



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

GABRYELLE RODRIGUES DE SOUSA ROCHA

**ADSORÇÃO DE VERMELHO CONGO EM CARVÃO ATIVADO,
PRODUZIDO DACASCA DE CASTANHA DO PARÁ UTILIZANDO A
METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA**

**PALMAS
2022**

GABRYELLE RODRIGUES DE SOUSA ROCHA

**ADSORÇÃO DE VERMELHO CONGO EM CARVÃO ATIVADO,
PRODUZIDO DACASCA DE CASTANHA DO PARÁ UTILIZANDO A
METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso de
Engenharia Civil do Instituto Federal do
Tocantins – Campus Palmas, como
exigência à obtenção do grau de Bacharel
em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Mendes
Pedroza.

**PALMAS
2022**

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

- R672a Rocha, Gabryelle Rodrigues de Sousa
Adsorção de vermelho congo em carvão ativado, produzido da casca de castanha do Pará utilizando a metodologia de superfície de resposta / Gabryelle Rodrigues de Sousa Rocha. – Palmas, TO, 2022.
36 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus Palmas, Palmas, TO, 2022.
- Orientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza
1. Adsorção de Corante Vermelho Congo. 2. Carvão Ativado. 3. Castanha do Pará. I. Pedroza, Marcelo Mendes. II. Título.

CDD 624

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

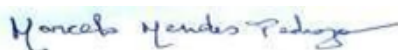
GABRYELLE RODRIGUES DE SOUSA ROCHA

**ADSORÇÃO DE VERMELHO CONGO EM CARVÃO ATIVADO,
PRODUZIDO DACASCA DE CASTANHA DO PARÁ UTILIZANDO A
METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso de
Engenharia Civil do Instituto Federal do
Tocantins – Campus Palmas, como
exigência à obtenção do grau de Bacharel
em Engenharia Civil.

Aprovado em: 14/10/2022

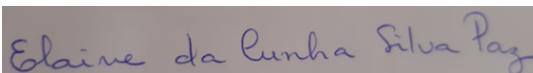
BANCA AVALIADORA



Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza
Orientador
IFTO – Campus Palmas



Prof. Mes. Camila Ribeiro Rodrigues
UNIRG



Prof. Dra. Elaine Da Cunha Silva Paz
IFTO – Campus Palmas

À minha família: minha mãe Maria de Jesus Rodrigues de Sousa, minha irmã Katryelle Rodrigues de Sousa Rocha e minha sobrinha Maria Antônia Rodrigues Brito.

RESUMO

O desenvolvimento industrial levou ao aumento de problemas ambientais, dentre eles, os advindos do processo de produção da indústria têxtil. Os corantes do tipo azo constituem a maior e mais importante classe de corantes orgânicos sintéticos usados na indústria têxtil, no entanto, apresentam difícil biodegradabilidade e alta toxicidade. Devido a ineficiência do tratamento convencional na remoção de corantes do tipo azo, este trabalho objetivou o estudo e estimativas de parâmetros estatísticos do tratamento de efluentes com presença de corante vermelho congo a partir do processo de adsorção, tal método se baseia retenção de substâncias na superfície do carvão ativado, produzido pelo processo de pirólise da biomassa da casca da castanha-do-brasil. O experimento de adsorção foi realizado em regime de batelada, em mesa de agitação Shaker TE 141, com volume padrão de 30 mL de solução, com planejamento experimental do tipo Delineamento de Faces Centradas, para se verificar os efeitos da massa de carvão e concentração da solução do corante no processo de adsorção. Durante o teste de adsorção de corante vermelho congo, foi possível observar que para a obtenção de maior eficiência na remoção do corante se faz necessário a aplicação de massa elevada de carvão ativado e baixa concentração de corante. Sendo a capacidade máxima de adsorção obtida na aplicação de quantidade baixa de massa do carvão e alta concentração do corante.

Palavras-chave: Corante Vermelho do Congo, Carvão ativado, Adsorção

ABSTRACTA

Industrial development led to an increase in environmental problems, among them, those arising from the production process of the textile industry. Azo dyes are the largest and most important class of synthetic organic dyes used in the textile industry, however, they are difficult to biodegrade and have high toxicity. Due to the inefficiency of conventional treatment in the removal of azo-type dyes, this work aimed to study and estimate statistical parameters of the treatment of effluents with the presence of Congo red dye from the adsorption process, this method is based on the retention of substances on the surface of activated carbon, produced by the process of pyrolysis of the biomass of the bark of the Brazil nut. The adsorption experiment was carried out in a batch regime, on a Shaker TE 141 shaking table, with a standard volume of 30 mL of solution, with an experimental design of the Centered Faces Design type, to verify the effects of coal mass and concentration of carbon. dye solution in the adsorption process. During the Congo red dye adsorption test, it was possible to observe that in order to obtain greater efficiency in the removal of the dye, it is necessary to apply a high mass of activated carbon and a low concentration of dye. The maximum adsorption capacity being obtained in the application of low amount of coal mass and high concentration of dye.

Keywords: Congo Red Dye, Activated Carbon, Adsorption.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Estrutura dos primeiros corantes azo: (a) Anilina Amarela, (b) Pardo Bismarck ..	15
Figura 2 - Estrutura corante Vermelho Congo	16
Figura 3 - Castanheira (Árvore da castanha-do-pará)	16
Figura 4 - Detalhe morfológico do ouriço.....	17
Figura 5 - Exemplos de arranjos experimentais para experimentos em batelada.....	21
Figura 6 - Diagrama dos procedimentos metodológicos que serão abordados neste trabalho	15
Figura 7 - Mesa de agitação Shaker TE 141	15
Figura 8 - Espectrofotômetro.....	15
Figura 9 - Diagrama de Pareto da absorbância do carvão da Casca da Castanha do Pará.	19
Figura 10 - Valores observados X Valores previstos para absorbância do carvão da Casca da Castanha do Pará.	20
Figura 11 - Superfície de resposta para absorbância do teste de adsorção com utilização do carvão ativado da Casca da Castanha do Pará.	21
Figura 12 - Gráfico de Pareto da eficiência de adsorção do carvão da Casca de Castanha do Pará.	22
Figura 13 - Gráfico de Pareto da Capacidade Máxima de Adsorção do carvão da Casca da Castanha do Pará.	23
Figura 14 - Valores observados X Valores previstos da capacidade máxima de adsorção do carvão.....	24
Figura 15 - Gráfico de superfícies que representa a capacidade máxima de adsorção do carvão ativado em estudo.	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diferenças entre adsorção física e adsorção química	20
Tabela 2 - Fatores e níveis empregados.....	16
Tabela 3 - Ordem dos Experimentos no DFC no Planejamento Experimental	17
Tabela 4 - Resultado do teste de adsorção sob efeito das duas variáveis independentes (massa de carvão e concentração da solução do corante).	18
Tabela 5 - Coeficientes de regressão do Planejamento DFC.....	19
Tabela 6 - ANOVA para absorbância das amostras de carvão ativado na adsorção do vermelho congo.	20
Tabela 7 - Coeficientes de regressão do Planejamento DFC para definição da eficiência de adsorção do carvão ativado da Casca da Castanha do Pará.....	21
Tabela 8 - Coeficientes de regressão do Planejamento DFC para definição da capacidade máxima de adsorção do carvão ativado da Casca de Castanha do Pará.....	23
Tabela 9 - ANOVA para absorbância das amostras de carvão ativado na adsorção do vermelho congo.	23

LISTA ABREVIATURAS, ACRÔNIMOS, SIGLAS E SÍMBOLOS

CH₄	Metano
CO	Monóxido de carbono
CO₂	Dióxido de carbono
H₂	Gás hidrogênio
H₂O	Água
LARSEN	Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética
%	Porcentagem
°C	Grau Celsius
g	Grama
rpm	Rotações por minuto
DFC	Delineamento de Faces Centradas
mL	Mililitro
mm	Milímetro
m	Metro
K	Kelvin
pH	Potencial hidrogeniônico
min	Minuto
nm	Nanômetro

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA	12
1.2	JUSTIFICATIVA	12
1.3	OBJETIVOS	13
1.3.1	Objetivos gerais	13
1.3.2	Objetivos Específicos	13
2	REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1	CORANTE TÊXTIL	14
2.1.1	Corantes azo	15
2.1.2	Corante Vermelho Congo	16
2.1.3	Castanha do Pará	16
2.2	CARVÃO ATIVADO	18
2.2.1	Pirólise	18
2.2.2	Processo de Ativação	19
2.3	ADSORÇÃO	19
2.4	ENSAIOS DE ADSORÇÃO EM BATELADA	21
3	METODOLOGIA	15
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
5	CONCLUSÃO	26
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	27

1 INTRODUÇÃO

A água é um dos recursos imprescindíveis para a manutenção da vida, devido à baixa disponibilidade de água potável, a economia de água em processos produtivos vem ganhando especial atenção devido ao valor agregado que tem sido atribuído a este bem, através de princípios como consumidor pagador e poluidor pagador recentemente incorporados em nossa legislação (KUNZ et al., 2002).

