

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Física

Síntese e caracterização de material compósito zeólita/grafeno aplicado na
purificação de água

Camile de Oliveira Martins

Prof. Dr. Alexandre Mesquita

Rio Claro (SP)
2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

CAMILE DE OLIVEIRA MARTINS

SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAL COMPÓSITO ZEÓLITA/GRAFENO
APLICADO NA PURIFICAÇÃO DE ÁGUA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual
Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do
grau de Bacharel em Física.

Rio Claro - SP

2025

M386s Martins, Camile de Oliveira
 Síntese e caracterização de material compósito
 zeólita/grafeno aplicado na purificação de água / Camile de
 Oliveira Martins. -- Rio Claro, 2025
 30 p. : il., tabs., fotos

 Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Física) -
 Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de
 Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro
 Orientador: Alexandre Mesquita

 1. Filtração. 2. Rodamina 6G. 3. Zeólita. 4. Espectroscopia. I.
 Título.

CAMILE DE OLIVEIRA MARTINS

SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAL COMPÓSITO ZEÓLITA/GRAFENO APLICADO NA PURIFICAÇÃO DE ÁGUA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual
Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do
grau de Bacharel em Física.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Alexandre mesquita (orientador)

Prof. Dr. Adriano José Galvani Otuka

Prof. Dr. Makoto Yoshida

Rio Claro, 05 de novembro de 2025.

Assinatura do(a) aluno(a)

Assinatura do(a) orientador(a)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, primeiramente, ao meu orientador, o Prof. Dr. Alexandre Mesquita, não apenas pelo suporte acadêmico, mas também por todos os conselhos valiosos que recebi desde o meu primeiro ano de faculdade e pelo incentivo que recebi durante a minha graduação.

Aos meus amigos da faculdade e colegas de curso, por todo suporte, empatia e companheirismo que compartilhamos durante esse período. Em especial a Jenniffer Luana de Moraes Marostegan e a Giovana Trevejo que estão se formando junto comigo.

A minha família, aos que me apoiaram, acreditaram e que nunca saíram do meu lado. Aos meus avós, Jesuina Graciano e Aparecido Martins(*in memoriam*) por terem sido o meu maior motivo.

Em especial a Roberta Berdu pela contribuição neste trabalho e a UNESP.

RESUMO

A utilização de águas residuais domésticas tratadas tornou-se uma necessidade e é geralmente aceita mundialmente como um importante recurso hídrico devido à escassez global de abastecimento de água. O material mais utilizado atualmente na purificação de água é o carvão ativado derivado de fontes vegetais. Além do carvão ativado, a zeólita também vem sendo empregada no tratamento de água, principalmente em processos industriais. Entretanto, tem sido mostrado que o grafeno quimicamente sintetizado, bem como o óxido de grafeno, pode ser ancorado na superfície da areia de rio para fazer adsorventes eficazes que removem íons de metais pesados, pesticidas, e corantes naturais. Esses materiais apresentam maior capacidade de adsorção em comparação ao carvão ativado quando se comparam massas iguais de carbono. A zeólita é um mineral poroso de origem natural e será funcionalizada com ácido cítrico e para avaliar a eficiência desse processo, o corante Rodamina 6G (R6G) será utilizado como marcador. A zeólita foi submetida a um tratamento térmico e posteriormente modificada com ácido cítrico, visando obter um material do tipo grafeno/óxido de grafeno. A partir desse material, foram produzidos filtros e realizada a adsorção do corante rodamina 6G como teste de eficiência. O processo de filtração foi realizado variando-se tanto a massa do material adsorvente quanto o volume da solução. As amostras resultantes foram analisadas por espectroscopia na região ultravioleta-visível(UV-Vis), e os resultados indicaram que o filtro apresentou melhor desempenho com o aumento da massa e do volume utilizados, evidenciado pela diminuição do pico de absorção da rodamina na solução filtrada.

Palavras-chave: Adsorção, filtro, zeólita, rodamina 6G e espectroscopia.

ABSTRACT

The use of treated domestic wastewater has become a necessity and is generally accepted worldwide as an important water resource due to the global scarcity of freshwater supplies. The most commonly used material for water purification today is activated carbon derived from plant sources. In addition to activated carbon, zeolite has also been employed in water treatment, particularly in industrial processes. However, it has been shown that chemically synthesized graphene, as well as graphene oxide, can be anchored onto the surface of river sand to create effective adsorbents capable of removing heavy metal ions, pesticides, and natural dyes. These materials exhibit higher adsorption capacity compared to activated carbon when equal carbon masses are compared. Zeolite is a naturally occurring porous mineral and was functionalized with citric acid. To evaluate the efficiency of this process, the dye Rhodamine 6G (R6G) was used as a marker. The zeolite underwent thermal treatment and was subsequently modified with citric acid to obtain a graphene/graphene oxide-type material. From this material, filters were produced, and the adsorption of Rhodamine 6G was performed as an efficiency test. The filtration process was carried out by varying both the mass of the adsorbent material and the volume of the solution. The resulting samples were analyzed by ultraviolet-visible (UV-Vis) spectroscopy, and the results indicated that the filter exhibited better performance with increasing mass and volume, as evidenced by the decrease in the absorption peak of Rhodamine in the filtered solution.

Keywords: Adsorption, Filter, Zeolite, rhodamine 6G, Spectroscopy.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1 Tratamento de Efluentes.....	11
2.2. Zeólita.....	12
2.3. Grafeno e Ácido Cítrico.....	13
2.4. Rodamina 6G.....	15
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	17
3.1. Preparação do Elemento Filtrante.....	18
3.2. Espectroscopia de Fluorescência Uv-Vis.....	20
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	21
4.1. Efeito da Massa do Elemento Filtrante.....	21
4.2. Efeito do Volume da Solução filtrante.....	26
5. CONCLUSÃO.....	30
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	31

1. INTRODUÇÃO

A utilização de águas residuais domésticas tratadas tornou-se uma necessidade e é aceita mundialmente como um importante recurso hídrico devido à escassez global de abastecimento de água (Juliato, 2019). Um dos objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS) da ONU trata-se de assegurar a disponibilidade de água limpa e saneamento básico para todos, ou seja, melhorar a qualidade de água ao remover impurezas, reduzindo a poluição e minimizando a liberação de produtos químicos e materiais perigosos (“Sustainable Development Goal 6”, [S.d.]).

A poluição de água pode ser definida de diversas maneiras, uma delas é que a poluição da água ocorre quando uma ou mais substâncias que modificam a água de forma negativa são despejadas nela, seja de origem industrial ou até mesmo poluentes de origem doméstica. O impacto desses atos é que os resíduos tóxicos despejados em água causam problemas sérios para o meio ambiente, saúde pública e aos animais (Crini; Lichtfouse, 2019). Existem algumas causas da poluição de água, como a de origem doméstica que costuma surgir a partir de atividades do cotidiano, como cozinhar e limpar. A poluição de origem industrial surge devido ao mal descarte de substâncias que não são biodegradáveis, já a poluição agrícola, pode surgir a partir de fertilizantes químicos e no controle de pesticidas, que ficam altamente concentradas em rios alterando o ecossistema do meio (Afolalu et al., 2022).

