

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**CURSO SUPERIOR EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**ROSIELE ATAIDE DOS SANTOS**

**DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO PARA DEGRADAÇÃO DO CORANTE**  
**RODAMINA B**

**MACEIÓ-AL**

**2024**

**ROSIELE ATAIDE DOS SANTOS**

**DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO PARA DEGRADAÇÃO DO CORANTE  
RODAMINA B**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Química, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dra. Vânia de Lourdes das Graças Teles

Coorientador: Dr. Rodrigo da Silva Viana

**MACEIÓ-AL**

**2024**

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**  
Bibliotecária: Girlaine da Silva Santos – CRB-4 – 1127

S237d Santos, Rosiele Ataíde dos.  
Desenvolvimento de método para degradação do corante rodamina B /  
Rosiele Ataíde dos Santos. – 2024.  
48 f.: il.: color

Orientadora: Vânia de Lourdes das Graças Teles.  
Coorientador: Rodrigo da Silva Viana.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química) –  
Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia, Maceió, 2024.

Bibliografia: f. 44 - 48.

1. Corantes e tingimento. 2. Indústria têxtil. 3. Magnetita. 4. Rodamina B.  
I. Título.

CDU: 547.97:677.077

## Folha de Aprovação

**ROSIELE ATAIDE DOS SANTOS**

### **Desenvolvimento de Método para Degradação do Corante Rodamina B**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à banca examinadora do curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Alagoas e aprovada em 25 de Março de 2024.

#### **Banca Examinadora:**

Documento assinado digitalmente  
 **VANIA DE LOURDES DAS GRACAS TELES**  
Data: 25/03/2024 15:37:22-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup> Vânia de Lourdes das Graças Teles (Universidade Federal de Alagoas)

Documento assinado digitalmente  
 **RODRIGO DA SILVA VIANA**  
Data: 26/03/2024 13:56:58-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Coorientador: Dr. Rodrigo da Silva Viana (Universidade Federal de Alagoas)

Documento assinado digitalmente  
 **LIVIA MARIA DE OLIVEIRA RIBEIRO**  
Data: 26/03/2024 11:25:58-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr.<sup>a</sup> Livia Maria de Oliveira Ribeiro (Universidade Federal de Alagoas)

Documento assinado digitalmente  
 **MARITZA MONTOYA URBINA**  
Data: 26/03/2024 10:33:33-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup> Maritza Montoya Urbina (Universidade Federal de Alagoas)

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me concedido essa oportunidade de estar cursando a graduação de Engenharia química, se não fosse sua permissão eu não teria trilhado esse sonho que desde os meus 10 anos de idade brilharam em meu coração primeiramente. Estou muito grata por Deus ter me dado a oportunidade e de ter me ajudado a persistir em meus sonhos e objetivos na graduação.

Quero expressar minha gratidão ao meu Pai, que não está mais aqui para ver a profissional que me tornei, mas eu sei que ele está muito orgulhoso de mim e do que eu já trilhei até aqui. Agradeço todo apoio dado por esse homem que foi essencial para minha vida. Além disso, agradecer minha mãe que também me apoiou e me ajudou com minha filha e que sempre me incentivou a estudar a caminhar na linha dos meus objetivos, te amo muito mãe por tudo que a senhora proporcionou na minha vida inteira. A minha irmã por também fazer parte dessa história a qual também agregou na ajuda com minha filha e que sempre a amou de forma acolhedora, te amo muito e estamos juntas apesar de qualquer coisa. Agradeço também a minha filha por me incentivar a seguir meus sonhos e ela sempre foi o escape das minhas desistências, pois ao olhar para ela vejo que tenho que seguir minha carreira e traçar meus objetivos. Te amo demais minha Julinha. Agradeço também ao meu noivo e futuro esposo Thales Fernandes, que me ajudou me dando forças e incentivando meus estudos, e agradeço por ter me ouvido e me ajudado com palavras de superação e conforto, amo muito sua vida e obrigada por tudo.

Não poderia deixar de agradecer à minha orientadora, a Prof<sup>a</sup> Dra. Vânia de Lourdes das Graças Teles que teve paciência comigo que me ajudou muito em todos os momentos e teve disponibilidade e ideias a qual agregarem em minha vida profissional, você foi muito importante para mim, muito obrigada. Agradeço ao Dr. Rodrigo da Silva Viana, que também me ajudou com os procedimentos e análises do meu trabalho, sem ele não seria possível concluir esse trabalho e agradeço muito pela sua paciência e ensinamento.

Não esquecendo também da minha amiga Regina Brandão que me incentivou e me ajudou estudando comigo, me apoiando e incentivando cada momento na graduação tanto para momentos felizes e tristes, mais sempre estava ali como braço direito. Agradeço também ao meu amigo Venâncio Vitor, que me ajudou nos conhecimentos de sua carreira acadêmica proporcionando momentos de alegria e aprendizado onde pretendo levar toda a vida.

Agradeço também a todos os professores que passaram por minha graduação me proporcionando conhecimento e toda minha carreira acadêmica.

## RESUMO

A indústria têxtil, que compreende as operações de purga, mercerização, desengomagem, alvejamento e tingimento, utiliza grandes volumes de água doce e produtos químicos. Durante as etapas de tingimento são utilizados diversos corantes sintéticos que contribuem para a geração de efluentes líquidos com carga contaminante que pode provocar sérios danos, não somente ao meio ambiente aquático como também à saúde humana. E devido ao perfil dos efluentes do setor têxtil, o processo de tratamento envolve diferentes etapas para atendimento aos padrões determinados pela legislação vigente. Sob este aspecto e em consonância com os princípios da engenharia verde, é crescente o número de pesquisas na área de nanotecnologia para contribuir com as etapas do tratamento para a degradação ou adsorção dos corantes no efluente de modo eficiente, seguro, de baixo custo e empregando o mínimo de energia e reagentes. Neste sentido, este estudo propõe sintetizar “nanopartículas magnéticas” (NPMs) de Oxido de Ferro III ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) e avaliar sua eficiência na degradação fotocatalítica do corante rodamina B. A síntese das NPMs  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  consistiu da reação do  $\text{Fe}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  como precursor e extrato vegetal de batata e macaxeira como agente redutor e estabilizante. Os materiais obtidos foram caracterizados pelas técnicas de Difração de Raios x (DRX) e Espectrometria de Energia Dispersiva de Raio X (EDX). Embora a síntese a partir do extrato da macaxeira tenha apresentado maior rendimento a fase predominante foi a goethita, enquanto para o extrato de batata a fase majoritária foi a magnetita  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , objeto do presente estudo. A otimização da fotocatalise, empregando magnetite sintética, consiste no planejamento fatorial  $2^2$  com ponto central para avaliar a influência da quantidade de nanopartículas e o tempo necessário na degradação do corante rodamina B. Para isso, foram utilizados 3,0 mL de solução do corante rodamina B, a  $10 \text{ mg L}^{-1}$  (pH = 5) e os resultados mostraram que o tempo de 30 min e as menores massas foram as melhores condições para degradação do corante rodamina B, sob exposição ultravioleta (UV). Esse mesmo material degrada o corante sob radiação solar. As condições otimizadas foram aplicadas para NPMs  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , sintetizada a partir do extrato de batata, em duplicata, sob radiação UV. Os resultados mostraram visualmente a degradação do corante rodamina B, com posterior avaliação da absorbância por espectrofotometria UV-VIS na faixa de 400 a 700 nm. Portanto, as NPMs  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  a partir do extrato da batata foram eficientes, de baixo custo, de simples síntese, sustentável e promissor para o tratamento de efluentes da indústria têxtil.

**Palavras- Chaves:** corantes industriais, síntese verde, magnetita, fotocatalise

## Sumário

LISTA DE FIGURAS .....	11
LISTA DE TABELAS .....	12
SIGLAS E ABREVIATURAS .....	13
1. INTRODUÇÃO .....	14
2. OBJETIVOS.....	16
2.2. Geral.....	16
2.3. Específicos .....	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1. A indústria têxtil no Brasil.....	17
3.2 Corantes: definição e classificação .....	18
3.3. Nanotecnologia Aplicada ao tratamento de efluentes têxteis .....	21
3.4 Síntese Verde .....	21
3.5. Nanopartículas Magnéticas de Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> .....	22
3.6. Fotocatálise .....	23
3.7 Técnicas Analíticas .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
3.7.1 Difração de raios x (DRX) .....	26
3.7.2 Espectrometria de energia dispersiva de raios X (EDX).....	27
3.7.3 Espectrofotometria UV-VIS (UV-VIS) .....	27
4. METODOLOGIA .....	28
4.1 Materiais e reagentes .....	28
4.2 Síntese das NPM Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	28
4.3 Caracterização das NPMs Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> .....	29
4.4 Fotocatálise do corante rodamina B.....	29
4.5.Tratamento de dados .....	31
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	32

5.1 Síntese verde das NPMS $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .....	32
5.2 Caracterização das NPMS $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .....	33
5.3. Otimização de processo de fotocatalise empregando NPMS $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .....	36
5.4 Aplicação das NPMS $\text{Fe}_3\text{O}_4$ obtidas a partir das batatas .....	41
6. PERSPECTIVAS FUTURAS .....	43
7. CONCLUSÃO .....	44
REFERÊNCIAS .....	45

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> : Etapas Características do Processamento de Tecidos de Algodão e Sintéticos .....	18
<b>Figura 2</b> : Estrutura Rodamina B.....	20
<b>Figura 3</b> : Síntese Verde para Obtenção das NPMs .....	22
<b>Figura 4</b> : Mecanismo para a Formação de NPMs Revestidas com Amido.....	23
<b>Figura 5</b> : Representação Esquemática do Processo de Fotodegradação do Corante. ....	26
<b>Figura 6</b> : Difratômetro de Raios X de Modelo XRD-7000 da Shimadzu .....	29
<b>Figura 7</b> : Espectrômetro, O Modelo EDX-700 da Shimadzu .....	29
<b>Figura 8</b> : Oxidação dos íons Férricos.....	32
<b>Figura 9</b> : Diafratograma Mostrando a Fase da Goethite .....	34
<b>Figura 10</b> : Difratograma Mostrando a Fase da Magnetita. ....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>Figura 11</b> : Difratograma Obtido Através do Extrato da NPMs (Batata).....	34
<b>Figura 12</b> : Espectro EDX Obtido para o Material da Síntese a partir da Síntese da Batata ..	35
<b>Figura 13</b> : Amostra dos Experimentos do Planejamento 2 <sup>2</sup> .....	37
<b>Figura 14</b> : Espectro de Absorbância da Rodamina B para os Ensaio do Planejamento Fatorial 2 <sup>2</sup> .....	38
<b>Figura 15</b> : Gráfico de Pareto, para Análise do Planejamento Fatorial 2 <sup>2</sup> .....	39
<b>Figura 16</b> : Superfície de Resposta de Contorno, Análise da Absorbância.....	40
<b>Figura 17</b> : Mapa de Contorno, da Absorbância .....	40
<b>Figura 18</b> : Degradação do Corante Sob Radiação Solar .....	41
<b>Figura 19</b> : Degradação do Corante Rodamina B pelas NPMs Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -(Batata) .....	42
<b>Figura 20</b> : Espectro UV-VIS, para Avaliar a Degradação do Corante Rodamina B, Empregando as NPMs-(Batata) .....	42

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Planejamento Fatorial $2^2$ com o ponto Central para Avaliação da Degradação do Corante Rodamina B .....	30
<b>Tabela 2:</b> Porcentagem dos Elementos Determinados por EDX nas Nanopartículas Obtidas do Extrato de Batata .....	36
<b>Tabela 3:</b> Planejamento Fatorial $2^2$ com Ponto Central para Avaliação da Degradação do Corante Rodamina B .....	37
<b>Tabela 4:</b> Dados da Análise de Variância (ANOVA) para o Planejamento Fatorial $2^2$ com Ponto Central .....	38

## **SIGLAS E ABREVIATURAS**

ABIT - Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção

DQO – Demanda Química de Oxigênio

DLS – Espalhamento de Diâmetro de Luz

DRX - Difração de Raios X

EDX – Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios X

LUMIAM - Laboratório de Materiais Luminescentes e Estudos Ambientais

MFA - Microscopia de Força Atômica

NPMs - Nanopartículas Magnéticas

RMN - Ressonância Magnética Nuclear (RMN)

TEM - Microscopia Eletrônica de Transmissão

UV – Ultravioleta

VSM - Magnetometria de Amostra Vibrante

XAS - Espectroscopia de absorção de raios-X

## 1 INTRODUÇÃO

As indústrias têxteis requerem elevado consumo de energia e água doce em seu processo produtivo e, dentre os diferentes segmentos industriais, o efluente do setor têxtil tem sido reconhecido como o mais poluente (PEIXOTO, 2013). Além do elevado volume de efluente gerado nos processos, há também a problemática da presença dos corantes e de outros contaminantes químicos resistentes e persistentes aos processos de tratamento (QUEIROZ, 2016). Por isso, no tratamento de efluentes com corantes, vários processos têm sido propostos como a floculação, a precipitação, coagulação e processos de oxidação, gerando resíduos que também necessitam de tratamento, sendo de maior custo e de eficiência limitada (PEIXOTO, 2013).