O tratamento de água brasileira é regulado pela Portaria 2914 do Ministério da Saúde de 12 de dezembro de 2011, que “dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade”, a fim de coibir problemas significativos de contaminação ambiental, por resíduos contaminados.

O tratamento e descarte de efluentes no meio ambiente advindos das indústrias, dentre elas a indústria têxtil, demonstra um grande problema ambiental, diante do cenário de consumo exacerbado e baixa disponibilidade de recursos hídricos. Com estes ingredientes os problemas devido a ação antrópica têm atingido dimensões catastróficas, podendo ser observadas através de alterações na qualidade do solo, ar e água (KUNZ et al., 2002).

Devido os corantes não se fixarem totalmente no processo de tingimento, o efluente tende a ter alta coloração, assim, quando descartados sem tratamento adequado, levam a dificuldade de penetração da luz solar, alterando a atividade fotossintética. Os tratamentos convencionais tendem a ser eficientes em materiais particulados, no entanto, a remoção de cor e compostos orgânicos dissolvidos mostram-se deficientes, no qual os processos de adsorção em carvão ativado apresentam uma eficiência significativamente maior (KUNZ et al., 2002).

A adsorção é uma operação de transferência de massa, em que se estuda a habilidade de certos sólidos em concentrar na sua superfície determinadas substâncias existentes em fluidos líquidos ou gasosos, possibilitando a separação dos componentes desses fluidos (NASCIMENTO et al., 2014).

As substâncias que se acumulam ou são adsorvidas na interface sólido/líquido de um material são denominadas adsorvato, enquanto o material sólido que exerce a atração é o adsorvente (SOUSA, 2015).

O presente trabalho tem como objeto de estudo avaliar a adsorção do

carvão ativado proveniente da pirólise de casca de castanha do Pará, na remoção de corante vermelho congo em regime de batelada, empregando a metodologia de superfície de resposta.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Os resíduos têxteis necessitam de cuidados especiais para o tratamento, visto que, o sistema de tratamento convencional não se mostra eficiente na remoção de corantes do tipo azo, diante dessa problemática será avaliado qual a eficiência na remoção do corante vermelho congo através de processo de adsorção, empregando o carvão ativado proveniente da pirólise de casca de castanha do Pará.

1.2 JUSTIFICATIVA

Os avanços tecnológicos e a expansão da cadeia produtiva da indústria têxtil, levou ao surgimento de problemas ambientais no setor, como resíduos sólidos, emissões atmosféricas e efluentes (SANTOS et al., 2018).

A indústria têxtil destaca-se no grande volume de efluentes que se apresentam altamente coloridos devido à presença de corantes que não se fixam à fibra durante o processo de tingimento. Apesar das inovações tecnológicas do setor para tingimento das fibras têxteis, estima-se que cerca de 15% do volume total de corantes utilizados seja perdido para o ambiente. Esses resíduos, quando não tratados, podem causar sérios problemas de contaminação ambiental, repercutindo na condição de vida humana, pois alguns corantes oferecem risco à saúde, como é o caso de muitos azocorantes, bem como o corante vermelho congo sintético (FRANCO,2009 apud CHUNG, CERNIGLIA, 1992; KUNZ et al., 2002).

A fim de controlar o lançamento no meio ambiente de poluentes, a Constituição Federal e a Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, proibindo o lançamento em níveis nocivos ou perigosos para os seres humanos e outras formas de vida (FRANCO,2009).

Em razão de todas as consequências ocasionadas pelo lançamento dos resíduos nos corpos hídricos, e adequação a legislação brasileira, o tratamento

convencional não garante eficácia na remoção de cor e compostos orgânicos dissolvidos, sendo necessário a aplicação de metodologias de tratamento mais eficientes como o processo de adsorção em carvão ativado.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivos gerais

Realizar a adsorção de vermelho congo sintético em carvão ativado proveniente da pirólise de casca de castanha do Pará empregando a metodologia de superfície de resposta.

1.3.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos tem-se:

- A) Desenvolver o processo de adsorção de solução do corante vermelho congo em carvão ativado em regime de batelada;
- B) Determinar a remoção de corante sintético no processo;
- C) Estimar os parâmetros do modelo estatístico que representa a adsorção decorantes em carvão ativado

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CORANTE TÊXTIL

A indústria de corantes têxteis se originou na Europa no século XVI, no entanto o primeiro corante sintético foi descoberto apenas em 1856 por William Henry Perkin na Inglaterra (GUARATINI E ZANONI, 1999).

A tintura de tecidos é uma arte milenar e engloba grande diversidade de corantes sintéticos, que são extensivamente utilizados na indústria têxtil, gráfica, fotográfica e como aditivos em derivados de petróleo. Aproximadamente 10.000 diferentes corantes e pigmentos são usados industrialmente (KUNZ et al., 2002).

A tecnologia aplicada no tingimento consiste em etapas que são escolhidas de acordo com a natureza da fibra têxtil, características estruturais, classificação e disponibilidade do corante para aplicação, propriedades de fixação compatíveis com o destino do material a ser tingido, considerações econômicas e muitas outras (GUARATINI E ZANONI, 1999).

Segundo Sottoriva (2002) os corantes podem se fixar nas fibras através de ligações iônicas ou covalentes, e ainda por meio de pontes de hidrogênio e forças de Van der Waals. Nas interações iônicas os grupos ácidos e base interagem com os grupos de pólos opostos presente nas fibras, sendo às vezes necessário a adição de sais metálicos, outra forma é em grupos (-OH), que são capazes de fazer ligações de hidrogênio, sendo a mais forte interação intermolecular.

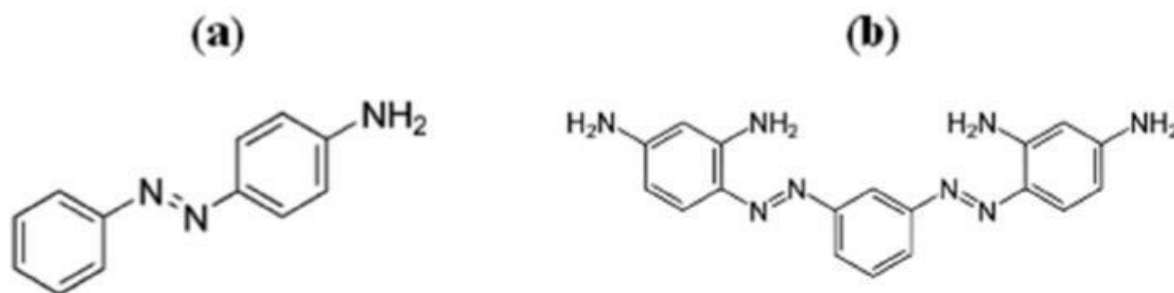
As interações de Van der Waals são baseados na interação proveniente da aproximação máxima entre orbitais π do corante e da molécula da fibra, de tal modo que as moléculas do corante são "ancoradas" firmemente sobre a fibra por um processo de afinidade, sem formar uma ligação propriamente dita.

Os corantes podem ser classificados de acordo com sua estrutura química (antraquinona, azo etc.) ou de acordo com o método pelo qual ele é fixado à fibra têxtil (corantes básicos, ácidos, diretos, mordentes, ao enxofre, de cuba, azóicos, dispersos e reativos, branqueadores e pré-metalizados) (GUARATINI E ZANONI, 1999).