O material mais utilizado atualmente na purificação de água é o carvão ativado derivado de fontes vegetais. Ele é amplamente utilizado tanto em processos catalíticos quanto na remoção de poluentes industriais devido sua estrutura microporosa desenvolvida e sua alta área superficial, por este motivo é altamente utilizado na remoção de poluentes em água potável. (Kazempour; Bagheri-Mohagheghi, 2023). O carvão ativado é caracterizado pela sua estrutura microporosa e sua alta superfície de contato, tornando práticos tanto na purificação de gases quanto na remoção de poluentes na água potável. Ele pode ser produzido de duas maneiras; a primeira é o método de ativação química que utiliza agentes químicos desidratantes que suprimem a

formação de alcatrão durante o processo. Esse processo resulta em um maior rendimento de carbono poroso, as temperaturas de ativação são mais baixas e o tempo de processamento é menor. A segunda maneira é através da ativação física, que ocorre em oxidante, empregando gases como CO_2/O_2 . Por não utilizar produtos químicos adicionais, esse método é considerado mais limpo, mas ele necessita de condições mais severas de processamento. Porém, o carvão ativado possui uma desvantagem na purificação de água; os poluentes que ele absorve faz com que micróbios se multipliquem dentro dele, isso implica que a água pode ser contaminada e reduz a vida útil do carbono ativado durante a purificação da água (Kazempour; Bagheri-Mohagheghi, 2023).

Além do carvão ativado, a zeólita também vem sendo empregada no tratamento de água, principalmente em processos industriais, tratamento de água de poço, mina, rios, lagos e até mesmo para tratamento de água da rede pública (Wang; Peng, 2010). As zeólitas naturais são minerais com estrutura porosa e apresentam diversas propriedades físico-químicas relevantes. Sua aplicação no tratamento de água destaca-se como uma técnica bastante promissora, devido sua estrutura porosa que favorece o processo de adsorção, permitindo a fixação de íons e moléculas na sua superfície. Essa característica é especialmente útil na remoção de metais pesados, amônio e outros contaminantes presentes em águas residuais e potáveis. Essa eficiência está diretamente relacionada à sua natureza de troca iônica, que possibilita a substituição seletiva de cátions presentes na solução, tornando-as materiais de grande interesse ambiental e tecnológico (Wang; Peng, 2010). Os poluentes presentes nas águas representam sérios riscos ambientais e à saúde humana, exigindo técnicas eficazes de remoção. Tradicionalmente, são utilizados métodos como precipitação, osmose reversa e ultrafiltração. Contudo, o uso de zeólitas naturais tem se destacado como uma das alternativas mais eficientes. Isso se deve ao seu baixo custo e sua capacidade de regeneração com mínima produção de resíduos (Margeta; Vojnovic; Logar, [S.d.]). Outro ponto relevante é que as zeólitas podem ser quimicamente modificadas para ampliar sua afinidade por diferentes poluentes, tanto catiônicos quanto aniônicos, tornando o processo de tratamento ainda mais versátil e eficiente.

Dessa forma, as zeólitas configuram-se como um material de grande potencial para soluções sustentáveis no gerenciamento da qualidade da água.

Este trabalho propõe o estudo do tratamento do corante Rodamina 6G (R6G) por meio do uso de zeólita revestida com ácido cítrico e submetida a tratamento térmico, com o objetivo de obter um material do tipo grafeno e óxido de grafeno, visando avaliar a eficiência do processo na remoção de impurezas e contaminantes presentes na água. A análise da solução tratada será realizada por espectroscopia de fotoluminescência, que permite medir a concentração do contaminante nas amostras, com base no fenômeno de fluorescência. A R6G é um corante conhecido por suas propriedades fluorescentes e será utilizada devido à sua intensa emissão de luz visível quando excitada por radiação ultravioleta onde possui um pico característico na faixa de emissão fluorescente entre os comprimentos de onda de 500 nm e 700 nm.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Tratamento de Efluentes

Efluentes são resíduos que surgem a partir de atividades industriais, domésticas ou agrícolas que contêm poluentes que causam riscos à saúde pública. O tratamento é essencial para evitar a contaminação de águas e na proteção do meio ambiente. Para um tratamento de efluentes eficaz, é necessário a concentração de cada poluente e suas características físico-químicas e o tipo de composto presente. A saúde pública também está relacionada com o descarte incorreto de plásticos, aumentando o acúmulo de microplásticos, que implica na propagação de poluentes por conter contaminantes químicos em sua composição (Babuji et al., 2023). O principal objetivo do tratamento de efluentes é melhorar a qualidade da água até que ela atenda aos padrões de segurança exigidos antes de seu retorno ao meio ambiente. Os processos de tratamento devem considerar as características específicas de cada tipo de efluente, visando reduzir a concentração de poluentes e remover sólidos suspensos que, quando não controlados, podem causar uma alta disseminação de contaminantes. Do ponto de vista ambiental, é essencial o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis, que vão contribuir para a preservação dos recursos hídricos. Já no

cenário econômico, o tratamento adequado dos efluentes evita a escassez de água pois reduz os custos associados ao consumo (Sathya et al., 2022)

2.2. Zeólita

As zeólitas são materiais cristalinos que possuem aplicações em diversas áreas, sendo utilizadas como catalisadores, adsorventes e trocadores iônicos (Nuno Almeida et al., 2025). Sua fórmula empírica é dada por $M(2/n)O \cdot Al_2O_3 \cdot xSiO_2 \cdot yH_2O$, onde M representa qualquer metal alcalino, n é a carga desse átomo, x é um número entre 2 e 10, e y varia de 2 a 7. A zeólita é conhecida devido sua porosidade e esses poros conseguem receber certas moléculas e átomos que conseguem entrar em sua estrutura, essas características tornam a zeólita essencial para diversas aplicações. Atualmente, sua síntese tem recebido muita atenção no seu uso para adsorventes naturais e de baixo custo (Kazempour; Bagheri-Mohagheghi, 2023).

Sua composição consiste em tetraedros do tipo TO_4 , onde T pode ser alguns elementos como o silício (Si). Esses tetraedros se conectam por átomos de oxigênio compartilhados, formando unidades estruturais básicas que se organizam em anéis e, posteriormente, em estruturas mais complexas, como canais e cavidades. A forma como esses blocos se agrupam definem a topologia de cada zeólita, ou seja, o tipo de rede e o tamanho dos espaços vazios em seu interior. Na figura 1, é possível observar alguns exemplos dessas estruturas (Nuno Almeida et al., 2025)