Como parte dos processos industriais do segmento têxtil, os corantes presentes nos efluentes influenciam de maneira direta nos ecossistemas aquáticos e indireta na saúde humana. O perfil de efluente têxtil é caracterizado pela alta concentração de corantes durante o processo de tingimento, pelo pH alcalino, Demanda Química de Oxigênio (DQO) e presença de metais como Cobre (Cu), Cádmio (Cd), Cromo (Cr), Zinco (Zn), Chumbo (Pb) e até Mercúrio (Hg). Os corantes sintéticos são compostos orgânicos obtidos por processos de síntese derivados do petróleo, com composição química definida que pode ser semelhante aos pigmentos inorgânicos e pigmentos naturais. O grande volume de água utilizada para o processo de tingimento com corantes sintéticos é preocupante devido aos tratamentos para atendimento às legislações vigentes e aos impactos negativos ao meio ambiente, tais como aumento da turbidez, presença de metais tóxicos e diminuição do oxigênio dissolvido até o desequilíbrio do ecossistema aquático.

Para o tratamento de efluentes contaminados por compostos de baixa concentração é utilizado o processo Fenton, que emprega óxidos de ferro para tratamento de efluentes que não podem ser eliminados por rotas usuais. Por exemplo, a magnetita é um mineral ferromagnético que contém ferro em dois estados de oxidação, Fe(II) e Fe(III) cuja aplicação no processo Foto – fenton heterogêneo mostra resultados satisfatórios (FENTON, 1894). A aplicação do processo Fenton tem sido objeto de muitos estudos por apresentar boa eficiência na degradação de muitos compostos com baixa toxicidade. Apesar de suas vantagens, o processo Fenton em escala industrial ainda não tem sido usado de forma intensiva, devido, sobretudo, ao fato de apresentar um grande potencial para geração de lodo, pela precipitação de íons  $Fe^{3+}$ .

A produção de lodo também é preocupante, pois é uma consequência da demanda pelo

tratamento dos efluentes têxteis, uma vez que apontam que o maior volume de águas residuais industriais no mundo são provenientes da indústria de tingimento têxtil (LAI *et al.*, 2023). Com esta expansão do setor, a demanda para o desenvolvimento de tecnologias no tratamento dos efluentes é crescente, uma vez que o uso de diferentes corantes sintéticos apresenta uma maior complexidade da matriz e, conseqüentemente, maior desafio no tratamento.

Ainda como um processo oxidativo avançado, a fotocatalise heterogênea pode ser empregada no tratamento de águas residuais da indústria têxtil, cujas reações catalíticas ocorrem sob o efeito da radiação. Esta última destaca-se pela ativação de um óxido semiconductor por luz solar ou artificial, gerando radicais  $\bullet\text{OH}$ , os quais são altamente oxidantes dos compostos orgânicos, como os corantes sintéticos.

Estudos científicos apontam o emprego da nanotecnologia no tratamento dos efluentes têxteis, sendo as nanopartículas magnéticas (NPMs) muito promissoras (GUO *et al.*, 2023; Sharma *et al.*, 2019). O revestimento do núcleo magnético é recomendado para formar estruturas núcleo-casca, que melhoram a estabilidade coloidal, aumenta a dispersão em água e facilita a funcionalidade química com a ligação de outras moléculas (GUO *et al.*, 2023). Neste sentido, a importância deste trabalho está relacionada aos estudos da degradação do corante rodamina B, como um dos corantes presentes em efluentes têxteis, empregando as NPMs de magnetita Óxido de Ferro III ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) obtidas via síntese verde sob radiação ultravioleta (UV).

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Geral

Sintetizar e caracterizar nanopartículas magnéticas de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) via síntese verde para avaliar a degradação do corante rodamina B em águas por fotocatalise heterogênea.

### 2.2 Específicos

- Sintetizar  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  empregando a batata inglesa e a macaxeira como agentes redutores e estabilizantes;
- Caracterizar as NPMs obtidas por técnicas de espectroscopia de raios x;
- Otimizar processo de fotocatalise heterogênea empregando a magnetita sintética na degradação do corante rodamina b com exposição à radiação UV;
- Aplicar as NPMs sintetizadas na degradação do corante rodamina B;
- Avaliar a eficiência das NPMs na degradação do corante rodamina B em exposição à radiação solar.

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

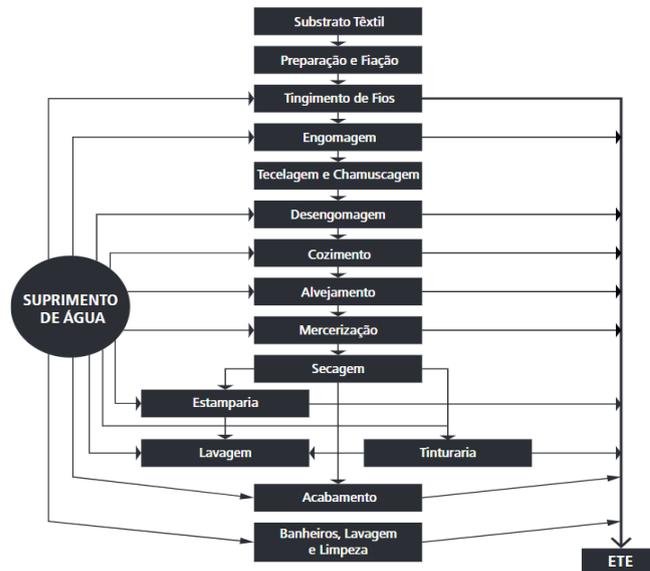
### 3.1 A indústria têxtil no Brasil

O Brasil apresenta a quinta maior indústria têxtil do mundo e a quarta no segmento de vestuário, cuja produção média, em toneladas, é da ordem de 1,3 milhões de têxteis e 6,71 milhões de vestuário (FIEG, 2018). Conforme dados informados pela Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção (ABIT), o Brasil tem uma produção volumosa, tanto para o consumo próprio quanto para a exportação, muito embora o seu maior consumidor seja o mercado interno.

Contudo, apesar de todos os benefícios econômicos, esse segmento industrial é um dos maiores consumidores de água doce, quando se compara aos diferentes segmentos industriais. Este requisito reflete diretamente no volume de efluentes, cujos processos de tinturaria e acabamento são os principais geradores, ou seja, geração de aproximadamente 50 a 100 L de efluente por quilo de tecido produzido (SATTAR, 2022). Sob o ponto de vista ambiental, etapas de tingimento são as mais preocupantes devido à variedade e complexidade dos produtos químicos empregados no processo. Dentre todos os compostos químicos empregados no processo, os corantes têm atraído mais atenção, devido ao seu alto potencial de poluição dos recursos hídricos e impactos ambientais (ARSLAN-ALATON *et al.*, 2008).

O gerenciamento de processos é utilizado por muitas indústrias para controlar a execução e organização das etapas gerais da indústria têxtil (FIEG, 2018). Sabe-se que ela conta com várias etapas internas, desde a gestão de pessoas, recebimento de matéria-prima até a produção em si (PRADO, 2019). Devido a essas etapas, contar com a gestão de processos é fundamental. Na prática, cada etapa é considerada individualmente e analisam-se como os diferentes processos afetam uns aos outros. A Figura 1 apresenta as características do processo produtivo de tecidos em algodão e sintéticos.

**Figura 1** - Etapas Características do Processamento de Tecidos de Algodão e Sintéticos



Fonte: Freitas (2002)

A resolução CONAMA 357/2005 obre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. No artigo 14, item (e) desta resolução aponta que “corantes provenientes de fontes antrópicas: virtualmente ausentes” (BRASIL, 2005)

Os parâmetros podem variar dependendo do tipo de corpo d’água e das regulamentações específicas de cada país ou região. A medição da cor é crucial pois a cor da água é um indicador da presença de matéria orgânica, sedimentos ou substância dissolvidos, e sua medição é importante para avaliar a qualidade e a saúde do ecossistema aquático. Logo, os parâmetros de qualidade da água depende dos tipos de água, tais como água doce, salobra e salina. Em complemento e alteração de alguns parâmetros físicos, químicos, biológicos, a resolução CONAMA 430/2011 trouxe condições, padrões e gestão de lançamento de efluentes industriais.

### 3.2 Corantes: definição e classificação

A utilização de corantes pelo homem é uma prática bem antiga, cujos registros de seu uso em tecidos e hieróglifos egípcios são datados de 2.500 anos A.C. Os corantes utilizados até o século XIX eram de origem natural, como fontes os moluscos, insetos, vegetais e outros tipos de matéria orgânica. Porém, em 1856 o primeiro corante sintético (malveína) foi descoberto pelo químico inglês William H. Perkin, revolucionando a formulação e fabricação de corantes, permitindo sintetizar uma grande quantidade de corantes, com diferentes tonalidades e fórmulas

em escala industrial (ZOLLINGER, 1987).

Os corantes sintéticos se encaixam na categoria de poluentes emergentes, que são classificados como qualquer substância química que não foi inserida em programas de monitoramento, nem em alguma legislação pertinente a qualidade ambiental, mas estão constantemente sendo envolvidas ou introduzidas no ambiente devido às atividades antrópicas (HORVAT *et al.*, 2012).

Atividades industriais do setor têxtil, couro, cosméticos, papel, impressão e alimentícia utilizam corantes sintéticos para colorir seus produtos (SHARMA *et al.*, 2011). Mais de 10 mil corantes sintéticos são produzidos em escala industrial, sendo que aproximadamente 2 mil encontram-se disponíveis para o segmento têxtil (DALLAGO *et al.*, 2005; RODRIGUES, 2003).

Corantes têxteis sintéticos foram desenvolvidos com o objetivo de aumentar a resistência à umidade nas fibras celulósicas, de forma a produzir corantes insolúveis em água e que pudessem ser mais facilmente aderidos às fibras de tecidos de algodão (SATTAR, 2022). A sua estrutura complexa pode ser de acordo com sua estrutura química e/o u pelo modo de fixação à fibra têxtil (SATTAR, 2022). Como exemplo, têm-se o tingimento de poliéster por um corante azo disperso ou o tingimento de algodão pelo corante ftalocianina (SATTAR, 2022).

