2).

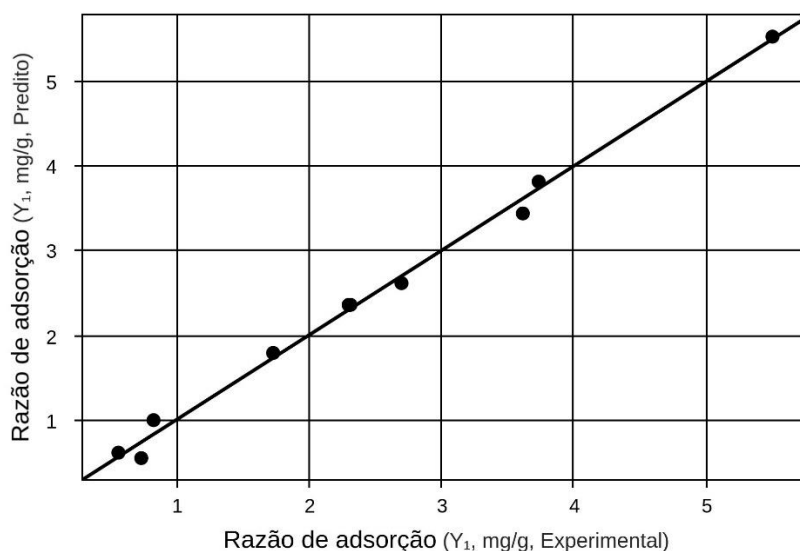
Gráfico 1 - Influência das variáveis na razão de adsorção



Fonte: Autor (2024).

Observa-se no gráfico de predição (Gráfico 2) que os dados experimentais apresentam uma excelente concordância com os resultados previstos pelo modelo, com pontos muito próximos à linha de regressão, descrevendo de forma precisa a relação entre as variáveis.

Gráfico 2 - Predição do modelo da razão de adsorção



Fonte: Autor (2024).

Na Tabela 8, estão disponibilizados os resultados da análise de variância (ANOVA) da razão de adsorção.

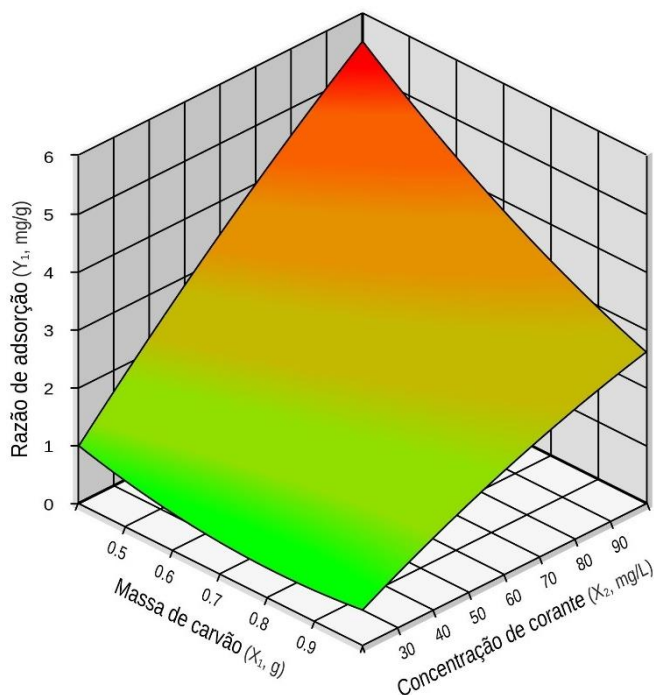
Tabela 8 - Análise de variância para a razão de adsorção utilizando ANOVA.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F_{calc}	p-valor
Regressão	21,9	5	4,4	180,9	0,00001
Resíduos	0,1	5	0	-	-
Falta de Ajuste	0,1	3	0	443,2	0,00225
Erro Puro	0	2	0	-	-
Total	22,1	10	-	-	-