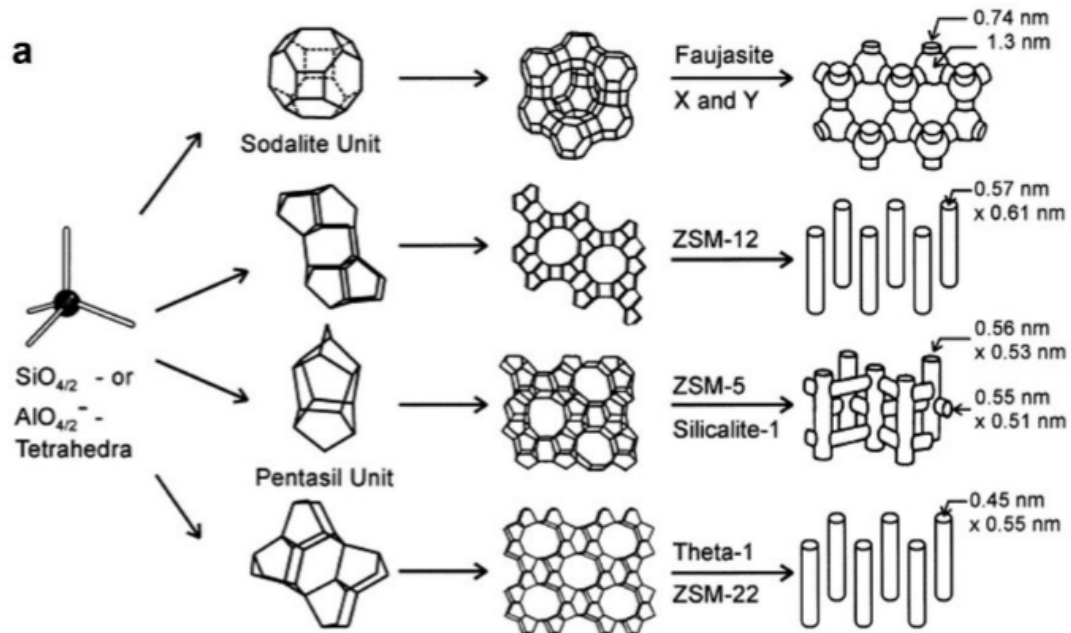


Figura 1 – Estruturas de diferentes tipos de zeólitas, destacando a organização de seus microporos e suas respectivas dimensões(Nuno Almeida et al., 2025).

Esses canais e cavidades variam em tamanho nanométrico e são responsáveis pelas propriedades de adsorção das zeólitas, permitindo que elas se tornem capazes de reter a passagem de algumas substâncias. A polaridade da água faz com que suas moléculas formem ligação de hidrogênio entre si, como as zeólitas são minérios porosos e hidrofílicos, essa propriedade permite que a água penetre nos microporos, interagindo com a estrutura interna da zeólita. Esse efeito é fundamental no processo de filtração (Nuno Almeida et al., 2025).

2.3. Grafeno e Ácido Cítrico

O grafeno é uma folha bidimensional formada por átomos de carbono em uma rede hexagonal. O óxido de grafeno é essencialmente uma folha de grafeno, mas com grupos funcionais com oxigênio, isso faz com que ele perca parte de sua condutividade elétrica, mas ganha uma maior afinidade com a água (Marques, [S.d.]). Existem alguns estudos que mostram que ancorar o óxido de grafeno em alguns materiais utilizados para filtros pode auxiliar na extração de corantes. De acordo com (Almeida, 2022), a

partir da pirólise do ácido cítrico, é possível formar o óxido de grafeno em temperaturas baixas (200 °C a 400 °C). Porém, devido ao longo processo da pirólise em atmosfera aberta ocorre uma perda do material, necessitando de uma superfície de contato maior para uma alta concentração de óxido de grafeno (Almeida, 2022). Na figura 2, é mostrado o processo de carbonização do ácido cítrico para a síntese de óxido de grafeno. Na pirólise do ácido cítrico, a carbonização incompleta leva à formação dos PQGs (Pontos Quânticos de Grafeno), pequenas partículas de carbono com grupos funcionais oxigenados que possuem propriedades fotoluminescentes. Já a carbonização completa origina o OG (Óxido de Grafeno), material amplamente utilizado em processos de adsorção.

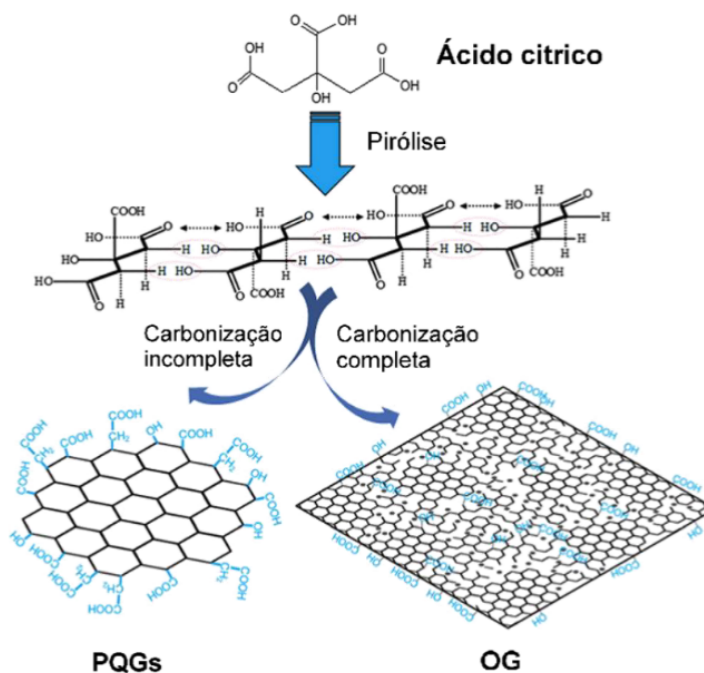


Figura 2 - Processo de formação do AC em óxido de grafeno (Marques, [S.d.]).

Existem alguns estudos que mostram que a síntese do óxido de grafeno realizada em diferentes atmosferas e faixas de temperatura pode gerar distintos tipos de luminescência. Isso influencia diretamente as propriedades ópticas do material, podendo intensificar ou até mesmo otimizar suas características fluorescentes. Com isso, o grafeno e seus derivados têm gerado um grande interesse para o

desenvolvimento de compósitos por ser versátil para a aplicação de diversas áreas(Almeida, 2022).

2.4. Rodamina 6G

As Rodaminas são corantes potentes da família dos xantenos e são conhecidos por suas propriedades ópticas (Marques, [S.d.]) A rodamina 6G possui um pico característico de emissão entre 500 nm e 600 nm, como mostrado na figura 3. Esses corantes se destacam devido seu baixo custo, boa solubilidade em solventes como água, etanol e metanol, além da intensa fluorescência que apresentam, o que possibilita seu uso em diferentes áreas (Juliato, 2019). A rodamina 6G é um corante orgânico quimicamente estável, com um elevado rendimento quântico de fluorescência. Essa característica torna o corante útil em diversas aplicações, como pigmento fluorescente, marcador de traçagem em água. Em estudos ambientais, por exemplo, soluções aquosas de rodamina 6G são empregadas para visualizar padrões de fluxo, devido à sua forte fluorescência e boa solubilidade em água (Ahmed et al., 2021). A figura 3 exibe à título de exemplo um espectro de fluorescência para a rodamina 6G com comprimento de onda de excitação de 500 nm na concentração de $2 \mu\text{m}$ em que se observa um pico assimétrico centrado em torno de 550 nm, característico desse composto. A largura a meia altura (FWHM) do pico espectral foi determinada a partir do espectro de emissão, onde $\text{FWHM} \approx 8.3 \text{ nm}$.