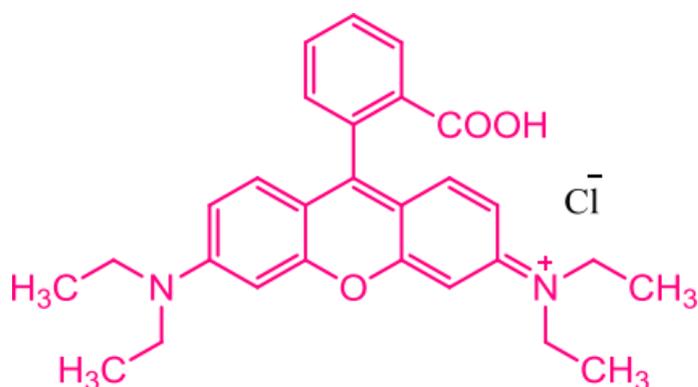
Existem diversos tipos de corantes têxteis, que podem ser classificados de acordo com sua estrutura química ou pelo método de fixação nas fibras dos tecidos. De acordo com Guaratini e Zanoni (2000) os corantes podem ser classificados como:

- **Corantes Ácidos:** corantes solúveis, possuem pelo menos um grupo sulfônico ( $-SO_3^-$ ) em sua estrutura química, e apresentam uma forte afinidade com a fibra celulósica do tecido;
- **Corantes Azoicos:** corantes insolúveis em água, neste caso a fibra tem que ser impregnada com um agente de acoplagem fixação do corante. Eles possuem no mínimo um grupo azo em sua constituição ( $-N=N-$ );
- **Corantes Branqueadores:** Apresentam grupos carboxílicos azometino ( $-N=CH-$ ) ou etilênicos ( $-CH=CH-$ ) ligados aos anéis aromáticos em suas estruturas químicas;
- **Corantes a Cuba:** São insolúveis em água, são aplicados com ditionito em solução alcalina para se fixar à fibra de tecido. Apresentam mais de um anel aromático em sua estrutura química;
- **Corantes Diretos:** corantes solúveis em água que possuem mais de uma cadeia química azo, interagindo com a fibra de tecido por forças de Van der Waals;
- **Corantes Dispersos:** corantes insolúveis em água e aplicados através de suspensão. Não apresentam grupos azos em suas cadeias químicas;

- **Corantes de Enxofre:** São insolúveis em água e apresentam em sua estrutura química polissulfetos ( $-Sn-$ );
- **Corantes Pré-Metalizados:** Apresentam íons metálicos ligados em suas estruturas químicas;
- **Corantes Reativos:** Possuem grupos químicos eletrofílicos reativos, que formam ligações covalentes com os principais sítios de ligação da fibra do tecido. Contêm a função antraquinona e azo como grupos cromóforos.

Nos estudos voltados para a degradação de corantes orgânicos, a rodamina B (9-(2-carboxifenil)-6-(dietilamino)xanteno-3-ilidieno]dietilamônio cloreto) é classificado pelos compostos orgânicos xanteno, Figura 2, se destaca como corante modelo devido a sua forte absorção na região do visível ( $\epsilon = 106000 \text{ cm}^{-1} \text{ mol L}^{-1}$ ) e a sua estabilidade em uma ampla faixa de pH (SCHÄFER *et al.*, 2007). A rodamina B é um importante corante orgânico pertencente à classe dos xantenos, altamente solúvel em água e empregada em diversas indústrias como a indústria têxtil, de papel, plástico, tintas etc (HU *et al.*, 2013).

**Figura 2** - Estrutura Rodamina B



Fonte: SINGH; PARVEEN; GUPTA, 2018.

A rodamina B é um corante carcinógeno e causa efeitos prejudiciais aos seres humanos quando em contato com a pele e olhos (SINGH; PARVEEN; GUPTA, 2018). Também provoca estresse oxidativo ao ser ingerido e pode se acumular na mitocôndria, prejudicando a cadeia respiratória (SAFITRI; INDRAWAN; WINARSIH, 2015). A estrutura complexa e estabilidade da Rodamina B a torna resistente à degradação (HU *et al.*, 2013), sendo necessária a utilização de métodos alternativos de maior eficiência como os processos oxidativos avançados.

### 3.3 Nanotecnologia Aplicada ao tratamento de efluentes têxteis

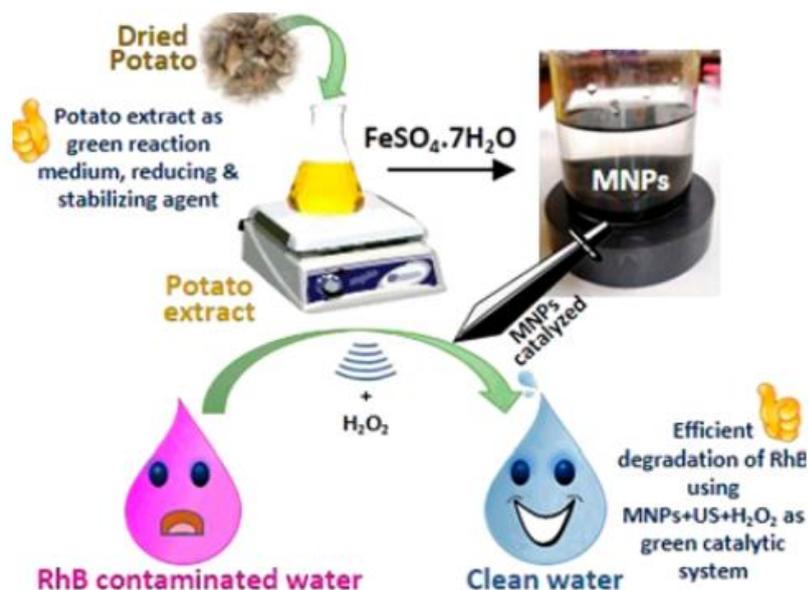
Ao analisar o tratamento de efluentes têxteis, não há um sistema geral de tratamento para efluentes com alta coloração. Existem inúmeras formas de tratamento e, devido à complexidade de corantes, são muitas vezes de alto custo. Portanto, muitos estudos têm-se concentrado em aumentar a eficiência das tecnologias já amplamente conhecidas, tornando os métodos mais sustentáveis, simples e de maior custo-benefício.

O grande emprego dos corantes sintéticos nos processos de tingimento de fibras mais modernas tem gerado um efluente de maior complexidade. Este é um desafio para a comunidade científica no que tange ao desenvolvimento de tecnologias ecologicamente corretas, capazes de remover/degradar completamente esses compostos (BRILLAS; MARTÍNEZ-HUITTLE, 2015; MEHRJOUEI *et al.*, 2015). Neste contexto, a literatura apresenta estudos das propriedades redox de nanopartículas que podem ser aplicadas em processos de tratamento de efluentes industriais em águas e solos contaminados baseados na degradação química ou fotoquímica de poluentes orgânicos (BRILLAS; MARTÍNEZ-HUITTLE, 2015; MEHRJOUEI *et al.*, 2015).

### 3.4 Síntese Verde de nanomateriais

A Síntese Verde é um referencial muito comum para obtenção de Nanopartículas Partículas magnéticas (NPMs), devido a redução de íons metálicos pelas moléculas presentes em extratos de vegetais (SHARMA,2019). A Figura 3 apresenta um modelo de síntese a partir de extratos vegetais rico em amido, que, ao adicionar sulfato de ferroso pode-se obter as NPMs  $Fe_3O_4$ . Neste trabalho, os autores aplicaram as NPMs, peróxido e sonicação para a degradação do corante Rodamina B.

**Figura 3** - Síntese Verde para Obtenção das NPMs  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  empregando extrato de batata



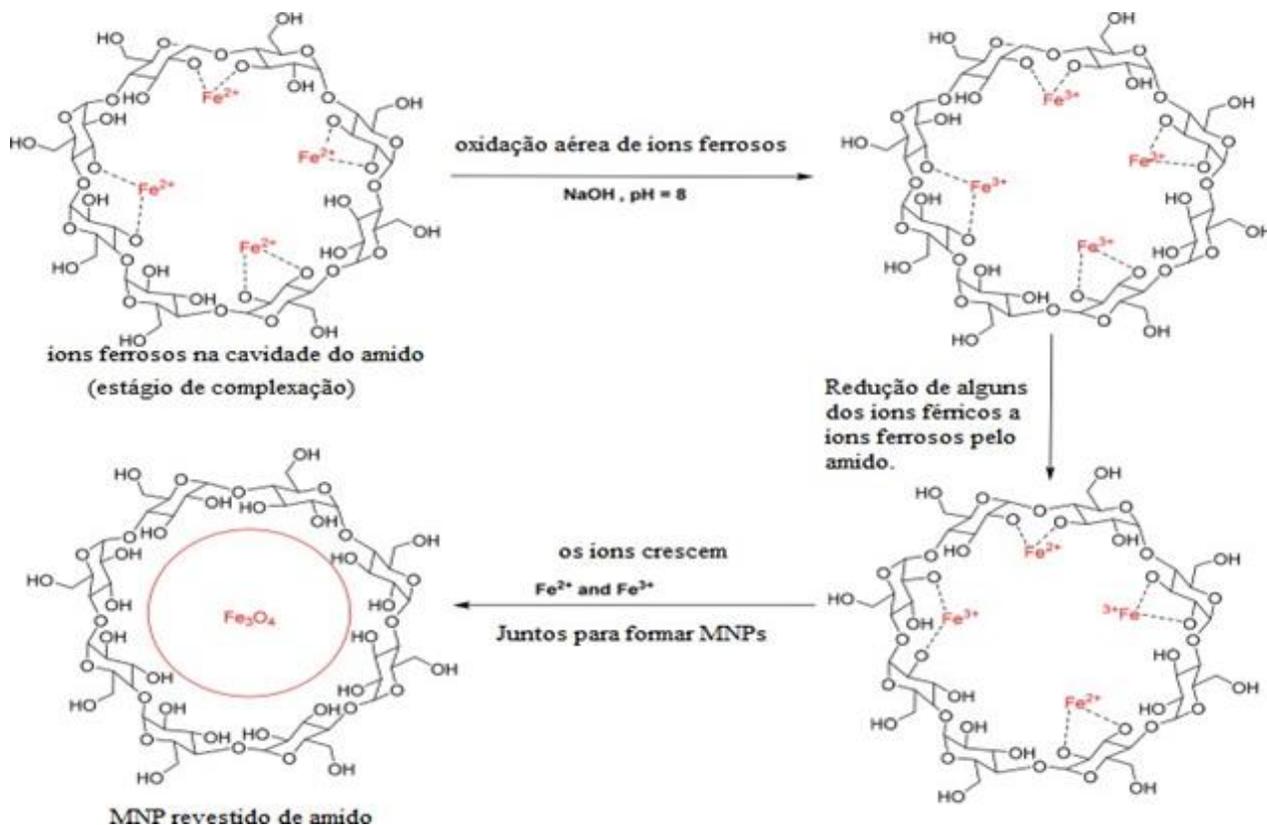
Fonte: Sharma, 2019.

### 3.5 Nanopartículas Magnéticas de $\text{Fe}_3\text{O}_4$

Nanopartículas magnéticas (NPMs) são materiais nanoestruturados entre 1 e 100 nm de diâmetro que direcionam sua movimentação na presença de campo magnético. Os sistemas magnéticos nanoparticulados podem ser dispostos em duas classes: as nanopartículas constituídas de metais de transição (Manganês (Mn), Cobre (Cu), Titânio (Ti)) e as nanopartículas de óxidos metálicos ( $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{FeO}$ ). De maneira geral, a composição básica de uma NPM é um Metal (M) diretamente ligado a um óxido de ferro, que pode ser exemplificado com o  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , objeto deste estudo.