2.1.1 Corantes azo

Os primeiros corantes azo foram fabricados por Mene em 1861 sendo a Anilina Amarela e por Carl Alexander Martius em 1863, o Pardo Bismarck, ilustrado na Figura 1 (BAFANA;DEVI; CHAKRABARTI, 2011).

Figura 1 - Estrutura dos primeiros corantes azo: (a) Anilina Amarela, (b) Pardo Bismarck



Fonte: BAFANA, DEVI, CHAKRABARTI (2011)

Os azocorantes se caracterizam pela presença da ligação dupla entre dois átomos de nitrogênio ($-N=N-$), ligados a sistemas aromáticos, representando cerca de 60 % dos corantes atualmente utilizados no mundo (KUNZ et al., 2002). Azocorantes são corantes de difícil biodegradabilidade e constituem a maior e mais importante classe de corantes orgânicos sintéticos usados na indústria têxtil (REIS, 2009).

Segundo Guimarães (2010), a síntese de corantes azo é a mais economicamente viável de todas as classes de corantes. Sendo em geral, produzidos pela mesma sequência de reações, que é compreendida de dois estágios: diazotização e acoplamento azo.

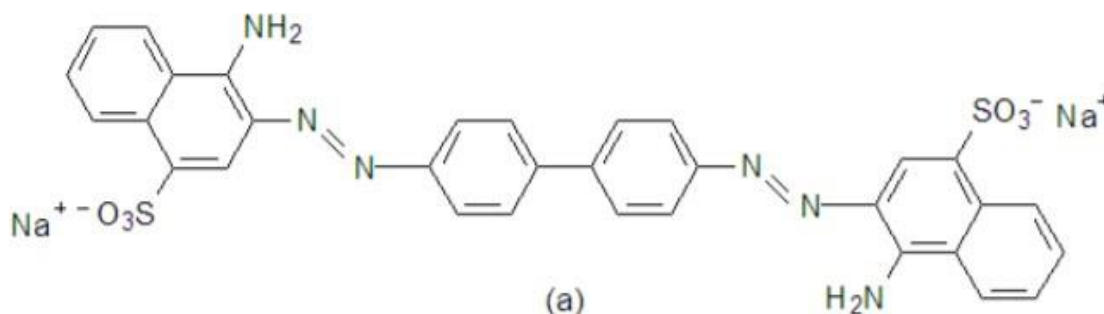
A diazotização consiste no tratamento de uma amina aromática primária com nitrito de sódio, em excesso de ácido clorídrico. O acoplamento azo ocorre com fenóis, naftóis ou aminas aromáticas.

No entanto, os azo-corantes têm demonstrado caráter prejudicial para a saúde humana e grande impacto ambiental, algo que vem sendo observado há muito tempo e demonstrando a necessidade da realização de testes nos efluentes têxteis. Desde 1940 têm-se relatos de ensaios de toxicidade envolvendo resíduos contendo corantes (SOTTORIVA, 2002).

2.1.2 Corante Vermelho Congo

O primeiro corante Vermelho Congo foi produzido em 1884, no entanto, vem sendo deixado de ser usado devido sua alta toxicidade, o vermelho congo é o sal sódico do ácido benzidinodiazobis-1-naftilamina-4-sulfônico (fórmula: $C_{32}H_{22}N_6Na_2O_6S_2$; massa molar: 696,66 g/mol), com estrutura representada na Figura 2. Ele tem uma forte afinidade a fibras de celulose aparentemente não-covalente, sendo obtido pelo acoplamento da benzindina tetrazotizada com moléculas de ácido naftiônico (GUIMARÃES, 2010).

Figura 2 - Estrutura corante Vermelho Congo



Fonte: Adaptado de GUIMARÃES (2010).

O corante vermelho congo é um corante diazo secundário e solúvel em água, produzindo uma solução coloidal avermelhada, em que a sua solubilidade é melhor em solventes orgânicos tais como o etanol (REIS, 2009).

2.1.3 Castanha do Pará

A árvore de castanha-do-Brasil (Figura 3), mais conhecida popularmente como árvore de castanha do Pará, pode atingir até 50m de altura e exerce importante papel no extrativismo do seu fruto.

Encontradas nas matas altas de terra firme não inundável, seus frutos (picídeo imperfeito), conhecidos como ouriços, contêm as sementes, isto é, as amêndoas, que industrialmente pode ser extraído cerca de 70% de óleo claro, inodoro, insípido, comestível quando fresco (DUARTE, 2017).

Figura 3 - Castanheira (*Árvore da castanha-do-pará*)



Fonte: SOUZA (2015)

O ouriço (Figura 4), apresenta duas camadas esféricas lenhosa, sendo a externa a mais fina, com peso variando entre 1 a 5 quilos. Dentro do mesmo, são encontradas as sementes, cujo número varia entre 10 a 25 unidades, dispostas dentro do fruto e ligadas entre si, por um material fibroso e desidratado (ALMEIDA, 2015).

Figura 4 - Detalhe morfológico do ouriço



Fonte: Adaptado de Duarte (2017).

Segundo Duarte (2017), o ouriço já tem sido usado como fonte calorífica e para a produção de carvão vegetal, logo, a sua utilização na produção de carvão ativado visando a remoção de agentes poluentes em ambiente aquático é uma alternativa plausível para reduzir o problema no ecossistema agregando valor a esse material.

2.2 CARVÃO ATIVADO

Para a produção de carvão ativado normalmente utilizam materiais de elevado teor de carbono, sendo obtido através de um processo de pirólise e ativação, em que apresenta uma configuração microcristalina, não grafítica de carbono, apresentando-se como um sólido predominantemente amorfo, na forma de pó ou granulado, que foi processado para desenvolver porosidade interna, aumentando a área superficial e o volume de poros, sendo amplamente usado como adsorvente em aplicações tanto em fase líquida como gasosa, utilizado para purificar, filtrar, descolorir, desodorizar, dechlorificar, desintoxicar, etc. (GONÇALVES et al. 2006).

As propriedades ácidas e básicas da superfície do carvão ativado fazem deste material um dos materiais mais empregado na remoção de poluentes no meio aquoso usado em processos como filtração, purificação, desodorização e separação. Dependendo da natureza química da superfície, os carvões ativados podem ainda agir diretamente como catalisadores em diferentes reações químicas, além de ser utilizado como suporte catalíticos, pois apresenta alta estabilidade sob condições de reação, propriedades mecânicas adequadas e alta área superficial, mantendo a fase ativa catalítica em um estado altamente disperso (CASTRO, 2009).

2.2.1 Pirólise

A pirólise é um procedimento caracterizado pela degradação termoquímica do material, implicando no rompimento das ligações carbono-carbono e na formação de ligações carbono-oxigênio, sendo um processo endotérmico, ocorrendo comumente numa faixa de temperatura de 300 a 600 °C, que pode ser realizado em ausência completa ou quantidade mínima do oxidante (SANTOS,2021)

Ainda de acordo com Santos (2021), as diferentes condições do processo

podem gerar diversos tipos de pirólise, podendo ser, pirólise lenta, gerando a carbonificação, a pirólise rápida, gerando a liquefação, a pirólise à vácuo, a pirólise ablativa e a pirólise flash, gerando a gaseificação.

O processo de pirólise lenta que ocorre em baixas temperaturas e longos tempos de residência favorecem a produção de sólidos, enquanto o processo de pirólise rápida em altas temperaturas e longos tempos de residência favorecem a conversão da biomassa em gás, ou podendo ocorrer em temperaturas moderadas com curtos tempos de residência levando a produção de líquidos (BRIDGWATER, 2012).

2.2.2 Processo de Ativação

Segundo Duarte (2017), o processo de ativação consiste em duas etapas, sendo a primeira carbonização pela pirólise do precursor (decomposição térmica), nesta etapa é removido os componentes voláteis (H_2 , CH_4 , CO e CO_2 , e/ou elementos que não constituem diretamente o arranjo carbônico, produzindo uma massa carbônica fixa e porosa que favorece a ativação. E a segunda ativação é um processo secundário em que os materiais carbonáceos sofrem oxidação parcial nas paredes dos canais, sendo responsável pelo aumento do diâmetro de poros menores, desobstrução e criação de novos poros no material.