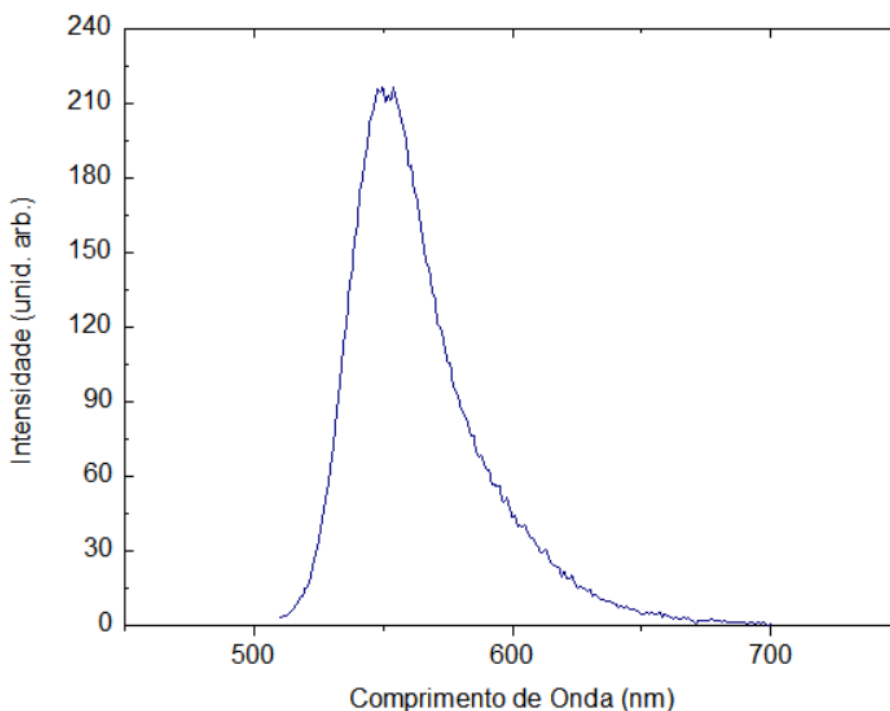


Figura 3- Curva da intensidade da Rodamina 6G excitado em $\lambda = 500\text{nm}$.

A estrutura molecular da R6G é composta por três anéis aromáticos ligados entre si, formando um sistema de ligações duplas conjugadas com elétrons π deslocalizados. Essa formação é responsável pela cor intensa e pela capacidade da molécula de absorver e emitir luz visível com alta eficiência. Além disso, a presença de grupos amino ligados a pequenas cadeias de carbono nas extremidades do anel principal contribui para a intensidade da fluorescência (Ahmed et al., 2021).

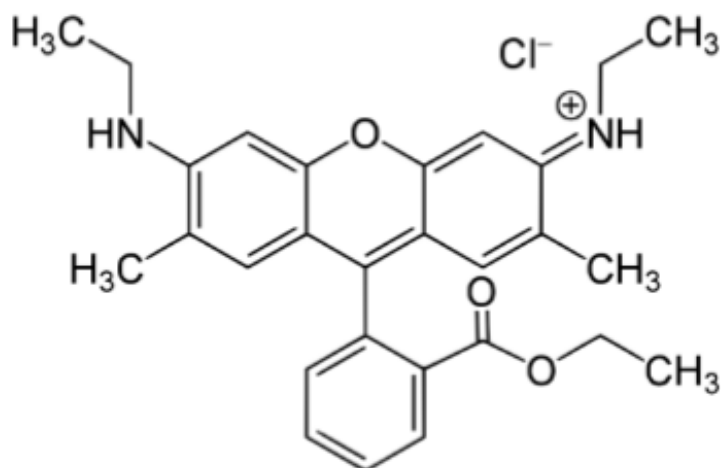


Figura 4 – Estrutura da rodamina 6G (Marques, [S.d.]).

A R6G é bastante utilizada em processos industriais para tingimento em fibras como a seda, por exemplo. Seu uso frequente implica que esse composto seja encontrado em águas residuais. A presença desse pigmento na natureza pode causar efeitos tóxicos (Pakhale; Gogate, 2021). Dessa forma, a rodamina 6G foi escolhida neste trabalho como pigmento marcador para avaliar a eficiência do filtro, uma vez que suas propriedades fluorescentes permitem observar se o corante ainda está presente após o processo de filtração.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados durante o processo estão listados na tabela a seguir com suas características.

Tabela 1. Disposição dos materiais utilizados com sua procedência e características.

<i>Materiais</i>	<i>Procedência</i>	<i>Características</i>
<i>Zeólita</i>	<i>Zeólita natural</i>	<i>Zeólita comercial fornecida pela empresa TEGA Engenharia. -</i>
<i>Ácido cítrico</i>	<i>Synth</i>	<i>Pureza: 99,5 %</i>
<i>Rodamina 6G</i>	<i>Acros Organics</i>	<i>Pureza: 99,0 %</i>
<i>Água deionizada</i>	-	-

Neste trabalho, foi utilizada a curva de calibração para determinar as concentrações de R6G obtidas, utilizando a relação entre a intensidade de fluorescência e a concentração, com o comprimento de onda de excitação de 500 nm (Marques, [S.d.]). Na Figura 5 é apresentada essa curva de calibração, em que foi graficada a intensidade da emissão fotoluminescente da R6G em função da concentração da solução em água deionizada desse composto. A solução inicial usada nas filtrações neste trabalho tinha uma concentração de R6G de 2 ppm.

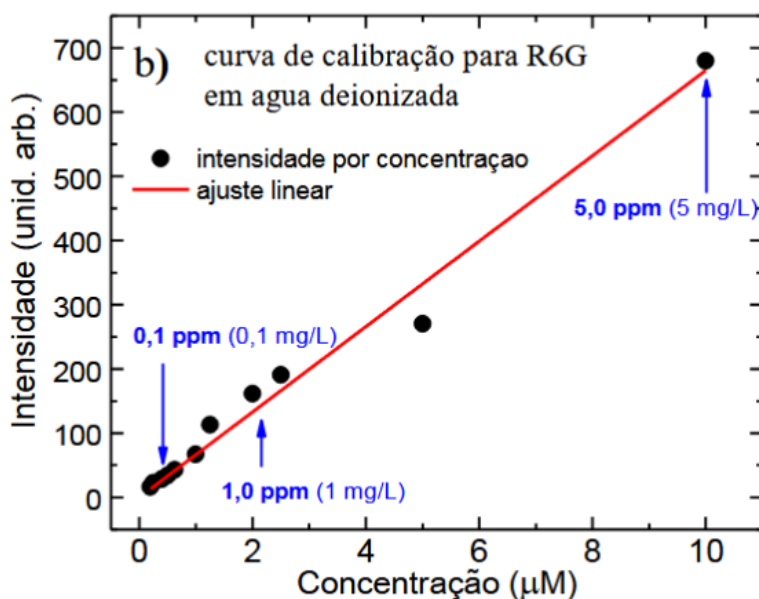


Figura 5 - Curva de calibração obtida a partir da fluorescência do R6G em diferentes concentrações em água deionizada (Marques, [S.d.]).