O processo de síntese das NPMs, inclusive usando os princípios de química verde com emprego do extrato de batata inglesa como agente redutor e estabilizante (SHARMA, 2019). A Figura 4 apresenta a oxidação de íons ferrosos, efetuando a redução de alguns dos íons férricos a íons ferrosos pelo amido para a formação de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

**Figura 4 - Mecanismo para a Formação de NPMs Revestidas com Amido.**

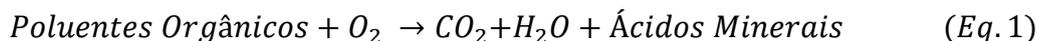


Fonte: SHARMA, 2019, com adaptações.

### 3.6 Fotocatálise

A fotocatalise é o aumento da velocidade de uma fotoreação pela ação de um catalisador (SERPONE, 2002). Diversas variáveis afetam a fotoatividade do catalisador como, tamanho da partícula, área superficial, cristalinidade, habilidade de adsorção, intensidade da luz, concentração do catalisador e pH da solução (SHOURONG *et. al.*, 1997).

As nanopartículas podem ser caracterizadas por uma banda de valência e uma banda de condução onde se encontra geração de elétrons (POULIOS; AETOPOULOU, 1999). Com exposição à radiação, as partículas absorvem fótons que podem excitar elétrons da banda de valência para a banda de condução, gerando assim, elétrons e vacâncias (POULIOS e AETOPOULOU, 1999). Uma vez formado o par elétron, estas cargas podem migrar para a superfície da partícula resultando em sítios oxidantes e redutores (POULIOS e AETOPOULOU, 1999). Estes sítios oxidantes são capazes de oxidar uma variedade de compostos orgânicos a Gás Carbonico (CO<sub>2</sub>) e Água (H<sub>2</sub>O), enquanto que os redutores são capazes de reduzir espécies presentes sobre a superfície do óxido. O processo global pode ser sumarizado pela seguinte equação 1:



Na fotoc\u00e1lise homog\u00eanea o catalisador encontra-se dissolvido na solu\u00e7\u00e3o formando uma \u00fanica fase. Oz\u00f4nio, \u00f3xido de metal de transi\u00e7\u00e3o e sistemas foto-Fenton ( $Fe^{+2}$  e  $Fe / H_2O_2$ ) s\u00e3o exemplos de catalisadores utilizados para esses procedimentos (BAUAER, 1997). Os catalisadores reagem formando o radical  $OH \bullet$ , esp\u00e9cie com elevado potencial de oxida\u00e7\u00e3o ( $E = 2,8$  eV), que participa da rea\u00e7\u00e3o de decomposi\u00e7\u00e3o de compostos org\u00e2nicos, num processo caracterizado como fotoc\u00e1lise homog\u00eanea indireta (BAUAER, 1997).

O princ\u00edpio da fotoc\u00e1lise heterog\u00eanea envolve a ativa\u00e7\u00e3o de semicondutor por luz solar ou artificial. Um semicondutor \u00e9 caracterizado por bandas de val\u00eancia e bandas de condu\u00e7\u00e3o, sendo a regi\u00e3o entre elas chamada de *bandgap* (CHAKRABARTI, 2019). Quando um semicondutor \u00e9 irradiado com radia\u00e7\u00e3o ultravioleta, a uma energia maior que sua energia de *bandgap*, s\u00e3o gerados el\u00e9trons ( $eCB^-$ ) na banda de condu\u00e7\u00e3o e lacunas ( $hVB^+$ ) na banda de val\u00eancia (CHAKRABARTI, 2019).

Os el\u00e9trons foto-gerados podem reagir tanto com o corante quanto com el\u00e9trons aceptores, por exemplo, mol\u00e9culas de oxig\u00e9nio adsorvidas na superf\u00edcie do semicondutor ou dissolvidas na \u00e1gua, gerando um super\u00f3xido  $O_2^{\cdot -}$  (CHAKRABARTI, 2019). As lacunas geradas podem oxidar a mol\u00e9cula org\u00e2nica formando  $R^+$ , ou reagir com  $OH^-$  ou  $H_2O$  oxidando estas esp\u00e9cies a  $OH \bullet$ . Outras esp\u00e9cies altamente oxidantes (por exemplo, radicais de per\u00f3xido de hidrog\u00e9nio) s\u00e3o respons\u00e1veis pela fotodecomposi\u00e7\u00e3o heterog\u00eanea com semicondutores nos substratos org\u00e2nicos, tais como corantes.

O radical  $OH \bullet$  resultante \u00e9 um agente oxidante muito forte e pode oxidar a maioria dos corantes. Deve ser notado que a oxida\u00e7\u00e3o fotossensibilizada pode ocorrer, a qual se constitui da excita\u00e7\u00e3o por luz vis\u00edvel (n\u00e3o UV) do corante, e sua subsequente intera\u00e7\u00e3o com NPMs (CHAKRABARTI, 2019). Quando \u00e9 utilizada luz solar ou uma fonte de luz artificial, \u00e9 poss\u00edvel que ambos os mecanismos (foto-oxida\u00e7\u00e3o e fotossensibiliza\u00e7\u00e3o) ocorram, tornando dif\u00edcil distinguir se o mecanismo de oxida\u00e7\u00e3o fotocatal\u00edtica \u00e9 superior ao de oxida\u00e7\u00e3o fotossensibilizada (BUTHIYAPPAN et al., 2016).

Um fator que diminui a efici\u00eancia do processo fotoqu\u00edmico \u00e9 a recombina\u00e7\u00e3o do el\u00e9tron com lacuna, antes do mesmo interagir com o corante. Uma forma de evitar esta recombina\u00e7\u00e3o \u00e9 utilizar a irradia\u00e7\u00e3o UV com aplica\u00e7\u00e3o simult\u00e2nea de um potencial externo an\u00f3dico sobre um eletrodo semicondutor, for\u00e7ando assim a separa\u00e7\u00e3o das esp\u00e9cies carregadas (BUTHIYAPPAN et al., 2016).

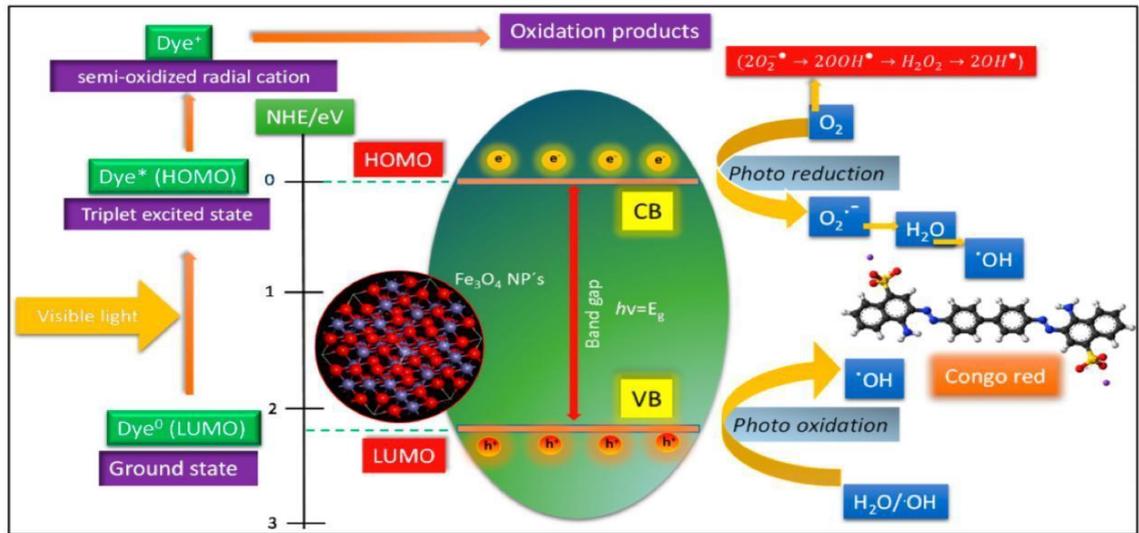
Em um estudo realizado por Ruíz-Baltazar e colaboradores (2020), NPMs de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  foram sintetizadas empregando extrato da espécie vegetal *Cnicus benedictus* para a degradação do corante vermelho do congo (CR). O comportamento dos orbitais moleculares se explica como uma combinação de oxidação e redução, onde este comportamento terá um processo em que a superfície das NPMs de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  é um substrato onde as moléculas de CR são absorvidas. As nanopartículas magnéticas atuam como sítios ativos para as interações eletrônicas com os componentes orgânicos. O mecanismo fotocatalítico para a degradação de corantes orgânicos envolve a excitação sob a luz visível com comprimento de onda maior do que 400nm. Neste processo o corante no estado de excitação (corante\*) gera um estado tripleto semi-oxidado, gerando um semi-cátion radical por injeção de elétrons na banda de condução do óxido de ferro III, uma derivada de reação entre os elétrons capturados e o oxigênio presente no sistema promove a formação de espécies superóxido e hidroxilas. Estes ânions formados são radicais responsáveis pela oxidação e degradação do corante CR (Figura 5).

### 3.7 Técnicas Analíticas

A caracterização de materiais de Nanopartículas Magnéticas (NPMs) é crucial para atender suas propriedades e aplicações. Diversas técnicas são empregadas para esse fim, incluindo Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET) e Microscopia de Força Atômica (MFA), microscopia de varredura (MEV) que permitem visualizar a morfologia e tamanho das partículas. Outras técnicas como Espectroscopia de Absorção de Raios-X (XAS) e Ressonância Magnética Nuclear (RMN) oferecem informações sobre a composição química e estrutura atômica, enquanto o Espalhamento Dinâmico de Luz (DLS) fornece dados sobre o tamanho hidrodinâmico das partículas em suspensão. Combinando essas técnicas, os pesquisadores podem obter uma compreensão abrangente das características das NPMs, facilitando seu desenvolvimento em diversas áreas, como medicina, eletrônica e catálise.

Os raios X são empregados em algumas técnicas analíticas, como a difração de raio x (DRX) e a Espectroscopia de Energia Dispersiva de raios X (EDX) que permitem a análise qualitativa e principalmente quantitativa das fases cristalinas e composição química elementar, respectivamente, de muitos compostos e materiais. Além destas técnicas empregadas na caracterização de materiais, há a técnica por espectrofotometria UV-VIS que pode ser aplicada de modo quali-quantitativo na análise de compostos orgânicos e inorgânicos em diferentes soluções.

**Figura 5** - Representação Esquemática do Processo de Fotodegradação do Corante vermelho do congo.



Fonte: August, 2020.

### 3.7.1 Difração de raios x (DRX)

A Difração de Raio X é representada pelo fenômeno de interação entre feixes de raios x incidentes e os elétrons dos átomos do material, cuja incidência da radiação em uma amostra e na detecção dos fótons difratados. O fenômeno difração de raios x ocorre nas direções de espalhamento que satisfazem a Lei de Bragg, em que um feixe monocromático de determinado comprimento de onda ( $\lambda$ ) incide sobre um cristal a um determinado ângulo, chamado de ângulo de Bragg, como pode ser representado na equação 2 a seguir.:

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad (\text{Eq. 2})$$

onde  $\theta$  é o ângulo medido entre o feixe incidente e determinados planos do cristal, “d” é a distância entre os planos de átomos e “n” a ordem de difração.

Os compostos cristalinos tem um padrão refratométrico característico, que permite sua identificação através das posições angulares e intensidades relativas dos picos difratados (SATTAR, 2022).

### 3.7.2 Espectrometria de energia dispersiva de raios X (EDX)

A espectrometria de energia dispersiva de raios x consiste no fenômeno de excitação dos elétrons externos do átomo, que ao retornarem à posição inicial liberam a energia adquirida na forma de raios x característicos do material ou composto, que identificam a composição química elementar.

O uso do EDX, é de grande importância na caracterização petrográfica e caracterização química elementar de materiais e nanomateriais.