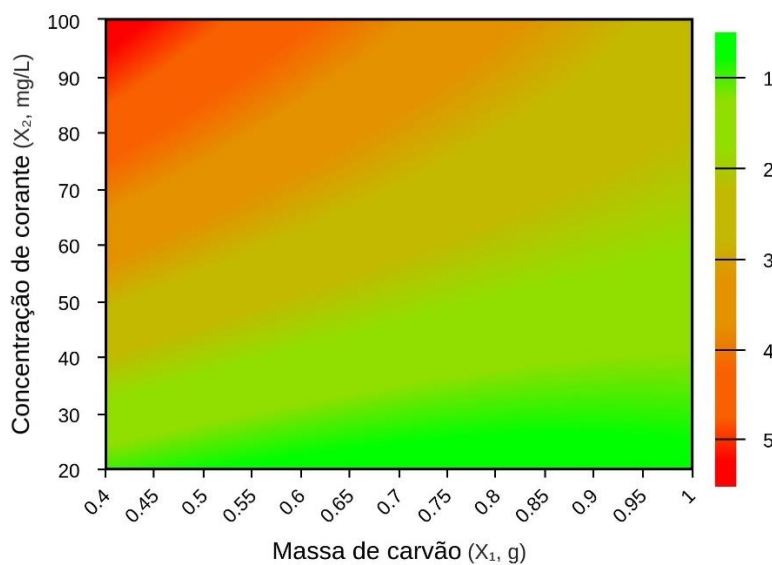
Fonte: Autor (2024).

O coeficiente de determinação R-quadrado (R^2) obtido foi de 99,45%, um valor altamente positivo. Este coeficiente é uma medida estatística que indica o quão próximos os dados estão da linha de regressão ajustada, demonstrando que o modelo estatístico é capaz de explicar a maior parte da variação presente nos dados experimentais, assegurando um ajuste superior ao modelo.

Nos Gráficos 3 e 4 de superfície e curvas de nível, é apresentada a relação identificada entre as variáveis: massa de carvão (X1), concentração do corante (X2) e a razão de adsorção (Y1). Na escala de cores utilizada, os tons de verde representam os valores mais baixos de razão de adsorção, enquanto os tons de vermelho representam os valores mais altos.

Gráfico 3 - Superfície da razão de adsorção em relação às variáveis

Fonte: Autor (2024).

Gráfico 4 - Curvas de nível da razão de adsorção em relação às variáveis

Fonte: Autor (2024).

Ao analisar graficamente, nota-se o carvão ativado de escama de peixe demonstra eficiência em todas as faixas de massa consideradas no modelo. Observa-se um aumento na razão de adsorção conforme a quantidade de massa diminui e as concentrações de corante aumentam. Isso sugere uma resposta eficaz do carvão

ativado em diferentes quantidades de massa, especialmente em combinação com concentrações mais elevadas de corante.

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos neste estudo, que envolveram a caracterização da biomassa, o rendimento da pirólise da escama de peixe, a caracterização do carvão produzido e os testes de adsorção, foi possível chegar às seguintes conclusões:

A escama de peixe apresenta um alto teor de voláteis (42,1%) e baixos teores de umidade (6,5%), o que indica a viabilidade do uso desse material na produção de carvão ativado através do processo de pirólise.

Considerando o rendimento médio e a umidade da biomassa analisada, uma tonelada de escamas de peixe resultaria em cerca de 935 kg de biomassa em base seca. A partir dessa quantidade, aproximadamente 305,84 kg de carvão ativado poderiam ser obtidos por meio do processo de pirólise nas condições apresentadas.

Ao analisar os resultados obtidos no teste de adsorção do corante Azul de Metileno pelo carvão ativado deste estudo, pôde-se perceber que o coeficiente de determinação R-quadrado (R^2) obtido foi de 99,45%, indicando que o modelo estatístico utilizado explica eficazmente a variação nos dados experimentais.

Observou-se que o maior valor da razão de adsorção, de 5,50 mg/g, foi obtido nas condições utilizando uma massa de carvão de 0,4 g e uma concentração de corante de 100 mg/L. Por outro lado, a menor razão, de 0,56 mg/g, foi observada nas condições com uma massa de carvão de 1 g e uma concentração de corante de 20 mg/L.

A análise gráfica revelou um padrão claro de aumento na razão de adsorção à medida que a quantidade de massa de carvão ativado diminui e as concentrações de corante aumentam. Este comportamento indica que o carvão ativado responde de maneira eficaz em diferentes quantidades de massa, especialmente quando exposto a concentrações mais elevadas.

Nas condições estudadas neste trabalho, indica-se que o carvão ativado produzido pela pirólise da escama de peixe é um material eficaz para adsorção.

REFERÊNCIAS

ACHIENG, G. O., KOWENJE, C. O., LALAH, J. O., OJWACH, S. O. Preparation, characterization of fish scales biochar and their applications in the removal of anionic indigo carmine dye from aqueous solutions. **Water Sci Technol**, v. 80, p. 2218–2231, 2019.