3.1. Preparação do Elemento Filtrante

A preparação do material filtrante iniciou-se com a lavagem da zeólita natural utilizando água deionizada. Este processo de lavagem foi repetido por dez vezes consecutivas, visando garantir a completa remoção de impurezas e partículas solúveis, até que a água de lavagem se apresentasse visualmente límpida e livre de resíduos do material. Posteriormente, realizou-se um tratamento em forno a 400 °C por um período de 4 horas, com o objetivo de eliminar quaisquer compostos e impurezas orgânicas permanentes na estrutura porosa da zeólita. Após este passo, procedeu-se ao revestimento da zeólita com ácido cítrico na proporção de 5% em relação à massa total do material. Para o revestimento, o ácido cítrico foi primeiramente dissolvido em água

deionizada, e a solução resultante foi adicionada à zeólita tratada termicamente. Esta mistura foi mantida em estufa a 80 °C por 24 horas, período necessário para garantir a completa fixação do ácido cítrico na estrutura porosa da zeólita.

Finalizada esta etapa, o material foi novamente submetido a tratamento térmico, desta vez a 300 °C, resultando na amostra denominada ZAC300 (zeólita modificada com ácido cítrico a 300 °C). Este tratamento final teve como objetivo estabilizar o modificador ácido na estrutura da zeólita, garantindo sua permanência durante os processos de filtração. Para avaliar a eficiência do material filtrante preparado, utilizou-se como modelo o corante Rodamina 6G (R6G), um pigmento muito utilizado em estudos de adsorção. Preparou-se soluções deste corante na concentração fixa de 2 µmol/L diluídas em água deionizada, que foram utilizadas para testar todas as amostras de filtro preparadas.

O método de filtração empregado foi o de coluna, que é uma técnica de separação que consiste na passagem da solução através de uma quantidade fixa do material adsorvente (ZAC300). Como ilustrado no esquema a seguir, este processo permite que as moléculas do corante sejam retidas nos poros da zeólita tratada, enquanto o solvente é coletado na saída da coluna. A Figura 6 ilustra esse esquema, em que a solução contendo o corante é transferida por meio da pipeta para a coluna preenchida com o material adsorvente. O efluente resultante é então coletado no béquer, permitindo observar a eficiência do processo de adsorção realizado pela zeólita tratada (ZAC300).

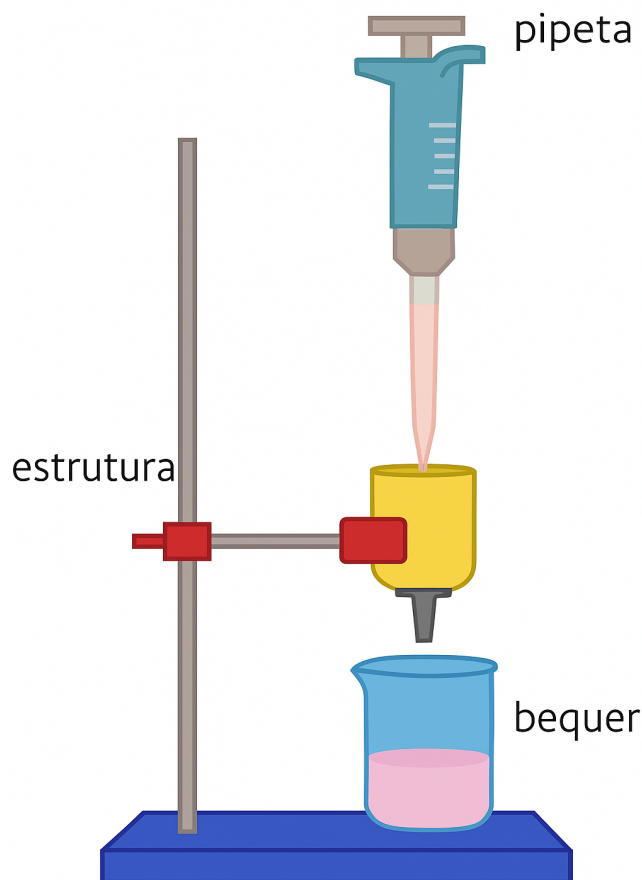


Figura 6 – Esquema da filtração em coluna do elemento.

3.2. Espectroscopia de Fluorescência Uv-Vis

A espectroscopia de fluorescência UV-Vis é uma técnica bastante utilizada em laboratórios que consiste na emissão de luz por uma molécula fluorescente, que ocorre após serem excitadas por luz ultravioleta (UV) ou luz visível (Vis) (Sun, 2008). Este fenômeno ocorre quando um elétron absorve a energia de um fóton e é promovido para um estado excitado. Porém, este estado é instável, com isso, em um intervalo de tempo muito curto, o elétron perde parte desta energia através de relaxações internas até ocupar um nível excitado de menor energia. Em seguida, o elétron volta para o estado fundamental, onde ele libera o excesso de energia na forma de fóton que geralmente possui uma energia menor do que o absorvido, como mostra esquema ilustrativo na figura 7 (Marques, [S.d.]).

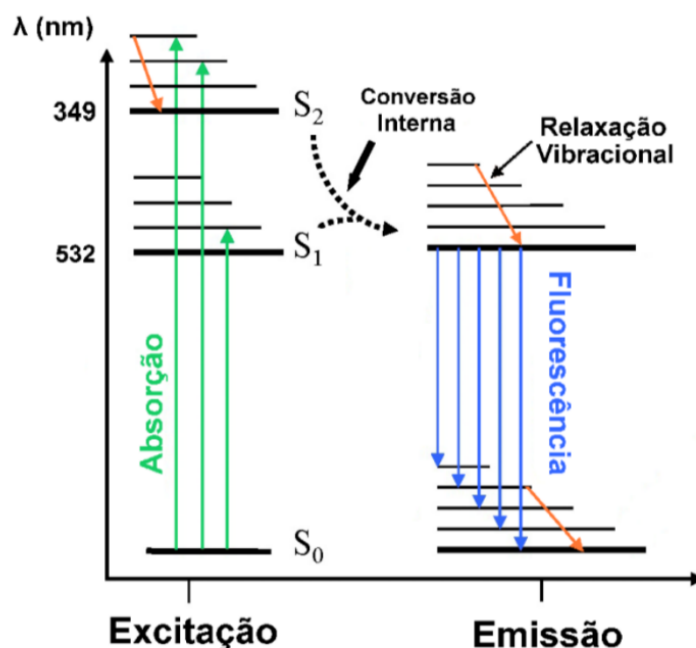


Figura 7 - Diagrama de Jablonski ilustrando os processos de absorção de energia, fluorescência (Marques, [S.d.]).