### 3.7.3 Espectrofotometria UV-VIS (UV-VIS)

Para muitas aplicações, a radiação eletromagnética do UV-VIS, é convenientemente representada como um campo elétrico e um campo eletromagnético, que se propaga em fase, oscilando sensorialmente, perpendiculares entre si e a direção de propagação. Somente a componente elétrica da radiação será considerada pelo fator o campo elétrico ser a principal responsável pela maioria do fenômeno de interesse, incluindo reflexão, refração, transmissão e absorção.

O UV-VIS mede a absorção de luz em uma faixa de comprimento de onda específica, cuja medição da intensidade da luz é realizada após passar por uma amostra. Ele opera nas regiões onde a radiação ultravioleta (UV) e do visível (VIS) do espectro eletromagnético, permitindo determinar a absorção ou transmissão de uma substância em determinados comprimentos de onda.

Sua funcionalidade mede determinadas concentrações de substâncias químicas em solução, baseando-se na lei de Beer-Lambert, que tem relação com a absorção da luz com a concentração da substância. Ajuda a verificar a pureza da substância, observando se há absorção de luz em comprimentos específicos, onde alguns compostos são identificados através dessa absorção característica, também permitindo a análise de sua estrutura. Além disso, é possível avaliar grupos funcionais e padrões de comportamentos das moléculas e estruturas e com elas absorvem e transmitem luz.

## 4 METODOLOGIA

A síntese, caracterização e aplicação das NPMs de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  foram realizadas no Laboratório de Materiais Luminescentes e Estudos Ambientais (LUMIAM) do Instituto de Química e Biotecnologia da Universidade Federal de Alagoas – UFAL.

### 4.1 Materiais e reagentes

Os reagentes empregados na síntese das NPMs foram  $\text{Fe}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$  30% m m<sup>-1</sup>, NaOH P.A.,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  P.A., rodamina B e a água ultrapurificada pelo sistema de osmose reversa. As batatas inglesas e macaxeira foram adquiridas em mercado local no município de Maceió-AL e foram desidratadas para obtenção dos extratos para a síntese verde de NPMs. Para avaliação do magnetismo dos nanomateriais obtidos, foi empregado um ímã de neodímio.

### 4.2 Síntese das NPM Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>

A síntese verde das NPMs foi de acordo com a metodologia de Sharma *et al.* (2019). A batata inglesa, cortada em cubos, foi desidratada pela exposição aos raios solares durante três dias. A desidratação foi necessária para pré-concentração do amido. Em seguida, foram pesados 15 g de batatas desidratadas utilizando e adicionados 100 mL de água destilada sob agitação constante por 10 min a 80°C. Após resfriamento à temperatura ambiente, as soluções foram filtradas em papel de filtro Whatman n° 1 para obtenção do extrato da batata (de coloração amarelo-pálido e rico em amido). Um volume de 40 mL do extrato foi transferido para um frasco de fundo redondo com adição de 3,0 g de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ . Esta mistura foi aquecida a 80 °C, sob agitação constante, até a obtenção de uma cor amarelo intenso. Em seguida, a solução foi sonicada em banho de ultrassom durante 15 minutos à temperatura ambiente.

Sob agitação, o pH da solução foi ajustado para 8,0 pela adição de NaOH 4 M gota a gota. Após ajuste e mudança da cor de amarelo à preto-esverdeado, a mistura permaneceu sob agitação por 20 min a 85 °C, para obtenção das NPMs de cor preta intensa. As NPMs foram separadas da solução com auxílio de um ímã de neodímio e lavadas em água ultrapurificada até que o pH neutro. Em seguida, as NPMs foram secas a 70 °C e maceradas em almofariz e pistilo. Este procedimento de síntese verde das NPMs, a partir das batatas, foi realizado em duplicata. O mesmo procedimento foi feito, em duplicata, para a matriz matriz macaxeira.

### 4.3 Caracterização das NPMs Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>

Na caracterização das NPMs Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> foram empregadas as técnicas por Difração de Raios x (DRX) e Espectrometria Dispersiva de Raios x, por dispersão de energia (EDX), cujos equipamentos foram, respectivamente, difratômetro de raios x de modelo XRD-700 da Shimadzu (Figura 6) e espectrômetro o modelo EDX-700 da Shimadzu (Figura 7).

**Figura 6** - Difratômetro de Raios X de Modelo XRD-7000 da Shimadzu



Fonte: Domínio do Autor.

**Figura 7** - Espectrômetro, O Modelo EDX-700 da Shimadzu



Fonte: Domínio do Autor.

### 4.4 Fotocatálise do corante rodamina B

Como solução estoque do corante, um volume de 50 mL da solução do corante de rodamina B a 10 ppm a pH 5,0 (ajuste do pH=8,00 com algumas gotas de 0,05 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) foi

preparado. Soluções de 10mg/L, a partir da solução estoque, foram empregadas na otimização da fotocatalise, empregando o planejamento fatorial  $2^2$  com triplicata no ponto central, conforme Tabela 1 a seguir.

**Tabela 1** - Planejamento Fatorial  $2^2$  com o ponto Central para Avaliação da Degradação do Corante Rodamina B

<b>Condições Fixas</b>			
Volume do corante rodamina B: 3,0 mL em pH 5			
<b>Variáveis</b>	<b>Níveis</b>		
	(-)	0	(+)
Tempo (min)	5	17,5	30
Massa NPM (g)	0,01	0,03	0,05
<b>Experimento</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>Tempo (min)</b>	
1	0,01	5	
2	0,05	5	
3	0,01	30	
4	0,05	30	
PC*	0,03	17,5	

\* Ponto Central (n=3)

Foram realizados sete ensaios empregando uma da magnetita sintética, uma vez que a quantidade obtida na síntese verde não é suficiente para efetuar os ensaios do planejamento, sendo assim, as NPMs obtidas a partir da síntese do extrato de batata e macaxeira, foram empregadas após o ensaio fatorial para analisar a melhor massa e melhor tempo para a degradação do corante rodamina B. Cada ensaio com a magnetita comercial foi exposto à radiação ultravioleta em reator *labmade* de lâmpada UV (Luattec LP-002, E27, 36 W e 80 Hz) e após os tempos e massas definidos no planejamento foi feito as análises visualmente para definição de degradação do corante.

Após exposição ao tempo definido no planejamento, foram coletadas amostras de 2 mL do sobrenadante e os frascos foram isolados da iluminação externa com emprego de papel alumínio até análise em um espectrofotômetro UV-VIS (modelo UV-3600 Plus) na região de 300 a 700 nm. A intensidade de absorvância obtida para cada ensaio foi a variável dependente

(resposta) do planejamento fatorial.

Após a otimização, foi colocado 0,01 g da magnetita e 0,05 g da magnetita em um tempo de 30 min, empregando 3 mL de solução de corante rodamina B foi exposto ao reator de radiação UV, sintetizadas a partir da batata, em duplicata, por um tempo de 30 min. A absorvância destas amostras também foram avaliadas pela técnica espectrofotometria UV VIS.

#### **4.5 Tratamento de dados**

Nos tratamentos dos resultados das análises por DRX e EDX foram empregados os softwares *Xpert High Score* e *PCEdx*, respectivamente. Os gráficos foram plotados no Microsoft Excel<sup>TM</sup> (Excel Version, 2007). O planejamento experimental foi realizado no software Statistica 10.0.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Síntese verde das NPMs Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>

Os aspectos da integração de nanotecnologia e da química verde proporcionam alternativas eficientes para a síntese de NPMs, conforme reportado na literatura (Sharma, 2019). Nesse sentido, extratos das amostras desidratadas de batata inglesa e macaxeira foram empregadas para síntese de NPMs Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> para aplicação em fotocatalise.

A reação de síntese é simples e, inicialmente, os íons ferrosos presentes na solução apresentaram complexação com as moléculas de amido. A taxa de complexação é potencializada usando a cavitação acústica pelo sistema de sonificação, onde ela consiste na aplicação de ondas ultrassônicas em frequência elevada agrupando e agitando as nanopartículas. Durante a adição de NaOH, há a oxidação de íons ferrosos em íons férricos. A alteração do pH permite que alguns dos íons férricos sejam reduzidos pelos grupos terminais do amido e a nucleação de NPMs ocorre pela interação com a molécula de amido de forma a obter a coloração verde e, ainda, o crescimento das nanopartículas (Figura 8).

**Figura 8** - Oxidação dos íons Férricos



Fonte: Dominio do Autor.

Após a decantação, foram observadas formações e agrupamento das nanopartículas como esperado, tanto para a batata quanto para a macaxeira. Assim, após o ajuste do pH (neutro) e secagem das amostras obtidas, foi avaliado o magnetismo das amostras com um ímã de neodímio. Neste caso, foi verificado que o material obtido da síntese empregando extrato da macaxeira apresentou leve atração pelo ímã, enquanto o material obtido do extrato de batata apresentou forte atração magnética.

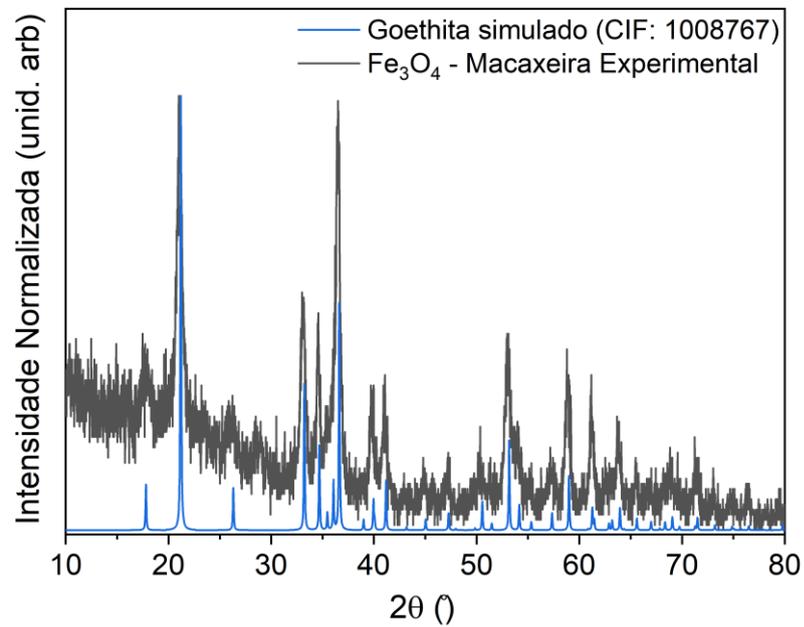
Além disso, também foram observadas colorações de partículas diferentes para os materiais obtidos a partir da batata inglesa e macaxeira. Na síntese verde empregando o mesmo método para os extratos da batata inglesa e macaxeira. Para a primeira matriz, foram obtidas partículas de cor preta e para a segunda uma coloração marrom, indicando fases distintas de óxido de ferro. A cor preta e o magnetismo são as primeiras indicações de obtenção das NPMS  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

As massas obtidas na síntese de nanopartículas magnéticas de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (um composto de óxido de ferro) utilizando extratos de mandioca e batata como agentes de redução. As massas obtidas foram medidas após o processo de síntese e indicam a quantidade de material produzido. Para as nanopartículas sintetizadas com extrato de macaxeira, a massa foi encontrada como sendo de  $0,128 \pm 0,009$  g. Já para as nanopartículas sintetizadas com extrato de batata, a massa foi registrada como  $0,033 \pm 0,079$  g.