ALMEIDA, M. B. B. de. **Bio-óleo a partir da pirólise rápida, térmica ou catalítica, da palha da cana-de-açúcar e seu co-processamento com gás-óleo em craqueamento catalítico**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

AMALINA, F., RAZAK, A. S. A., KRISHNAN, S., ZULARISAM, A. W., NASRULLAH, M. A comprehensive assessment of the method for producing biochar, its characterization, stability, and potential applications in regenerative economic sustainability – A review. **Cleaner Materials**, v. 3, p. 1-18, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA PISCICULTURA. Anuário 2024, Peixe BR da Piscicultura. **Peixe BR**, 2024. Disponível em: < <https://www.peixebr.com.br/anuario-2024/>>. Acesso em: 18 de abr. de 2024.

ASTM D3173-87. **Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke**. American Society for Testing and Materials, 1996.

ASTM D3174-04. **Standard method for ash in the analysis sample of coal and coke**. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, 2004.

ASTM D3175-07. **Standard method for volatile matter in the analysis sample of coal**. American Society for Testing and Materials, 2007.

CHEN, W., LI, K., XIA, M., CHEN, Y., YANG, H., CHEN, Z., CHEN, X., CHEN, H. Influence of NH₃ concentration on biomass nitrogen-enriched pyrolysis. **Bioresource Technology**, v. 263, p. 350-357, 2018.

CHEN, X. L., LI, F., XIE, X. J., LI, Z., CHEN, L. Nanoscale Zero-Valent Iron and Chitosan Functionalized Eichhornia crassipes Biochar for Efficient Hexavalent Chromium Removal. **Int. J. Environ. Res. Public Health**, v. 17, 2019.

DOU, S., KE, X. X., SHAO, Z. D., ZHONG, L. B., ZHAO, Q. B., ZHENG, Y. M. Fish scale-based biochar with defined pore size and ultrahigh specific surface area for highly efficient adsorption of ciprofloxacin. **Chemosphere**, v. 287, p. 1-9, 2022.

GADORE, V., MISHRA, S. R., AHMARUZZAMAN, M. Bandgap engineering approach for synthesising photoactive novel Ag/HAp/SnS₂ for removing toxic anti-fungal pharmaceutical from aqueous environment. **Journal of Hazardous Materials**, v. 461, 2024.

IKOMA, T., KOBAYASHI, H., TANAKA, J., WALSH, D., MANN, S. Microstructure, mechanical, and biomimetic properties of fish scales from Pagrus major. **Journal of Structural Biology**, v. 142, p. 327-333, 2003.

KUMARI, N., MARANDI, S., PANDEY, S. Fluoride removal from groundwater using fish scales derived biochar. **Materials Today: Proceedings**, p. 1-8, 2024.

LEHMANN, J., RILLIG, M. C., THIES, J., MASIELLO, C. A., HOCKADAY, W. C., CROWLEY, D. Biochar effects on soil biota – A review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 43, p. 1812-1836, 2021.

LENG, L., XIONG, Q., YANG, L., LI, H., ZHOU, Y., ZHANG, W., JIANG, S., LI, H., HUANG, H. An overview on engineering the surface area and porosity of biochar. **Science of The Total Environment**, v. 763, 2021.

LÔBO, R. N. **Degradação térmica de podas de árvores (Syzygium Cumini) visando a produção de carvão ativado para uso industrial**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2021.

LU, X., ZHAO, J. Adsorption of ciprofloxacin on co-pyrolyzed biochar from fish scale and pine needle. **Chinese Journal of Analytical Chemistry**, v. 52, p. 1-12, 2024.

MACHADO, P. R. S. **Prospecção de bioprodutos a partir da degradação termoquímica do sabugo de milho visando aplicação industrial.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Tocantins, Palmas, p. 93, 2019.

MELO, E. F. **Biocompósitos de gelatina de pele e hidroxiapatita de escamas de resíduos do beneficiamento de tilápia do Nilo (*Oreochromis Niloticus*).** Dissertação (Pós-graduação), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, p. 90, 2017.

MONROE, A. P. R., SILVA, A. V. S., MELO, M. S., SILVA, J. B. S., GARCIA, R. R. P., RIOS, M. A. S., BIZZO, W. A., CRUZ, G. Evaluation of the Bioenergy Potential of Blends (Green Coconut Shells and Fish Scales) as a Feedstock in Thermochemical Processes for Clean Energy Production. **Processes**, v. 12, 2024.

PATI, F., ADHIKARI, B., DHARA, S. Isolation and characterization of fish scale collagen of higher thermal stability. **Bioresource Technology**, v. 101, p. 3737-3742, 2010.

PAZ, E. C. S. **Padronização nas condições de degradação termogravimétrica da fibra de coco em reator de leito fixo na produção de carvão.** Dissertação de (Mestrado), Universidade de Ribeirão Preto (UNAERP), Ribeirão Preto, p. 100, 2017.