O diagrama de Jablonski é bastante utilizado para explicar processos que envolvem a absorção e a emissão de luz. Além disso, a luz emitida possui um comprimento de onda maior que a onda excitada, esse fato foi descoberto pelo George G. Stokes (Álvarez, [S.d.]). Foi utilizada esta metodologia para determinar a concentração de R6G presente nas amostras, a R6G foi escolhida como pigmento para verificar a capacidade de filtragem da amostra ZAC300 por ser um corante de alta intensidade de fluorescência.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Efeito da Massa do Elemento Filtrante

Para a análise do efeito da massa da zeólita na remoção do contaminante (R6G), foram utilizadas quatro diferentes quantidades do material ZAC: 0,5 g, 1,0 g, 2,0 g e 3,0 g e a zeólita pura (0,5 g). Em todas as etapas de filtração, o volume da solução

de R6G foi mantido fixo em 5 mL. As análises das amostras foram realizadas por meio de espectroscopia de fluorescência na região do visível. Na Figura 8 são apresentados os espectros de fluorescência em função da massa do elemento filtrante. Os resultados obtidos indicaram uma tendência crescente na eficiência de filtração com o aumento da massa da zeólita. A menor massa testada (0,5 g) apresentou um pico de intensidade maior, indicando baixa remoção do contaminante. Para esta mesma massa, mas comparando a zeólita pura com a amostra ZAC, verifica-se uma diminuição considerável na intensidade do pico relativo à R6G, e, por conseguinte, sua concentração. Este resultado indica que o revestimento da superfície da zeólita pura com ácido cítrico e tratado termicamente torna o processo de filtragem mais eficiente. Conforme o aumento da massa para a amostra ZAC observou-se uma diminuição na intensidade, evidenciando maior adsorção do contaminante pelo material. A massa que apresentou um melhor desempenho foi a de 3,0g, como mostrado na figura 8, alcançando uma eficiência de filtração de 97% e uma capacidade de adsorção (q) de $1,55 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, valor que representa a quantidade de contaminante removido por grama de adsorvente. Esse comportamento mostra como o aumento da massa do adsorvente favorece a adsorção devido à maior área superficial do material utilizado.

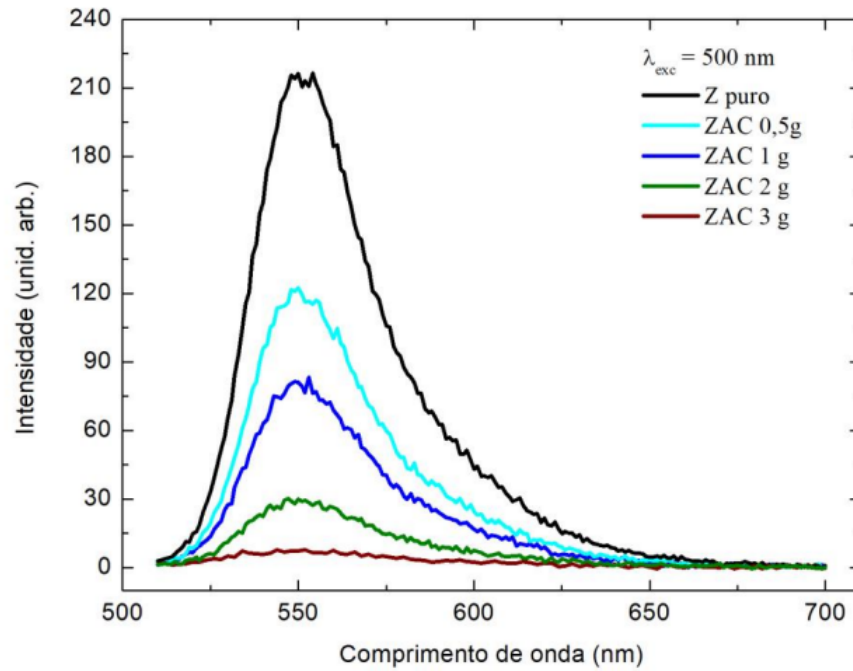


Figura 8 - Espectro de emissão das soluções filtradas utilizando diferentes quantidades de ZAC, com excitação em $\lambda=500$ nm.

Para a quantificação da eficiência do processo de remoção e da capacidade de adsorção do material ZAC, foram aplicadas duas equações fundamentais. A eficiência de filtração (EF) foi determinada com base na redução da absorvância da solução, utilizando a equação a seguir

$$EF(\%) = \left(\frac{C_0 - C}{C} \right) \times 100\% , \quad (1)$$

onde C e C_0 são as concentrações inicial e final da solução, respectivamente. A capacidade de adsorção q , expressa em $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, foi calculada usando

$$q = \frac{(C_0 - C)V}{m} , \quad (2)$$

onde C é concentração final, C_0 é a concentração inicial, V é o volume da solução e m é a massa do adsorvente utilizada.

Essa equação permite estimar a quantidade de contaminante removido por grama da amostra ZAC. A Tabela 1 apresenta os dados obtidos para cada análise experimental feita, mostrando as diferentes massas de ZAC utilizadas e seus respectivos valores de eficiência de filtração (EF) e capacidade de adsorção (q). Os resultados demonstram a relação entre a quantidade de adsorvente empregada e o desempenho do processo de remoção do contaminante, permitindo uma análise comparativa entre as diferentes amostras testadas. Na Figura 9 são mostrados os valores de EF em função da massa do elemento filtrante.

Tabela 1 - Quantidades de massa de ZAC utilizadas para os filtros com seus respectivos resultados de eficiência de filtração (EF) e de capacidade de filtração (q).

ZAC	EF(%)	q (mg/g)
3	97,05	1,55
2	88,05	2,12
1	68,05	1,64
0,5	54	1,29
Z pura	18,5	0,44

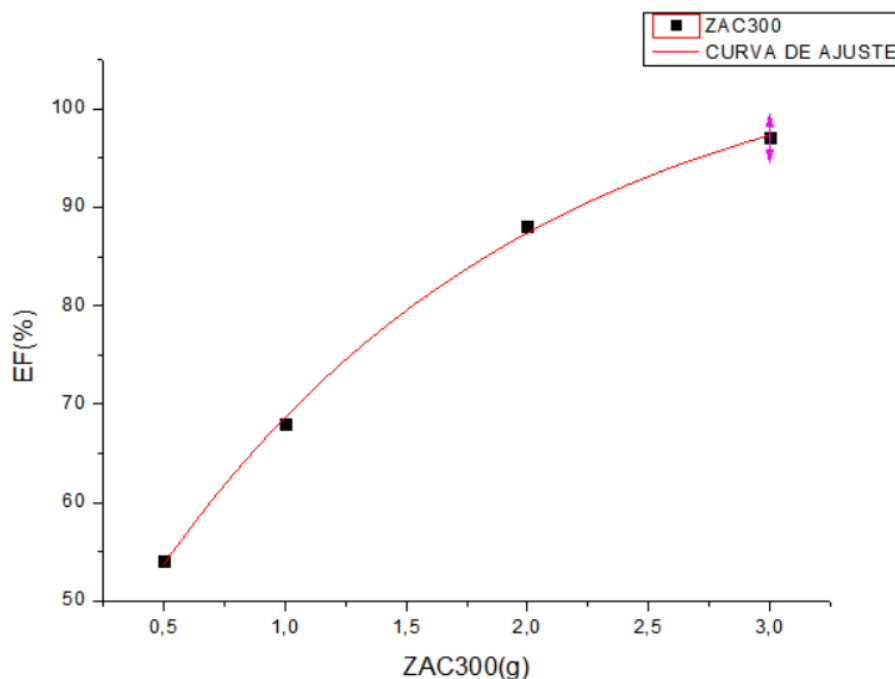


Figura 9 – Eficiência de remoção da Rodamina 6G em função da massa de zeólita.

O gráfico demonstra a relação diretamente proporcional entre a massa de ZAC e a eficiência de remoção do corante Rodamina 6G. Conforme a massa da amostra aumenta, observa-se um crescimento significativo na eficiência de remoção, que tende a uma estabilização em massas superiores. Os dados obtidos, tanto na tabela quanto no gráfico, confirmam que o aumento da massa de ZAC resulta em uma melhoria consistente tanto na eficiência de filtração.