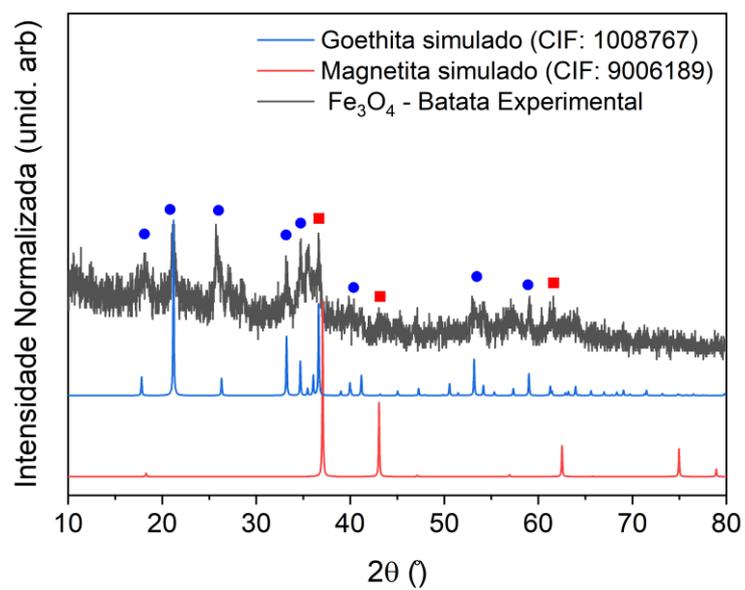
Esses resultados fornecem informações importantes sobre a eficácia dos diferentes extratos na síntese das nanopartículas desejadas, bem como a consistência e a precisão do processo experimental. E independente do rendimento, as sínteses ofereceram coloração e provavelmente fases diferentes de óxido de ferro, que foram confirmadas na caracterização.

## **5.2 Caracterização das NPMs $\text{Fe}_3\text{O}_4$**

As partículas magnéticas foram submetidas à caracterização por meio das técnicas analíticas de Difração de Raios-X (DRX) e Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X (EDX) com o intuito de confirmar a presença de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Os difratogramas obtidos para as fases de goethita e magnetita foram posteriormente representados graficamente, exibindo as respostas das amostras. Tal procedimento visou identificar a similaridade entre as amostras analisadas, sendo que os picos correspondentes estão destacados nas Figuras 9 e 10. Este evidencia a conformidade da amostra com as fases determinantes tanto para a goethita quanto para a magnetita.

**Figura 9** - Difratoograma Obtido Através do Extrato da NPMs (Macaxeira)

Fonte: Domínio do Autor.

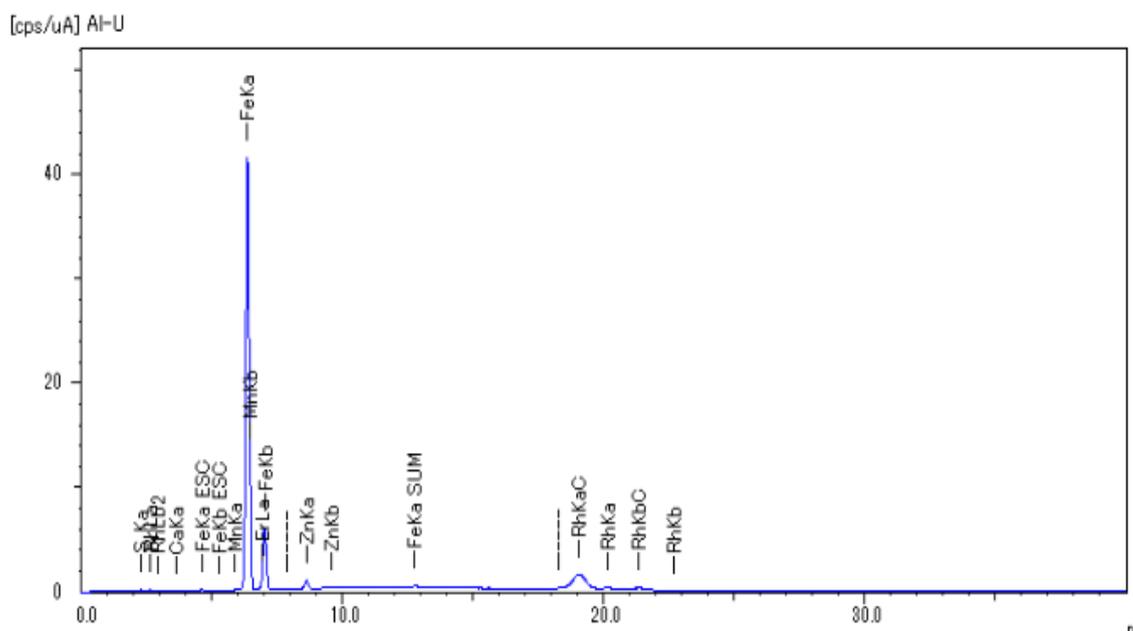
**Figura 10** - Difratoograma Obtido Através do Extrato da NPMs (Batata)

Fonte: Domínio do Autor.

Com o banco de dados obtido pelo ICDD (*International Center Diffraction Data*) comparação qualitativa com a biblioteca do software *Xpert High Score* foi possível avaliar que os extratos geraram predominância de fases diferentes. A síntese a partir da macaxeira e batata gerou predominância da fase goethita ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ), e magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) respectivamente. Além disso, foram verificadas outras fases cristalinas de óxidos de ferro em ambos os materiais obtidos. Estes resultados estão de acordo com os aspectos visuais e magnéticos observados logo após a síntese. Logo, o extrato de macaxeira não apresentou-se como matriz na geração de NPMs  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

Como o objeto deste estudo é a aplicação da magnetita onde foi aplicada a partir da otimização, com base no melhor tempo e massa aderidos da otimização, as demais análises e ensaios focaram-se no material obtido da síntese a partir da batata, em duplicata. A análise por espectroscopia de raio X por energia dispersiva, também conhecido por EDX, é uma técnica analítica que permite a caracterização química elementar de materiais. A Figura 12 a seguir mostra o espectro obtido para o material obtido desta síntese (NPMs  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).

**Figura 11** - Espectro EDX Obtido para o Material da Síntese a partir da Síntese da Batata



Fonte: Domínio do Autor.

A composição química do material mostra a presença majoritária do ferro e impurezas de Cálcio, Zinco, Manganês, Enxofre e Érbio. A Tabela 2 apresenta a porcentagem de distribuição dos elementos nas nanopartículas obtidas por EDX. Conclui-se que a magnetita tem 96,97% de ferro em sua composição, e com isso podemos concluir que o ferro é um doador

de elétrons e seus orbitais vazios podem servir para degradação do corante rodamina B.

**Tabela 2** - Porcentagem dos Elementos Determinados por EDX nas Nanopartículas Obtidas do Extrato de Batata

<b>Analito</b>	<b>Concentração (%)</b>
<b>Fe</b>	96,97%
<b>S</b>	0,26%
<b>Zn</b>	2,03%
<b>Er</b>	0,51%
<b>Ca</b>	0,07%
<b>Mn</b>	0,16%

Fonte: Dominio do Autor.

### 5.3 Otimização de processo de fotocatalise empregando NPMs Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>

Na otimização do tempo e massa a partir das nanopartículas magnéticas, foi empregada magnetita sintética para o planejamento fatorial, a fim de avaliar as condições ótimas para fotocatalise e, posteriormente, aplicar a amostra obtida da síntese decorrente da batata. Este procedimento foi adotado devido a quantidade de amostra obtida da síntese verde não ser suficiente para aplicação do planejamento experimental e para aplicação direta sem otimização. Neste sentido, foi empregado o planejamento fatorial 2<sup>2</sup> com triplicata no ponto central para avaliar a degradação do corante rodamina B com exposição à radiação ultravioleta na avaliação dos fatores tempo e massa de partículas magnéticas. A Tabela 3 mostra os ensaios realizados e suas respectivas respostas de absorbância.

**Tabela 3** - Planejamento Fatorial  $2^2$  com Ponto Central para Avaliação da Degradação do Corante Rodamina B

Experimento	Massa (g)	Tempo (min)	Absorbância (u.a.)
1	0,01	5	0,236
2	0,05	5	0,883
3	0,01	30	0,107
4	0,05	30	0,116
PC1*	0,03	17,5	0,235
PC2*	0,03	17,5	0,432
PC3*	0,03	17,5	0,245

\* Ponto Central (n=3)

Fonte: Domínio do Autor.

Em cada ensaio foram empregados 3 mL do corante rodamina B e as massas de magnetita definidas para cada ensaio. Então deixou-se o tempo determinado em cada experimento, com obtenção das seguintes soluções para cada ensaio (Figura 12).

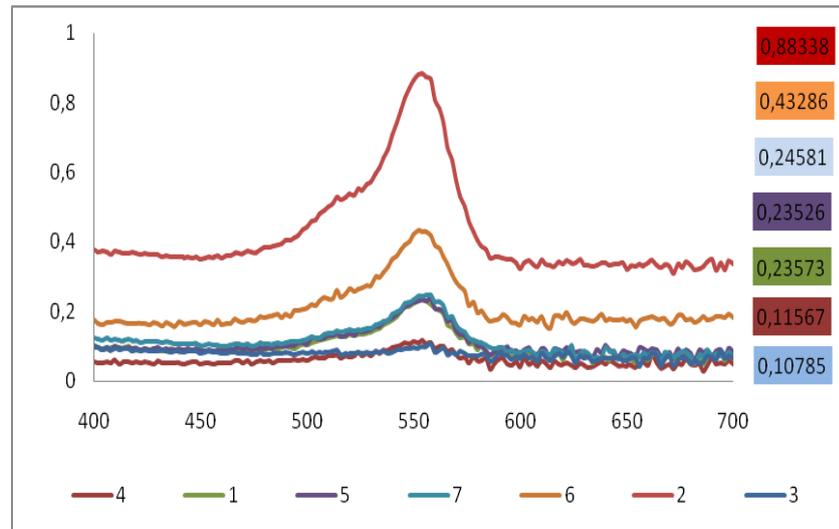
**Figura 12:** Amostra dos Experimentos do Planejamento fatorial  $2^2$ , com triplicata no ponto central



Fonte: Domínio do Autor.

Visualmente, pode-se observar que a melhor degradação ocorreu nos ensaios 3 e 4. A Figura 13 mostra os espectros UV-VIS obtidos para cada ensaio do planejamento experimental executado, analisando que a maior degradação terá respostas positivas quanto o valor de resposta se aproximar de zero. Ao analisar os espectros no UV VIS, têm-se que as amostras 3 e 4 se aproximam de zero pela análise da absorbância, o que colabora com a eficiência da magnetita na fotocatalise do corante rodamina B.

**Figura13** - Espectro de Absorbância da Rodamina B para os Ensaios do Planejamento Fatorial  $2^2$



Fonte: Domínio do Autor.

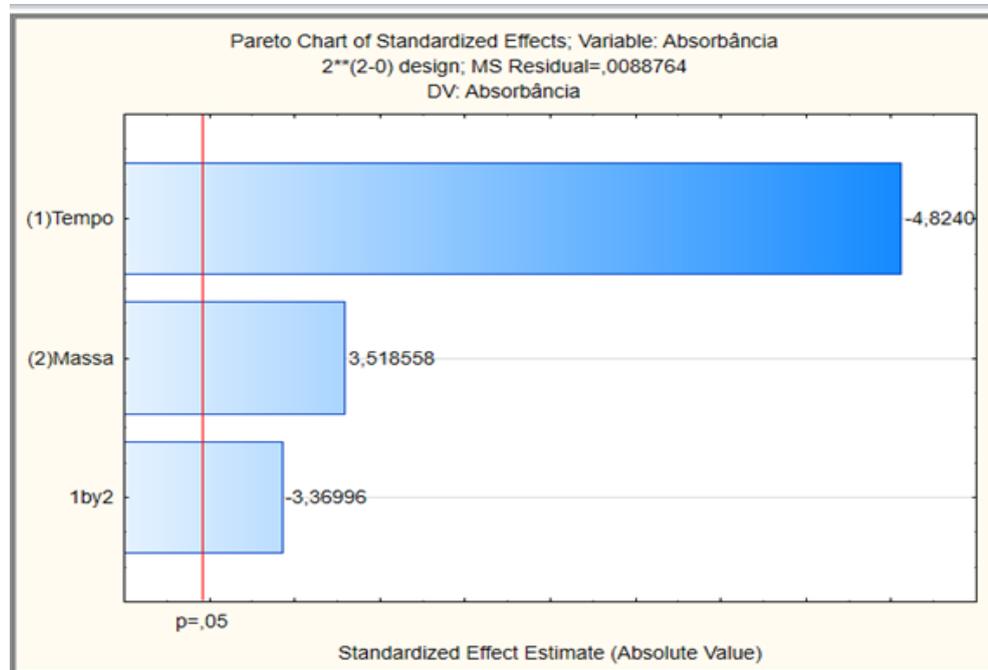
A Tabela 4 a seguir mostra os dados de análise de variância (ANOVA), do planejamento experimental executado para o nível de confiança de 95%. O p valor para todos os fatores (tempo, massa e interação de tempo com massa) foi menor que 0,05, ou seja, todos os fatores são significativos. A Figura 14 mostra o gráfico de Pareto para o planejamento adotado, em que todos os fatores e a interação entre eles são significativos a 95 % de confiança.