A ativação apresenta dois tipos de processo, a ativação química ou a ativação física, a química envolve a impregnação de agentes desidratantes como ácido fosfórico; hidróxido de potássio e cloreto de zinco, sobre o precursor ainda não carbonizado com posterior carbonização a temperaturas superiores a 673K (CLAUDINO, 2003). A ativação física consiste na reação do carvão com gases contendo oxigênio combinado (H_2O ou CO_2 ou mistura de ambos), mantendo as partículas de carvão em contato íntimo com os gases oxidantes (DUARTE, 2017).

2.3 ADSORÇÃO

Nas últimas décadas a adsorção se tornou um dos métodos mais populares para o tratamento de águas, no processo de separação e purificação. Sendo uma operação de transferência de massa, na qual se estuda a habilidade de certos sólidos em concentrar na sua superfície determinadas substâncias existentes em fluidos

líquidos ou gasosos, possibilitando a separação dos componentes desses fluidos (NASCIMENTO et al., 2014).

Dá-se o nome de adsorvato ou adsorbato às substâncias que se acumulam na interface do sólido, ao material sólido denomina-se adsorvente, podendo ocorrer interações entre eles na forma física (fisissorção) ou química (quimissorção), apresentando características específicas como apresentado na Tabela 1 (CURBELO, 2002).

A adsorção física ou fisissorção, ocorre pela retenção do adsorvato na superfície do adsorvente através de interações relativamente fracas do tipo forças de Van der Waals, apresentando caráter reversível. A quimissorção ocorre através de troca ou partilha de elétrons entre as moléculas do adsorvente e da superfície do adsorvato, resultando numa ligação química forte e fazendo com que o processo seja irreversível, a adsorção química só pode ocorrer nos sítios ativos, sendo assim, é dita localizada (NASCIMENTO et al., 2014).

Tabela 1 - Diferenças entre adsorção física e adsorção química

Adsorção Física	Adsorção Química
Causadas por forças de <i>van der Waals</i>	Causada por forças eletrostáticas e ligações covalentes
Não há transferência de elétrons	Há transferência de elétrons
Fenômeno geral para qualquer espécie	Fenômeno específico e seletivo
A camada adsorvida pode ser removida por aplicação de vácuo à temperatura de adsorção	A camada adsorvida só é removida por aplicação de vácuo e aquecimento a temperatura acima da de adsorção
Formação de multicamadas abaixo da temperatura crítica	Somente há formação de monocamadas
Acontece somente abaixo da temperatura crítica	Acontece também a altas temperaturas
Lenta ou rápida	Instantânea
Adsorvente quase não é afetado	Adsorvente modificado na superfície

Fonte: Duarte (2017)

De acordo com Nascimento et al. (2014), os fatores que influenciam o processo de adsorção são:

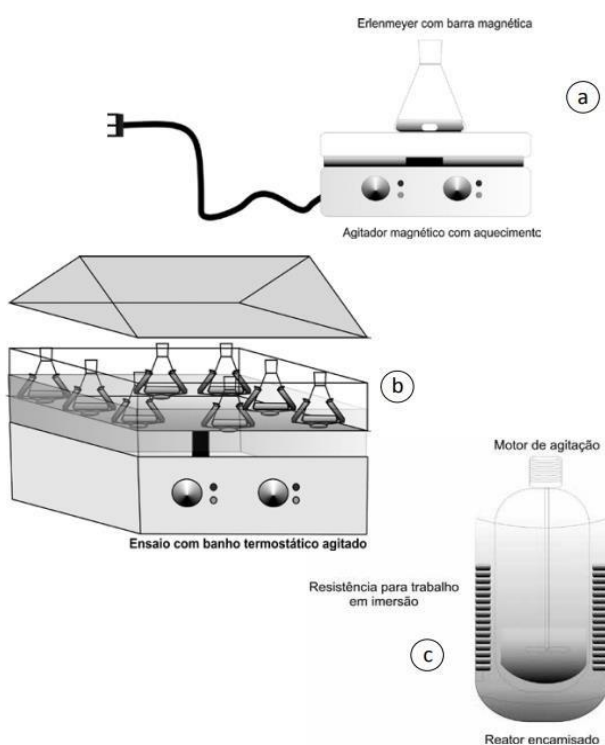
- A) Adsorvente - área superficial, tamanho do poro, densidade, grupos funcionais presentes na superfície e hidrofobicidade do material.
- B) Adsorvato - polaridade, do tamanho da molécula, da solubilidade e da acidez ou basicidade.
- C) Condições operacionais - temperatura, pH e natureza do solvente.

Sendo a capacidade de adsorção de um material avaliada quantitativamente por meio de isotermas, as quais mostram a relação de equilíbrio entre a concentração da fase fluida e a concentração de adsorbato acumulada nas partículas adsorventes em uma determinada temperatura (DUARTE, 2017).

2.4 ENSAIOS DE ADSORÇÃO EM BATELADA

Os experimentos em batelada (Figura 5) são mais simples de serem desenvolvidos, sendo a decisão de manter um modo de adsorção batelada ou coluna associada ao volume a ser tratado e ao tempo de contato, sendo assim, sistemas com grande volume de amostras, se torna inviável a aplicação do sistema de adsorção em batelada (NASCIMENTO et al., 2014).

Figura 5 - Exemplos de arranjos experimentais para experimentos em batelada



Fonte: Adaptado de NASCIMENTO (2014).

Segundo Nascimento et al. (2014), os principais parâmetros observados no ensaio de adsorção em batelada é a temperatura, massa do adsorvente, concentração do adsorbato e velocidade de agitação, outras variáveis podem ser levadas em consideração, no entanto, não são muito relevantes na análise do processo.

Temperatura – A sua variação pode afetar a velocidade de muitos processos, no qual, maiores temperaturas facilitam a difusão ao aumentarem a mobilidade das moléculas ou ainda incrementar o número de sítios ativos para adsorção (RHEINHEIMER, 2016).

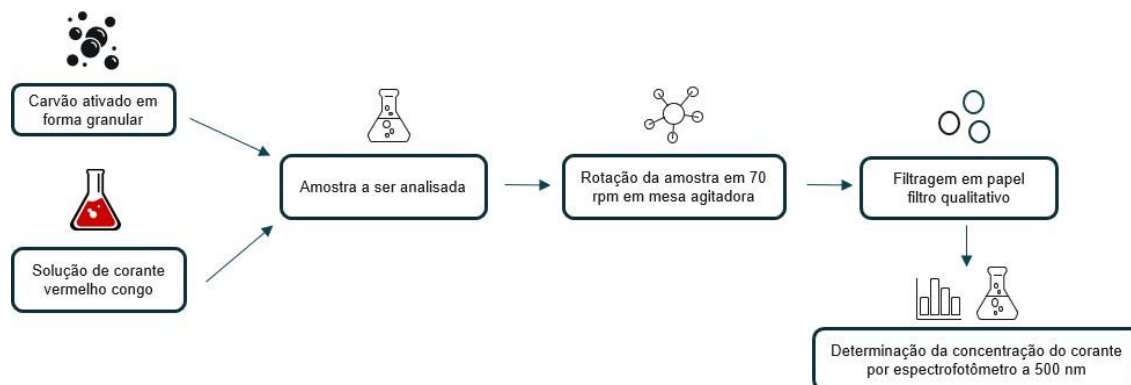
Massa do adsorvente – Quanto maior for a superfície externa por unidade de massa sólida, mais favorável será a adsorção (NASCIMENTO et al., 2014).

Concentração do adsorbato - Determina capacidade total de adsorção do sistema, quanto mais superfície disponível existir no meio, maior será a capacidade de adsorção pelo aumento da disponibilidade de sítios ativos. Por outro lado, o excesso de material adsorvente poderá acarretar a aglomeração das partículas sólidas, levando a diminuição da quantidade adsorvida (RHEINHEIMER, 2016).

3 METODOLOGIA

A metodologia empregada foi baseada no diagrama esquemático ilustrado na Figura 6.