Dentre as massas testadas, a de 3,0 g apresentou o melhor desempenho, atingindo a maior eficiência de remoção. Portanto, conclui-se que, o aumento da quantidade de ZAC favorece significativamente o processo de remoção do contaminante, com a eficiência tendendo à saturação conforme se aproxima da capacidade máxima do adsorvente.

4.2. Efeito do Volume da Solução filtrante

Para a avaliação do efeito do volume da solução, foram realizadas algumas análises, mantendo-se constante a massa de 3,0 g de ZAC em um único filtro, o qual foi reutilizado em todas as filtrações dessa etapa. Os volumes da solução contaminada com R6G foram variados entre 5 e 50 mL, como mostrado na figura 10 com o objetivo de avaliar o desempenho do filtro em relação ao aumento do volume de solução tratada. Na Figura 10 são mostrados os espectros de fluorescência com massa do elemento filtrante fixada em 3,0 g e em função do volume de solução.

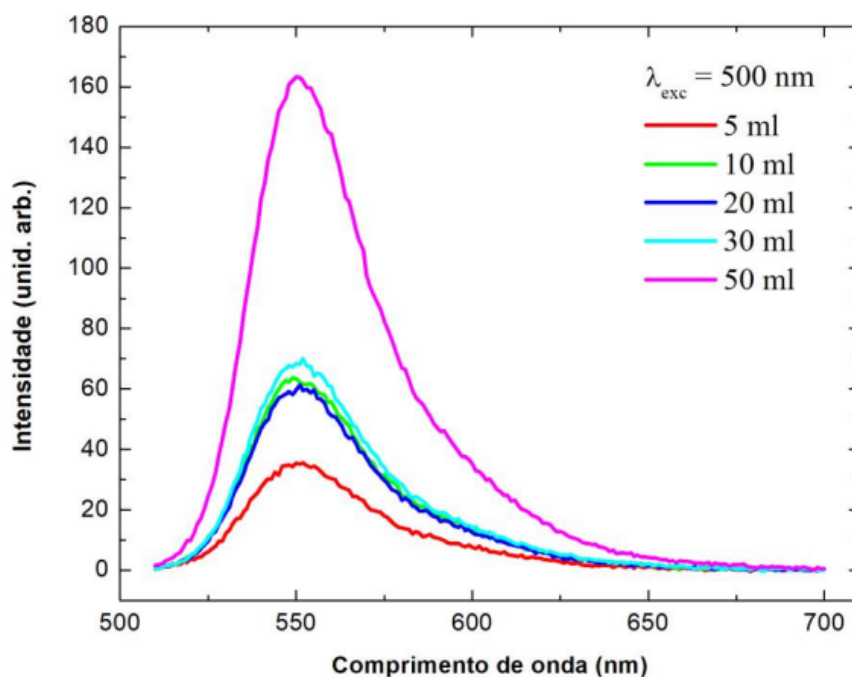


Figura 10 – Espectro de emissão de cada solução de Rodamina 6G filtrada, com excitação em $\lambda=500$ nm.

Os resultados indicam que o menor volume testado (5 mL) proporcionou o melhor desempenho, atingindo 86,36% de eficiência de filtração e uma capacidade de adsorção (q) de $1,37 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. Conforme o volume da solução foi aumentando, observou-se uma queda na eficiência; esse comportamento é esperado devido à diminuição da área superficial disponível para outras interações com as moléculas do contaminante. A tabela 2 apresenta os dados obtidos para os diferentes volumes de

solução de R6G filtrados sob as mesmas condições de massa do adsorvente. São mostrados os valores de eficiência de filtração (EF) e de capacidade de adsorção (q) correspondentes a cada volume testado. A análise da tabela mostra a uma eficiência decrescente com o aumento do volume, o que confirma a relação entre o volume da solução tratada e a eficiência do processo de adsorção.

Tabela 2 - Quantidades de solução de R6G filtradas com seus respectivos resultados de eficiência de filtração (EF) e de capacidade de filtração (q).

R6G(mL)	EF(%)	q (mg/g)
50	37,88	5,99
30	73,23	6,95
20	76,77	4,95
10	75,76	2,39
5	86,36	1,37

Esses valores mostraram que volumes maiores de solução resultam em menores eficiências de filtração quando se utiliza a mesma massa de adsorvente. Esse resultado tem relação com a saturação do material, que limita a quantidade de contaminante removido e com isso construiu-se um gráfico do volume em função da eficiência de filtração.

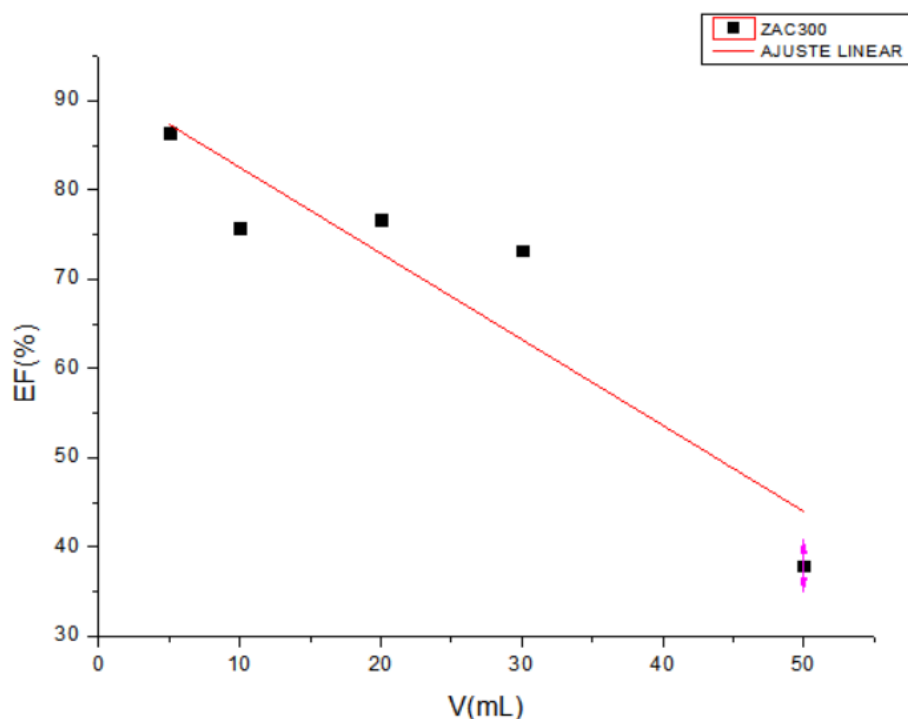


Figura 11 – Eficiência de remoção(EF%) em função da variação do volume(mL).

É possível analisar que conforme aumenta o volume da solução, há uma redução na eficiência da remoção do corante. Este comportamento indica uma relação inversa, em volumes menores filtrados correspondem a maiores percentuais de remoção e volumes maiores diminui a capacidade de remoção, ou seja, ao ser submetido a volumes mais elevados, o filtro tende a perder gradativamente sua eficiência, que diminui o desempenho do processo de filtração.