**Tabela 4** - Dados da Análise de Variância (ANOVA) para o Planejamento Fatorial  $2^2$  com Ponto Central

<b>Fator</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
<b>Tempo</b>	0,206	1	0,206	23,271	0,017
<b>Massa</b>	0,110	1	0,110	12,380	0,039
<b>1 e 2</b>	0,101	1	0,101	11,357	0,043
<b>Erro</b>	0,003	3	0,009	0	0
<b>Total</b>	0,444	6	0	0	0
<b>SQT</b>					

Fonte: Domínio do Autor.

**Figura 14:** Gráfico de Pareto, para Análise do para o Planejamento Fatorial  $2^2$  com Ponto Central



Fonte: Domínio do Autor.

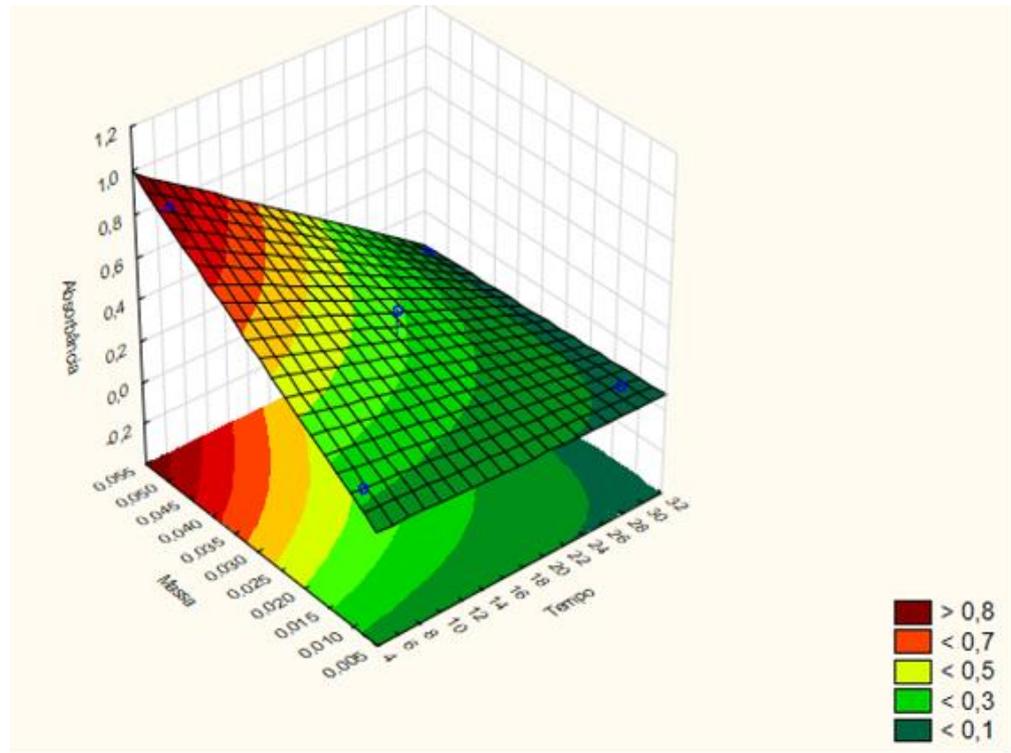
A equação 3 a seguir representa o modelo do planejamento executado, onde 1 é o efeito do tempo e 2 representa o efeito do parâmetro massa. Os sinais negativo e positivo associados aos efeitos, respectivamente, representam que em menores tempos e maiores massas têm-se as maiores absorvâncias. Contudo, as menores absorvâncias representam a eficiência das NPMs  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  na degradação do corante rodamina B.

$$Y_{\text{Absorbância}} = 0,318 - 0,227 x_1 + 0,166 x_2 - 0,159 x_{12} \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde  $y$  é a resposta predita de intensidade de absorvância do corante rodamina B (u. a.),  $X_1$  e  $X_2$  os parâmetros analisados (massa e tempo), respectivamente, e  $X_1$  e  $X_2$  o coeficiente da interação entre as variáveis  $X_1$  e  $X_2$ .

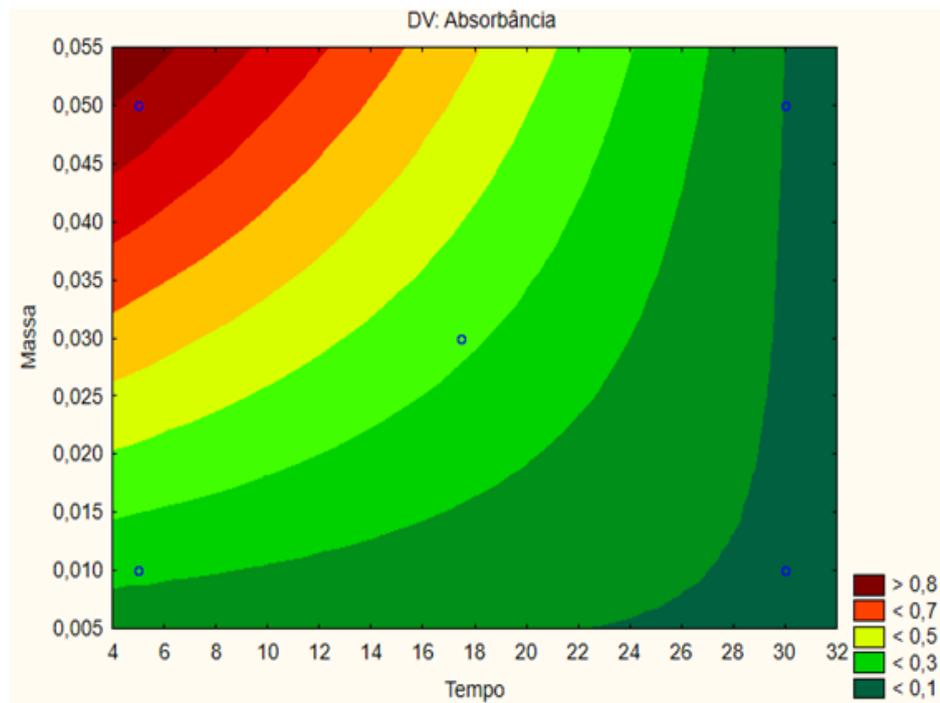
As Figuras 15 e 16 mostram as superfícies de resposta e mapa de contorno, respectivamente, para a resposta absorvância em função do tempo de exposição ao reator com lâmpada UV e massa de NPMs  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

**Figura 15** - Superfície de Resposta de Contorno, Análise da Absorbância



Fonte: Domínio do Autor.

**Figura 16** - Mapa de Contorno, da Absorbância



Fonte: Domínio do Autor.

A região ótima de trabalho é representada pela cor verde escuro, ou seja, os maiores tempos e as menores massas apresentam as menores respostas de intensidade de absorbância. Esta condição foi aplicada na degradação do corante rodamina B empregando as nanopartículas obtidas da síntese com extrato de batata.

Como estudo complementar, além da exposição à radiação ultravioleta, foi feita uma exposição ao sol. Na Figura 16 a seguir, da esquerda para a direita, há a solução de corante e solução de corante com 0,01 g e 0,05 g de magnetita sintética, respectivamente. Após aproximadamente 30 min de exposição à luz solar, foi observada a eficiência da magnetita na degradação do corante, inclusive com o emprego de uma massa menor.

**Figura 17** - Degradação do Corante rodamina B empregando magnetita sintética sob radiação solar



Fonte: Domínio do Autor.

#### 5.4 Aplicação das NPMs $\text{Fe}_3\text{O}_4$ obtidas a partir das batatas

Visualmente é notória a degradação do corante rodamina B mediante o experimento com a magnetita comercial, o que se confirmou com as análises de absorbância no UV VIS. Mediante os resultados do planejamento experimental, a condição ótima de trabalho foi com emprego de 0,01g da magnetita e com um tempo de 30 minutos. Logo, estas condições otimizadas foram empregadas para o ensaio com a magnetita sintetizada a partir do extrato da batata (Figura 18), em duplicata.

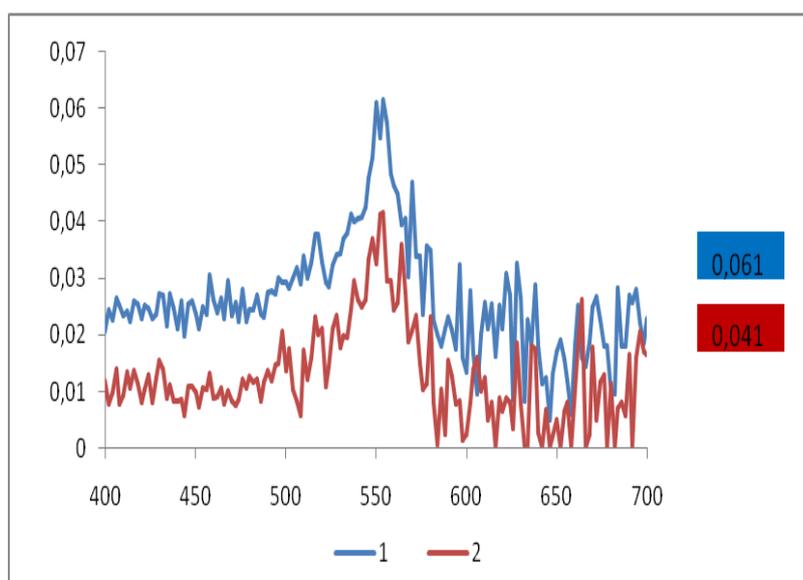
**Figura 18** - Degradação do Corante Rodamina B pelas NPMs Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-(Batata)



Fonte: Domínio do Autor.

Os resultados mostraram a eficiência das NPMs Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> sintetizadas, observou-se que as mesmas se encontram cada vez mais próximas de zero, tendo uma boa degradação do corante visualmente e na análise por UV-VIS (Figura 18), tendo uma média e desvio padrão de 0,102 ± 0,052g, respectivamente. Além disso, observa-se um gráfico de UV-VIS com bastante ruído, o que pode ser devido ao baixo sinal de absorbância das amostras.

**Figura 19** - Espectro UV-VIS, para Avaliar a Degradação do Corante Rodamina B, Empregando as NPMs-(Batata)



Fonte: Domínio do Autor.