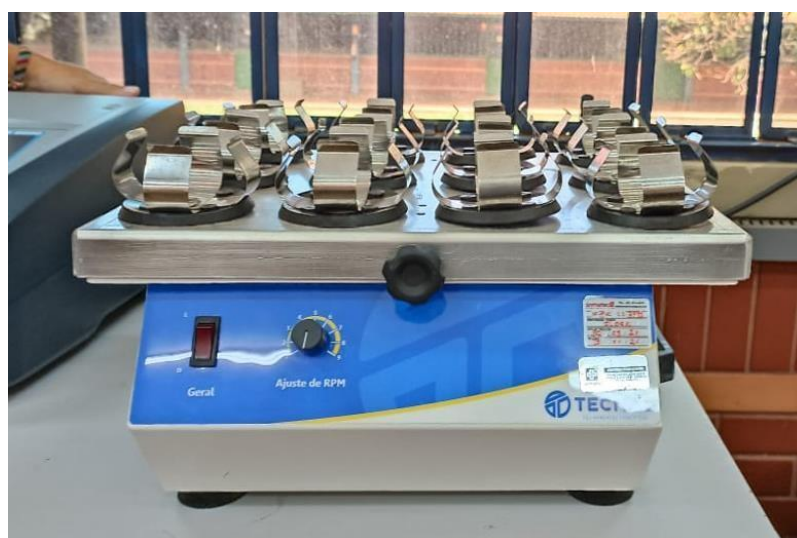
Figura 6 - Diagrama dos procedimentos metodológicos que serão abordados neste trabalho



Fonte: AUTORA (2022)

O teste foi realizado em uma mesa de agitação (Shaker TE 141), apresentado na Figura 7, com o carvão ativado produzido a partir da pirólise da casca de castanha do Pará na temperatura de 600 °C e taxa de aquecimento igual a 20 °C/min, na forma de pó, com granulometria de 0,45 mm. Este ensaio foi realizado no laboratório LARSEN- IFTO/Campus Palmas.

Figura 7 - Mesa de agitação Shaker TE 141



Fonte: AUTORA (2022).

A solução corante (Vermelho Congo), de fórmula química $C_{32}H_{22}N_6Na_2O_6S_2$ e peso molecular: 696.66 g/mol empregada no teste, teve o volume padrão de 30 mL

de solução em todos os testes. Após o teste de adsorção, as amostras foram filtradas em papel analítico e a concentração de corante resultante foi determinada em espectrofotômetro (Figura 8), a 500 nm.

Figura 8 - Espectrofotômetro



Fonte: AUTORA (2022).

Foi aplicado o planejamento experimental do tipo Delineamento de Faces Centradas (DFC) para se verificar os efeitos de duas variáveis independentes (massa de carvão e concentração da solução do corante) no teste de adsorção. A Tabela 2 demonstra os níveis dos fatores empregados. O pH da solução do corante foi ajustado a 7, com a agitação mantida igual a 70 rpm. O tempo de adsorção foi de 20 minutos.

Tabela 2 - Fatores e níveis empregados

Fatores		Níveis		
		-1	0	+1
X ₁	Massa do Carvão (g)	0,50	0,75	1
X ₂	Concentração do Corante (mg/L)	20	60	100

Fonte: AUTORA (2022)

Foram realizados 11 ensaios, sem repetição, sendo 3 deles no ponto central do Planejamento Experimental, de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 - Ordem dos Experimentos no DFC no Planejamento Experimental

Ordem dos Experimentos	X₁	X₂
1	-1	-1
2	1	-1
3	-1	1
4	1	1
5	-1	0
6	1	0
7	0	-1
8	0	1
9	0	0
10	0	0
11	0	0

Fonte: AUTORA (2022)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na etapa da adsorção do corante vermelho congo no carvão ativado gerado através da pirólise da Casca de Castanhado Pará, foram definidas três respostas para o planejamento, a saber: (a) absorbância do filtrado, (b) eficiência de remoção e (c) capacidade de adsorção.

As variáveis investigadas no teste foram a massa do carvão (X1) e a concentração do corante (X2). Os resultados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultado do teste de adsorção sob efeito das duas variáveis independentes (massa de carvão e concentração da solução do corante).

Experimentos	Massa do Carvão (g)	Concentração do Corante (mg/L)	Absorbância do filtrado	Eficiência de remoção (%)	Capacidade de adsorção (mg/g)
1	0,50	20	0,33	49,51	0,59
2	1	20	0,20	68,69	0,41
3	0,50	100	2,10	38,53	2,31
4	1	100	1,97	42,31	1,27
5	0,50	60	1,44	29,53	1,06
6	1	60	1,15	43,59	0,78
7	0,75	20	0,35	47,03	0,38
8	0,75	100	2,15	37,08	1,48
9	0,75	60	1,11	45,52	1,09
10	0,75	60	1,22	40,19	0,96
11	0,75	60	1,18	42,13	1,01

Fonte: AUTORA (2022)

A) Absorbância do carvão da casca de Castanha do Pará (a)

Por meio da regressão linear foi gerado o intervalo espectral da adsorção do vermelho congo e a construção do gráfico analítico linear da absorbância, o que nos permite observar a relação estatística desta variável em relação a outras. Na Tabela 5 são apresentados os efeitos da interação entre as variáveis para o resultado de absorbância das amostras filtradas.

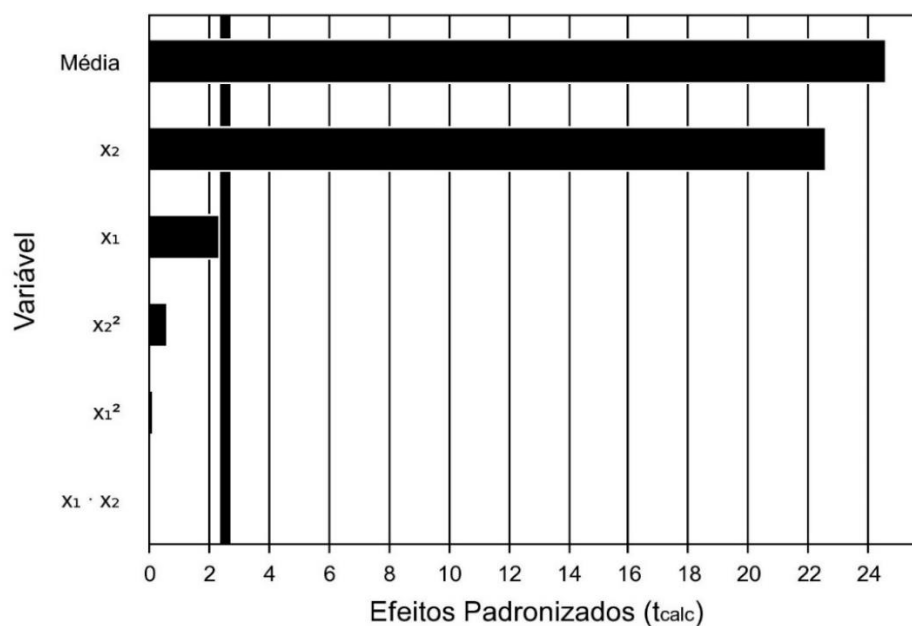
Tabela 5 - Coeficientes de regressão do Planejamento DFC.

Fatores	Coeficiente de Regressão	Erro Padrão	t-calculado	p-valor
Média	1,22	0,05	24,56	0,0000
X ₁	-0,09	0,04	-2,33	0,0670
X ₁ ²	0,01	0,06	0,12	0,9114
X ₂	0,89	0,04	22,55	0,0000
X ₂ ²	-0,04	0,06	-0,62	0,5598
X ₁ – X ₂	0,00	0,05	0,01	0,9921

Fonte: AUTORA (2022)

O Diagrama de Pareto ilustrado na Figura 9 é possível observar que a variável que apresentou o efeito mais significativos sobre absorbância do carvão ativado originário da pirólise da casca de Castanheiro Pará, está relacionada a concentração do corante (X₂).

Figura 9 - Diagrama de Pareto da absorbância do carvão da Casca da Castanha do Pará.



Fonte: AUTORA (2022)

Conforme a Equação 1 gerada por meio da análise de regressão, esta descreve a relação estatística entre os fatores de variância aqui expostos.