A figura 12 apresenta a capacidade de filtração $q(\text{mg/g}^{-1})$ em função do volume $V(\text{mL})$ de solução de R6G. Observa-se que a capacidade adsorptiva aumenta com o volume filtrado, o que é consistente com a equação (2) utilizada para o cálculo de q . Com isso, a capacidade de filtração $q(\text{mg/g}^{-1})$ depende diretamente do volume $V(\text{mL})$, o que permite uma aproximação de comportamento linear entre essas variáveis. Como a eficiência de remoção $EF(\%)$ expressa na equação (1) também está relacionado a q , é esperado que a relação entre $EF(\%)$ e $V(\text{mL})$ apresente uma tendência linear, conforme mostrado na figura 11. Essa tendência linear resulta da relação matemática existente entre as duas equações, de modo que a variação do volume interfere

proporcionalmente na quantidade removida do corante e, conseqüentemente, na eficiência do processo.

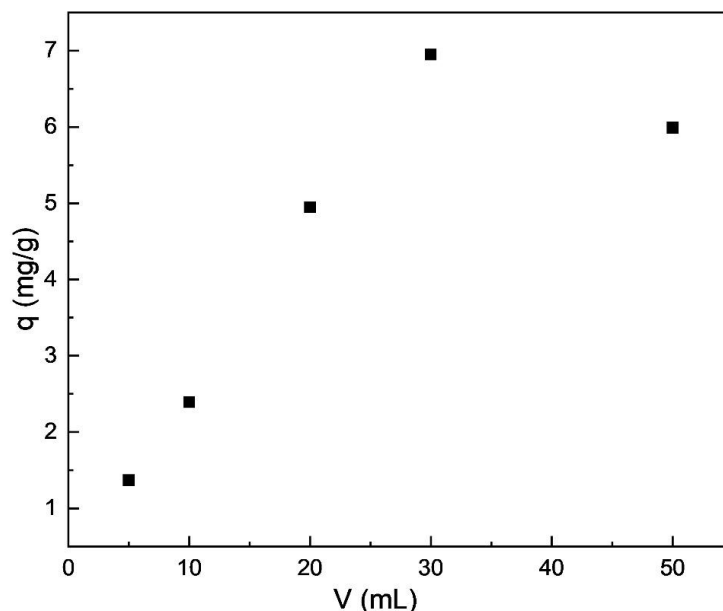


Figura 12 – Capacidade de filtração(mg/g) em função do volume(mL) de solução de R6G.

No entanto, observa-se um ponto fora da tendência esperada, correspondente ao maior volume testado (50 mL). Esse desvio pode ser atribuído devido à saturação do material filtrante, ou seja, a partir de determinado ponto, o adsorvente não possui mais sítios disponíveis para remover o corante de forma efetiva. Assim, embora o comportamento geral seja aproximadamente linear, o ponto fora da curva observado confirma o limite de capacidade do material, sugerindo que volumes muito elevados ultrapassam a eficiência máxima de adsorção possível em 3g do material.

5. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que o filtro de ZAC (Zeólita Modificada com Ácido Cítrico) demonstrou eficiência significativa na remoção do corante Rodamina 6G (R6G), atendendo ao objetivo proposto neste trabalho. Foram analisados dois parâmetros principais: a variação de massa e a variação de volume da solução. Observou-se que o aumento da massa de ZAC resultou em maior desempenho do sistema, sendo o melhor resultado obtido com 3,0 g do material. Nesse parâmetro, constatou-se que a eficiência do processo aumentou proporcionalmente à massa empregada, refletindo uma maior capacidade de adsorção do corante.

Em relação à variação de volume, verificou-se que volumes menores da solução apresentaram maior eficiência na remoção da R6G, enquanto volumes maiores levaram à saturação do material, reduzindo a taxa de remoção. Esses resultados indicam que a capacidade de adsorção da ZAC é dependente tanto da quantidade de material disponível quanto da concentração do corante no meio.

A análise da solução tratada por espectroscopia de fotoluminescência confirmou a redução da intensidade de emissão característica da R6G, evidenciando a diminuição da concentração do corante após o tratamento. Isso comprova a eficácia do processo proposto na remoção de contaminantes orgânicos da água. Dessa forma, o filtro desenvolvido à base de zeólita modificada com ácido cítrico e submetido a tratamento térmico apresentou desempenho promissor, sendo uma alternativa mais sustentável para o tratamento de efluentes.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFOLALU, Sunday A. *et al.* Waste pollution, wastewater and effluent treatment methods – An overview. **Materials Today: Proceedings**, v. 62, p. 3282–3288, 2022.

AHMED, Hanan *et al.* Using femtosecond laser pulses to study the nonlinear optical properties of rhodamine 6G dissolved in water. **Journal of Molecular Liquids**, v. 340, p. 117199, out. 2021.

ALMEIDA, Leonardo de Assis. Síntese e caracterização de óxidos de grafeno a partir da pirólise de ácido cítrico em atmosfera inerte de nitrogênio. 24 nov. 2022.

ÁLVAREZ, Christian Hernández. Fluorescence of Molecules and Polymers. [S.d.].
BABUJI, Preethi *et al.* Human Health Risks due to Exposure to Water Pollution: A Review. **Water**, v. 15, n. 14, p. 2532, jan. 2023.

CRINI, Grégorio; LICHTFOUSE, Eric. Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. **Environmental Chemistry Letters**, v. 17, n. 1, p. 145–155, 1 mar. 2019.

JULIATO, Felipe Bonganha. Curso de Graduação em Física. 2019.

KAZEMPOUR, A.; BAGHERI-MOHAGHEGHI, M. M. Activated Carbon/Zelite Hybrid Nanocomposite for Drinking Water Treatment Applications: Structural, Optical, and Surface Adsorption Properties. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 234, n. 11, p. 669, 17 out. 2023.

MARGETA, K.; VOJNOVIC, B.; LOGAR, N. Zabukovec. Development of Natural Zeolites for Their Use in Water-Treatment Systems. <http://www.eurekaselect.com>, [S.d.].
MARQUES, Paulo Henrique Colli. Síntese e caracterização de compósitos de óxido de. [S.d.].

NUNO ALMEIDA, José *et al.* Zeolite–Water Chemistry: Characterization Methods to Unveil Zeolite Structure. **Chemistry–Methods**, v. 5, n. 4, p. e202400076, 2025.

PAKHALE, Vinod D.; GOGATE, Parag R. Removal of Rhodamine 6G from Industrial Wastewater Using Combination Approach of Adsorption Followed by Sonication.

Arabian Journal for Science and Engineering, v. 46, n. 7, p. 6473–6484, 1 jul. 2021.

SATHYA, K. *et al.* A comprehensive review on comparison among effluent treatment methods and modern methods of treatment of industrial wastewater effluent from different sources. **Applied Water Science**, v. 12, n. 4, p. 70, 21 mar. 2022.

SUN, Da-Wen (ORG.). **Modern Techniques for Food Authentication**. 1. Aufl ed. s.l.: Elsevier professional, 2008.

Sustainable Development Goal 6: Água potável e saneamento | As Nações Unidas no Brasil. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/6>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

WANG, Shaobin; PENG, Yuelian. Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment. **Chemical Engineering Journal**, v. 156, n. 1, p. 11–24, 1 jan. 2010.