PEDROZA, M. M., VIEIRA, G. E. G., SOUSA, J. F. Características químicas de lodos de esgotos produzidos no Brasil. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, Desarrollo y Práctica**, v. 4, p.1-13, 2011.

PERONDI, D., MANERA, C., COLLAZZO, G.C., DOTTO, G.L., GODINHO, M. Pirólise de resíduos da atividade pesqueira. **6º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente**, Bento Gonçalves, p. 9, 2018.

RAVEENDRAN, K., GANESH, A., KHILAR, K. C. Influence of mineral matter on biomass pyrolysis characteristics. **Fuel**, v. 74, p. 1812-1822, 1995.

RODWIHOK, C., SUWANNAKEAW, M., CHAROENSRI, K., WONGRATANAPHISAN, D., WOO, S. W., KIM, H. S. Alkali/zinc-activated fly ash nanocomposites for dye removal and antibacterial applications. **Bioresour. Technol.**, v. 331, 2021.

SANCHEZ, M. E., MENÉNDEZ, J. A., DOMÍNGUEZ, A., PIS, J. J., MARTÍNEZ, O., CALVO, L. F., BERNAD, P. L. Effect of pyrolysis temperature on the composition of the oils obtained from sewage sludge. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, p. 933-940, 2009.

SAKHIYA, A. K., ANAND, A., KAUSHAL, P. Production, activation, and applications of biochar in recent times. **Biochar**, v. 2, p. 253–285, 2020.

SHAHBANDEH, M. (2024, 26 de fevereiro). Total world fish production since 2002. **Statista**, 26 de fev. 2024. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/264577/total-world-fish-production-since-2002/>>. Acesso em: 18 de abr. de 2024.

SILVA, A. V. S., TORQUATO, L. D. M., CRUZ, G. Potential application of fish scales as feedstock in thermochemical processes for the clean energy generation. **Waste Management**, v. 100, p 91-100, 2019.

TANG, S., SHAO, N., ZHENG, C., YAN, F., ZHANG, Z. Amino-functionalized sewage sludge-derived biochar as sustainable efficient adsorbent for Cu(II) removal. **Waste Management**, v. 90, p. 17-28, 2019.

THOMAS, P., LAI, C. W., JOHAN, M. R. B. Recent developments in biomass-derived carbon as a potential sustainable material for super-capacitor-based energy storage and environmental applications. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 140, p 54-85, 2019.

VERMA, R., MISHRA, S. R., GADORE, V., AHMARUZZAMAN, M. Hydroxyapatite-based composites: Excellent materials for environmental remediation and biomedical applications. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 315, 2023.

XIA, D., LIU, Y., CHENG, X., GU, P., CHEN, Q., ZHANG, Z. Temperature-tuned fish-scale biochar with two-dimensional homogeneous porous structure: A promising uranium extractant. **Applied Surface Science**, v. 591, p. 1-11, 2022.

XIE, J., LIU, M., HE, M., LIU, Y., LI, J., YU, F., LV, Y., LIN, C., YE, X. Ultra-efficient adsorption of diclofenac sodium on fish-scale biochar functionalized with H₃PO₄ via synergistic mechanisms. **Environmental Pollution**, v. 322, p. 1-13, 2023.

XIU, S., SHAHBAZI, A., LI, R. CHARACTERIZATION, MODIFICATION AND APPLICATION OF BIOCHAR FOR ENERGY STORAGE AND CATALYSIS: A REVIEW. **Trends in Renewable Energy**, v. 3, 2017.

YANG, D., GONG, L., LI, Q., FAN, B., MA, C., HE, Y. C. Preparation of a biobased polyelectrolyte complex from chitosan and sodium carboxymethyl cellulose and its antibacterial characteristics. **Int. J. Biol. Macromol.**, v. 227, p. 524–534, 2023.

YU, K. L., SHOW, P. L., ONG, H. C., LING, T. C., LAN, J. C. W., CHEN, W. H., CHANG, J. S. Microalgae from wastewater treatment to biochar – Feedstock preparation and conversion technologies. **Energy Conversion and Management**, v. 150, p. 1-13, 2017.

ZHANG, Z., HE, Y. C., LIU, Y. Efficient antibacterial and dye adsorption by novel fish scale silver biochar composite gel. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 248, 2023.

ZHAO, J., LU, X. Adsorption of ciprofloxacin on co-pyrolyzed biochar from fish scale and pine needle. **Chinese Journal of Analytical Chemistry**, v. 52, p. 1-12, 2024.