Equação 1 - Absorbância.

$$1,22 - 0,09X_1 + 0,01X_1^2 + 0,89X_2 - 0,04 X_2^2 + 0,00 X_1 X_2$$

Onde: X₁ = massa do carvão (g); X₂ = concentração do corante (mg/L).

A análise de variância (ANOVA) da absorbância das amostras de carvão ativado na adsorção do corante vermelho congo é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 - ANOVA para absorbância das amostras de carvão ativado na adsorção do vermelho congo.

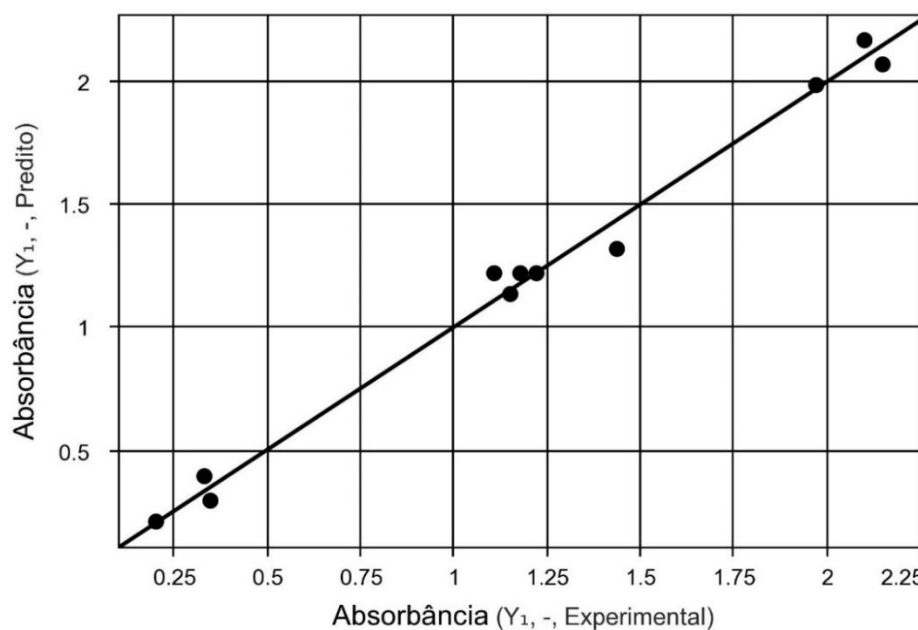
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{calc}	P-valor
Regressão	4,8	5	1,0	102,9	0,00005
Resíduos	0,0	5	0,0		
Falta de ajuste	0,0	3	0,0	4,4	0,19254
Erro puro	0,0	2	0,0		
Total	4,8	10			

$R^2 = 99,04\%$

Fonte: AUTORA (2022)

Com o modelo linear ajustado, demonstra que o coeficiente de regressão (R^2) alcançado foi de 0,9904, indicando um bom ajuste do modelo aos dados. Graficamente representada, a Figura 10 comprova que houve uma pequena diferença entre os valores observados e os valores previstos do modelo, confirmado pelo agrupamento de pontos próximo a linha representativa.

Figura 10 - Valores observados X Valores previstos para absorbância do carvão da Casca da Castanha do Pará.

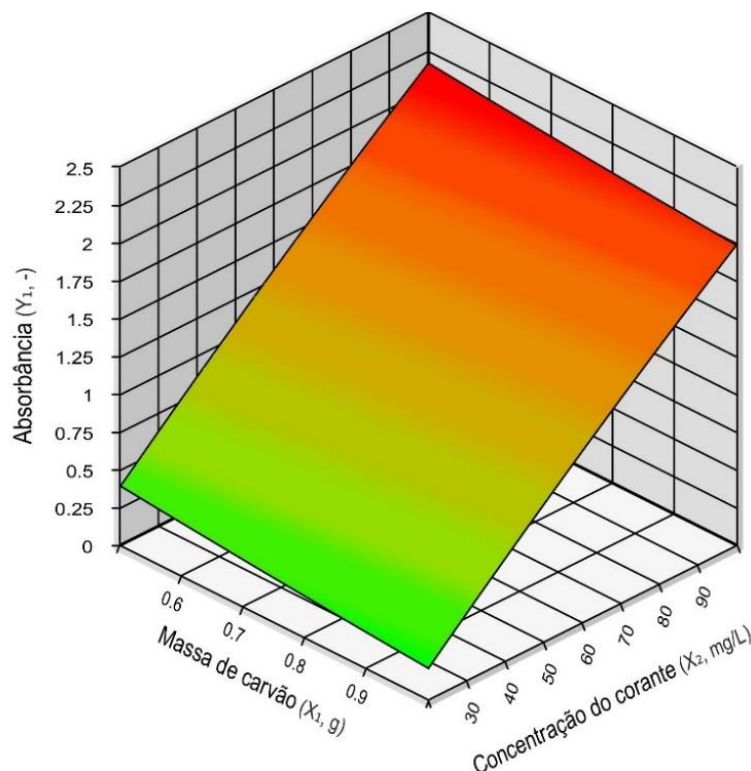


Fonte: AUTORA (2022)

O gráfico de superfície exposto e curvas de contorno gerado por meio do planejamento experimental é apresentado na Figura 11, observa-se que a capacidade

de absorbância foi alcançada em condições com alta concentração de corante, como demonstra as regiões destacadas em vermelho.

Figura 11 - Superfície de resposta para absorbância do teste de adsorção com utilização do carvão ativado da Casca da Castanha do Pará.



Fonte: AUTORA (2022)

B) Eficiência de Adsorção (b)

Por meio da regressão linear foi gerado o intervalo espectral da eficiência da adsorção do corante vermelho congo, o que nos permite observar a relação estatística desta variável em relação a outras (Tabela 7).

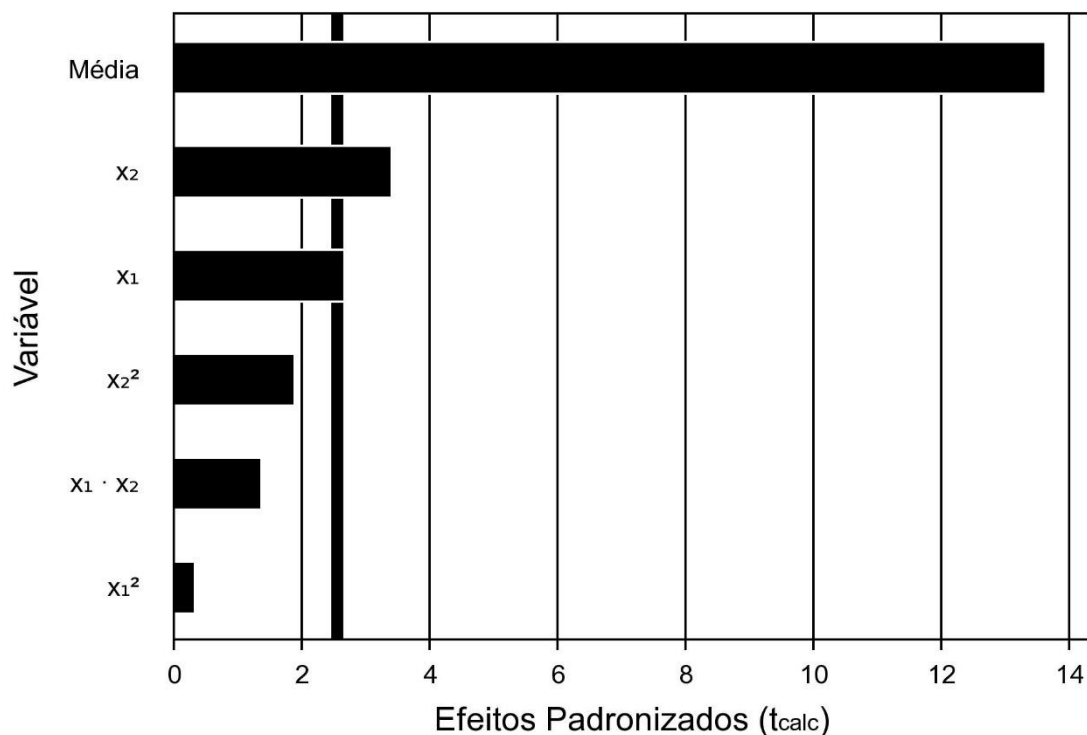
Tabela 7 - Coeficientes de regressão do Planejamento DFC para definição da eficiência de adsorção do carvão ativado da Casca da Castanha do Pará.