## 6 PERSPECTIVAS FUTURAS

- Avaliar a fotocatalise de outros tipos de corantes empregados nas indústrias têxteis expandindo o leque de possibilidades e aplicabilidade das NPMs sintetizadas;
- Avaliar o comportamento das NPMs  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  sob exposição à radiação solar;
- Investigar o mecanismo de reação envolvido na macaxeira e outras fontes de amido na síntese das nanopartículas NPMs  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ;
- Aplicar outras técnicas analíticas para comprovação do tamanho nanométrico das partículas obtidas e observação de regiões de estiramento de grupamentos característicos dos compostos utilizados para o processo de síntese das NPMs  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

## 7 CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos foi possível observar que embora a síntese empregando extrato de macaxeira tenha um maior rendimento, gerou predominantemente a fase de goethita, uma fase cristalina do ferro e não objeto deste estudo. Enquanto o extrato de batata inglesa gerou as NPMs com predominância da fase magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).

A otimização da síntese com a magnetita sintética demonstrou eficiência na degradação do corante rodamina B sob exposição no UV, cujas massas menores de NPMs  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  e tempo de 30 min apresentaram redução na absorbância UV-VIS. Uma simulação à exposição solar também demonstrou eficiência na degradação do corante rodamina B. Além disso, o ensaio otimizado para aplicação do material sintetizado também foi promissor na degradação do corante rodamina B sob a radiação UV.

Portanto, os resultados mostraram eficiência da aplicação das NPMs  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  sintetizadas na fotocatalise para degradação do corante rodamina B. Dentro dos princípios da química verde, as NPMs adquiridas com emprego do extrato da batata são seguras para o meio ambiente, ricas em amido e eficientes como estabilizador e redutor. O devido experimento abre um leque para discussão de como encontrar soluções para problemas ambientais em efluentes, com uma solução de baixo custo, seguro, sustentável, simples e sem a utilização de reagentes químicos mais agressivos ao meio ambiente.

## REFERÊNCIAS

APHA; AWWA; WEF (1999) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th edition, American Public Health Association, Washington. Acesso em: 18 de junho de 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE QUÍMICA (ABIQUM). Classificação. Corantes e Pigmentos. Disponível em: [http://abiquim.org.br/corantes/cor\\_classificacao.asp](http://abiquim.org.br/corantes/cor_classificacao.asp). Acesso em 28 Julho de 2023.

AKHTAR, M.; YOUSAF, M.; LU, Y.; KHAN, M.; SAROSH, A.; ARSHAD, M.; NIAMAT, M.; FARHAN, M.; AHMAD, A.; KHALLIDON, M. **Physical, structural**, conductive and magneto-optical properties of rare earths (Yb, Gd) doped Ni-Zn spinel nano ferrites for data and energy storage devices. (2021). *Ceramics International*. v. 47, p. 10.1016/j.ceramint.2021.01.028. Acesso em: 20 de janeiro de 2024.

AKHTAR, M.N.; YOUSAF, M.; LU, Y.; MAHMOUD, M.Z.; IQBAL, J.; KHAN, M.A.; HUSSIEN, M. **Alinhamento de banda magnética, estrutural**, óptica e análise condutiva de nanocompósitos dopados de NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> baseados em grafeno (Yb, Gd e Sm) para aplicações tecnológicas emergentes. (2022). *Metais Sintéticos*, v. 284, p. 116994. Acesso em: 22 Julho de 2023.

ALFARO-CRUZ, R. M.; JUÁREZ-RAMÍREZ, I.; TORRES-MARTÍNEZ, M. L. Chapter 25 - **Recent Strategies for improving semiconductor performance on green photocatalysis processes**. *Handbook of Greener Synthesis of Nanomaterials and Compounds*, v. 2: Synthesis At the Macroscale and Nanoscale, p. 565-592, 2021. Acesso em: 17 Maio de 2023.

BRASIL. **Ministério do Meio Ambiente**. Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA. Resolução n. 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 18 mar. 2005. Acesso em: 10 Julho de 2023.

BRASIL. **Ministério do Meio Ambiente**. Conselho Nacional do Meio Ambiente, resolução n. 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrão de lançamento de efluentes complementares e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente CONAMA. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 16 maio, 2011. Acesso em: 05 Julho de 2023.

BALBANI, A. P. S.; STELZER, L. B.; MONTOVANI, J. C. **Excipientes de medicamentos e as informações da bula**. *Rev. Bras. Otorrinolaringol.*, São Paulo, v. 72, n. 3, p. 400-406, 2006. Acesso em: 01 Dezembro de 2023.

BESSLER, K.; NEDER, A.V.F. **Química em Tubos de Ensaio: Uma Abordagem para principiantes**. São Paulo: Edgar Blucher, p. 175, 2004. Acesso em: 05 Janeiro de 2024.

BRILLAS, E.; MARTÍNEZ-HUTTLE, C. A. **Decontamination of wastewaters containing**

**synthetic organic dyes by electrochemical methods.** An update review. Applied Catalysis B: Environmental, v. 166-167, p. 203-643, 2015. Acesso em: 16 Julho de 2023.

BUTHIYAPPAN, Archina; ABDUL AZIZ, Abdul Raman; WAN DAUD, **Wan Mohd Asri.** Recent advances and prospects of catalytic advanced oxidation process in treating textile effluents. Reviews in Chemical Engineering, v. 32, n. 1, p. 1–47, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/revce-2015-00>. Acesso em: 01 Julho de 2023.

BRAUN, A. M.; OLIVEROS, E. **How to evaluate photochemical methods for water treatment.** Wat. Sci. Tech. V 35, n. 4, p. 17-23, 1997. Acesso em: 30 junho de 2023.

BAUAER, R.; FALLMANN, H.; **The Photo-Fenton oxidation - A cheap and efficient wastewater treatment method.** Research on chemical intermediates: 23, 341-354, 1997. Acesso em: 14 Julho de 2023.

CHAKRABARTI, Sampa. **Solar Photocatalysis for Environmental Remediation.** E-book. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9780429058363>. Acesso em: 01 Julho de 2023.

DALLAGO, R. M.; SMANIOTTO, A.; OLIVEIRA, L. C. A. **Resíduos sólidos de curtumes como adsorventes para remoção de corantes em meio aquoso.** Química Nova, v. 28, n. 3, p. 433-437, 2005. Acesso em: 01 fevereiro de 2024.

FENTON, H.J.H. **Oxidation of tartaric acid in presence of iron.** Journal Chemical Society, v.65, p. 899-910, 1894. Acesso em: 02 fevereiro de 2024.

FIG. **Relatório sobre o posicionamento da Indústria Brasileira 2018.** Goiana. Acesso em: 10 fevereiro de 2024.

GUARATINI, C. C. I.; ZANONI, M. V. B. **Corantes têxteis.** Química Nova, v. 23, n. 01, p. 71-78, 2000. Acesso em: 11 fevereiro de 2024.

GARCIA, J. C., SIMIONATO, J. A., SILVA, A. E. C, NOZAKI, J., SOUZA, N. E. **Solar photocatalytic degradation of real textile effluents by associated titanium dioxide and hydrogen peroxide.** Solar Energy, v. 83, p. 316-322, 2009. Acesso em: 11 fevereiro de 2024.

HORVAT, A. J. M.; PETROVIC, M.; BABIC, S.; PAVLOVIC, D. M.; ASPERGER, D.; PELKO, S.; MANCE, A. D.; KASTELAN-MACAN, M. **Analysis, occurrence and fate anthelmintes and their transformation products in the environment.** Trends in Analytical Chemistry, v. 31, p. 61-24, 2012. Acesso em: 02 Março de 2024.

REVISTA VALORES, Volta Redonda, 5, e-5030, 2020. Acesso em: 02 Março de 2024.

SATTAR, A.; BOFENG, B.; KHALIL, M.; SAJJAD, M. **Detailed analysis of structural, optical and photo catalytic properties of Spinel Nickel doped Magnesium Zinc Ferrites at different substitutions.** (2022). Inorganic Chemistry Communications. v. 142, p. 109505. 10.1016/j.inoche.2022.109505. Acesso em: 15 Março de 2024.

SCHÄFER, THAYNARA. M. Z. **Síntese, Caracterização e Aplicação de Nanopartículas de Óxido de Ferro (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)**. 2017. 83 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná/Campus de Toledo. Toledo, 2017. Acesso em: 02 de Março 2024.

SERAFIM, J. A.; AFONSO, R.; LUCILHA, A. C.; OLIVEIRA, L. A.; ROGÉRIO, P.; SILVA, C.; SILVA, M. R.; SARTORI, E. R.; DALL'ANTONIA, L. H. **Characterization and study of photocatalytic activity**. Química Nova, v. 37, p. 1158-1164, 2014. Acesso em: 02 de Março 2024.

SILVA, E. S. **Utilização da fotocatalise solar heterogênea no tratamento de efluentes industriais**. 2016. 91f. Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016. Acesso em: 02 de Março 2024.

SILVA, EMILLY CRUZ da. **Estudo da influência da temperatura na síntese de nanopartículas magnéticas de CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> para aplicações em eletrodos bifuncionais**. /Emilly Cruz da Silva. 2020. 68 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2020. Acesso em: 10 de Março 2024.

SILVA, L.; OLIVEIRA, J.; DUARTE, E. BARRETO, N. CAZETTA, M. (2017). **Descoloração do corante Azul Brillhante de Remazol R por leveduras isoladas de moluscos do Rio Subaé, no estado da Bahia, Brasil**. Engenharia Sanitária e Ambiental. 22. 10.1590/s1413-41522017157568. Acesso em: 02 de Março 2024. Acesso em: 02 de Março 2024.

SILVA, R.; SILVA, G.; MILANEZ, V.; SILVA, R. (2020). **Estudo da toxicidade de efluente têxtil submetido a processo oxidativo avançado**. Demandas Essenciais para o Avanço da Engenharia Sanitária e Ambiental 2, (1), pp. 205–213. doi: 10.22533/at.ed.47920210120. Acesso em: 02 de Março 2024.

SILVA, T. F. C. V.; PERI, P.; FAJARDO, A. S.; PAULISTA, O. P.; SOARES, P. A.; Acesso em: 16 de Março 2024.

MARTÍNEZ-HUITLE, C. A.; VILAR, V. J. P. **Solar-driven heterogeneous photocatalysis using a static mixer as TiO<sub>2</sub>-P25 support: Impact of reflector optics and material**. Chemical Engineering Journal, v. 435, Part 1, 134831, 2022. Acesso em: 02 de Março 2024.

SAFITRI, Y. A.; INDRAWAN, I. W. A.; WINARSIH, S. **Rhodamine B induces oxidative stress and cervical epithelial cell proliferation in the uterus**. Toxicology Reports, v. 2, p. 1434–1436, 2015. Acesso em: 15 de Janeiro 2024.

SERPONE, N.; EMELINE, A. V. **Suggested terms and definitions in photocatalysis and radiocatalysis**. International Journal of Photoenergy, 4: 91, 2002. Acesso em: 07 de Janeiro 2024.

SINGH, S.; PARVEEN, N.; GUPTA, H. **Adsorptive decontamination of rhodamine-B from water using banana peel powder: A biosorbent**. Environmental Technology and Innovation, v. 12, p. 189–195, 2018. Acesso em: 02 de Fevereiro 2024.

SHARMA, P.; KAUR, H.; SHARMA, M.; SAHORE, V. **A review on applicability of naturally available adsorbents for the removal of hazardous dyes from aqueous waste.** Environmental Monitoring and Assessment, v. 183, p. 151-195, 2011. Acesso em: 02 de Março 2024.

VAIANO, V.; SANNINO, D.; SACCO, O. **The use of nanocatalysts (and nanoparticles) for water and wastewater treatment by means of advanced oxidation processes.** In: AMRANE, A. A.; RAJENDRAN, S.; NGUYEN, T. A.; ASSADI, A. A.; SHAROBA, A. M. Nanotechnology in the beverage industry, Elsevier, 2020. Acesso em: 27 de Março 2024.

ZOLLINGER, H. **Color chemistry, synthesis,** properties and application of organic dyes and pigments. Weinheim, New York, p. 367, 1987. Acesso em: 02 de Março 2024.