Fatores	Coefficiente de Regressão	Erro Padrão	t-calculado	p-valor
Média	39,72	2,92	13,62	0,0000
X ₁	6,17	2,32	2,66	0,0450
X ₁ ²	1,19	3,57	0,33	0,7534
X ₂	-7,88	2,32	-3,40	0,0193
X ₂ ²	6,68	3,57	1,87	0,1203
X ₁ – X ₂	-3,85	2,84	-1,35	0,2335

Fonte: AUTORA (2022)

O gráfico de Pareto representado pela Figura 12 demonstra o efeito significativo das variáveis concentração do corante (X_2) e massa do carvão (X_1) na eficiência de adsorção.

Figura 12 - Gráfico de Pareto da eficiência de adsorção do carvão da Casca de Castanha do Pará.



Fonte: AUTORA (2022)

Os valores de eficiência se situaram entre 29,53% e 68,69%, nota-se que a maior eficiência se apresentou no experimento 2, para a condição de 1g de carvão ativado e concentração de corante de 20 mg/L. A menor eficiência se apresentou no experimento 5, para a condição de 0,5 g de carvão ativador e 60 mg/L de concentração de corante. No qual, para a obtenção de maior eficiência se faz necessário a aplicação de massa elevada de carvão ativado e baixa concentração de corante.

C) Capacidade de Adsorção (c)

O grau de capacidade máxima de adsorção de um carvão ativado indica eficiência deste carvão nas condições em que este foi submetido. A Tabela 8 traz os dados resultantes da interação entre as variáveis deste estudo para o resultado de capacidade máxima de adsorção do carvão ativado originário da pirolise da Casca de

Castanha do Pará.

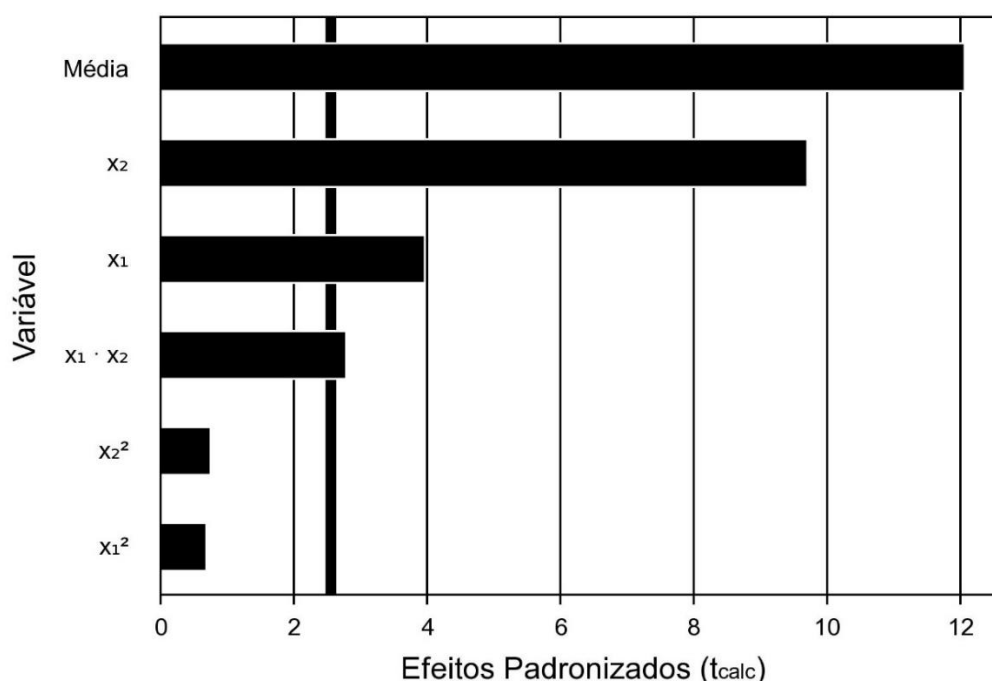
Tabela 8 - Coeficientes de regressão do Planejamento DFC para definição da capacidade máxima de adsorção do carvão ativado da Casca de Castanha do Pará.

Fatores	Coeficiente de Regressão	Erro Padrão	t-calculado	p-valor
Média	0,96	0,08	12,06	0,0001
X_1	-0,25	0,06	-3,97	0,0106
X_1^2	0,07	0,10	0,69	0,5182
X_2	0,61	0,06	9,73	0,0002
X_2^2	0,07	0,10	0,76	0,4842
$X_1 - X_2$	-0,22	0,08	-2,78	0,0387

Fonte: AUTORA (2022)

O gráfico de Pareto representado pela Figura 13 demonstra o efeito significativo das variáveis massa do carvão (X_1) e concentração do corante(X_2), demonstrando que tais variáveis influenciam consideravelmente no resultado.

Figura 13 - Gráfico de Pareto da Capacidade Máxima de Adsorção do carvão da Casca da Castanha do Pará.



Fonte: AUTORA (2022)

No resultado da capacidade máxima de adsorção(Q) conforme apresentado em Tabela 9, a massa do carvão (-0,25) em estudo indicou uma influência significativa para o modelo por apresentar um baixo p-valor correspondente a 0,0106, bem como a concentração do corante (-0,11) associada ao seu p-valor (0,0002).

Tabela 9 - ANOVA para absorbância das amostras de carvão ativado na adsorção do vermelho congo.

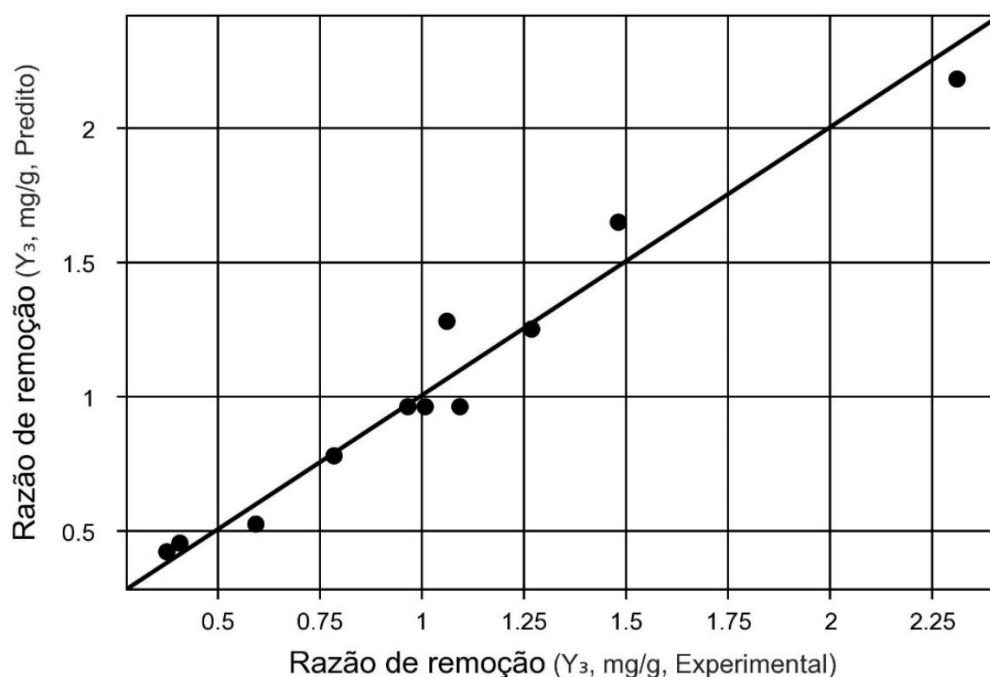
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{calc}	P-valor
Regressão	2,9	5	0,6	23,9	0,00168
Resíduos	0,1	5	0,0		
Falta de ajuste	0,1	3	0,0	8,8	0,10340
Erro puro	0,0	2	0,0		
Total	3,0	10			

$R^2 = 95,99\%$

Fonte: AUTORA (2022)

Com o modelo linear ajustado, demonstra que o coeficiente de regressão (R^2) alcançado foi de 0,9599, indicando um bom ajuste do modelo aos dados. Apontando que para a ANOVA, o modelo tem elevada significância sobre a precisão do método, como demonstra na Figura 14.

Figura 14 - Valores observados X Valores previstos da capacidade máxima de adsorção do carvão.

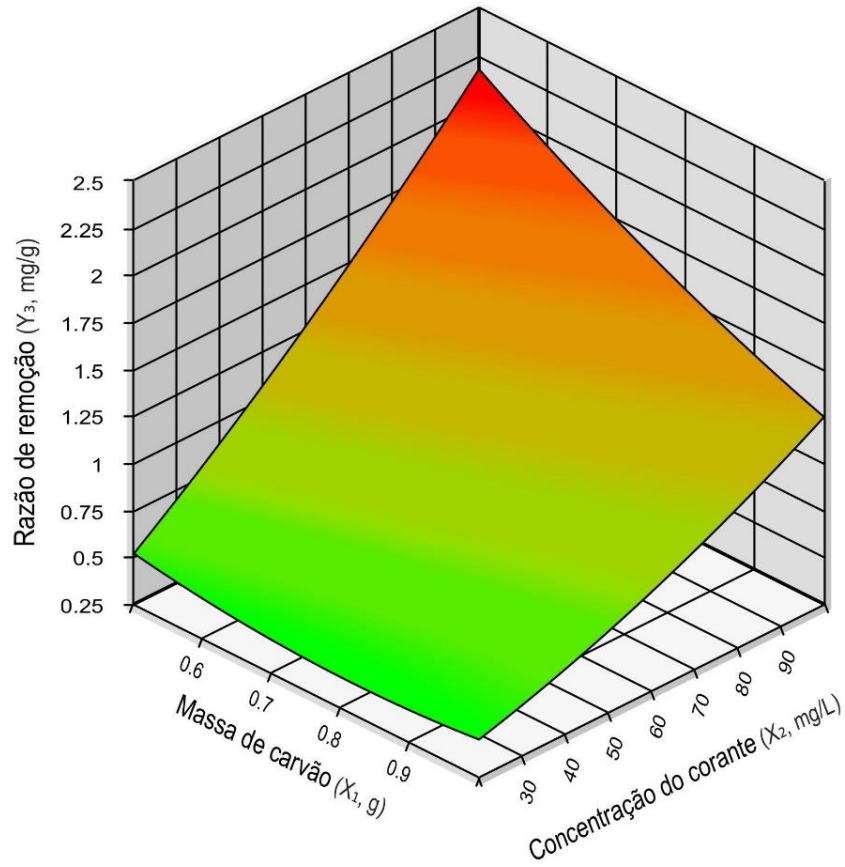


Fonte: AUTORA (2022)

A partir da superfície de resposta (Figura 15), observa-se que a capacidade máxima de adsorção do carvão ativado da Casca da Castanha do Pará foi obtida em circunstâncias de baixa quantidade de massa carvão e alta concentração de corante,

conforme a região ilustrada em vermelho.

Figura 15 - Gráfico de superfícies que representa a capacidade máxima de adsorção do carvão ativado em estudo.



Fonte: AUTORA (2022)

5 CONCLUSÃO

Baseado nos resultados obtidos com esta pesquisa podemos concluir que o teste de adsorção de índice de corante vermelho congo com a utilização do carvão ativado oriundo da pirólise da Casca da Castanha do Pará, demonstrou que a absorbância do filtrado está relacionada a concentração do corante, sendo alcançada em condições com alta concentração de corante.

Em relação a capacidade máxima de adsorção, o experimento demonstrou que com quantidade baixa de massa e alta concentração de corante a adsorção se torna mais eficiente, com efeito significativo das variáveis massa do carvão ativado e concentração do corante.

Constatando que para obtenção de maior eficiência na remoção do corante vermelho congo se faz necessário a aplicação de massa elevada de carvão ativado e baixa concentração de corante, como nota-se que o melhor resultado se apresentou no experimento 2, para a condição de 1g de carvão ativado e concentração de corante de 20 mg/L.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, José Jonas. Do extrativismo à domesticação: as possibilidades da castanha-do-pará. 2015. Tese (Doutorado em História Econômica) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. doi:10.11606/T.8.2015.tde-05082015-141612. Acesso em: 2021-08-17.

BAFANA, A.; DEVI, S.; CHAKRABARTI, T. Azo dyes: past, present and the future. *Environmental Reviews*, Ottawa, v. 19, p. 350-370, 28 set. 2011.

CASTRO, C.; GUERREIRO, M. C.; OLIVEIRA, L.C.A; GONÇALVES, M. Remoção de Compostos Orgânicos em Água Empregando Carvão Ativado Impregnado com Óxido de Ferro: ação combinada de adsorção e oxidação em presença de H₂O₂. *Química Nova*, v. 32, n. 6, p. 1561-1565, 2009.

Curbelo, F. D. da S. (2002). Estudo da remoção de óleo em águas produzidas na indústria de petróleo, por adsorção em coluna utilizando a vermiculita expandida e hidrofobizada. UFRN.

CLAUDINO, A. Preparação de carvão ativado a partir de turfa e sua utilização na remoção de poluentes. 2003. 90 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

DUARTE, Rosangela Viana de Lima. Preparação de compósitos de óxido de ferro e carvão ativado do ouriço (mesocarpo) da castanha do Brasil para remoção de corante azul de metileno em meio aquoso. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Amazonas, 2017. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/7252>. Acesso em: 2021-08-12.

KUNZ, A. et al. Novas Tendências no Tratamento de Efluentes Têxteis. *Química Nova*, v. 25, n. 1, p. 78-82, 2002.

NASCIMENTO, Ronaldo F. et al. Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais. 1. ed. Fortaleza: UFC, 2014.

SOUSA, Priscila A. R. d., 2015. Avaliação da adsorção de contaminantes emergentes pela Casca de Banana e Folhas da *Typha angustifolia* L. 2015. 97 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2015.

GUARATINI, Cláudia C. I.; ZANONI, Maria Valnice B. Corantes Têxteis. *Química Nova*, Araraquara, São Paulo, v. 23, n.1, p. 71-78, out. 1998/mar 1999.

REIS, L.G.T. Degradação do corante Vermelho do Congo em Solução Aquoso Através de Plasma Obtido por Eletrólise de Alta Tensão. Viçosa, MG, 2009.

SOTTORIVA, P.R.S. Degradação de corantes reativos utilizando-se processos oxidativos avançados. Curitiba, 2002. 114 p., Dissertação (Mestrado em Química) – Setor de Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná.

GUIMARÃES, F.S. Preparação de pigmentos híbridos a partir de corantes azo e compostos do tipo hidrotalcita. Salvador, 2010. 122 p., Dissertação (Mestrado em Química), Universidade Federal da Bahia.

GONÇALVES et al. Produção de carvão ativado a partir do bagaço e melaço de cana-de-açúcar. Acta Science Technology: Maringá, 2006.

RHEINHEIMER Martin Oscar Witzke. Remoção de Paracetamol por adsorção em carvão Ativado: Processo em Batelada e Coluna de Leito Fixo. 2016. 57 f. Trabalho de Conclusão de curso (Bacharel em engenharia química) - Universidade Federal de Rio Grande, Porto Alegre, 2016.

BOTERO, W. G. Caracterização de lodo gerado em estações de tratamento de água: perspectiva de aplicação agrícola. Quim. Nova, Vol. 32, No. 8, 2018-2022, 2009.

SANTOS, K. G. Aspectos fundamentais da pirólise de biomassa em leito de jorro: fluidodinâmica e cinética do processo. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2011.

BRIDGWATER, A.V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. Biomass and Energy, v. 38, p. 68-94, 2012.

SANTOS, João Paulo de Oliveira et al. (org.). Resíduos Sólidos: impactos socioeconômicos e ambientais. Recife: EDUFRPE, 2018. 578 p., il.

FRANCO, Luciana C.A.C. A gestão de efluentes das indústrias têxteis e os princípios da responsabilidade social em Sergipe 2008. Dissertação de Mestrado em Saúde e Ambiente. Universidade Tiradentes, Aracaju, 200.