

# **Cinética da descoloração do Corante Reativo Preto B pelo método de Fotocatálise Heterogênea**

Camilly Bianca Domingues<sup>a</sup>, Gabrielle Torres Chaves<sup>a</sup>, Guylherme Correia Silva<sup>a</sup>, Kauã de Freitas da Dalt<sup>a</sup>, Laísa Feustel Budinheski<sup>a</sup>, Luana Camile Hornburg<sup>a</sup>, Fernando Manzotti de Souza<sup>b</sup>.

fernando.manzotti@ifsc.edu.br\*

<sup>a</sup> - Discente do Instituto Federal de Santa Catarina câmpus Jaraguá do Sul - Centro.

<sup>b</sup> - Docente do Instituto Federal de Santa Catarina câmpus Jaraguá do Sul - Centro.

## **RESUMO**

A fotocatalise heterogênea é uma alternativa eficiente no tratamento de efluentes, destacando-se pela capacidade de degradar compostos orgânicos com o uso combinado de luz e catalisador. Corantes sintéticos, como o Reativo Preto B, amplamente utilizados na indústria têxtil, representam um desafio ambiental devido à sua estabilidade e toxicidade. Este trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência da fotocatalise na descoloração desse corante, utilizando um sistema experimental composto por uma câmara revestida com alumínio, luz UV e agitador magnético. Ensaio preliminares com UV e ZnO (óxido de zinco) isoladamente resultaram em baixas taxas de descoloração (33,6% e 4,8%, respectivamente), evidenciando a necessidade de ação conjunta. Posteriormente, foram realizados testes com solução de 10 mg·L<sup>-1</sup> de corante e diferentes massas de ZnO (25 mg, 50 mg e 100 mg), nas formas calcinada (400 °C) e não calcinada. Os resultados demonstraram até 99% de descoloração em aproximadamente uma hora. A massa do catalisador influenciou a velocidade inicial da reação, mas não o resultado final, e a calcinação teve efeito mínimo. A cinética observada foi de primeira ordem, indicando que a fotocatalise heterogênea é uma estratégia promissora para o tratamento de efluentes têxteis.

Palavras-chaves: Fotocatálise Heterogênea, Corante Reativo Preto B, Cinética de Descoloração, Catalisador.

## **ABSTRACT**

Heterogeneous photocatalysis is an efficient alternative for treating effluents, standing out for its ability to degrade organic compounds through the combined action of light and catalyst. Synthetic dyes like Reactive Black B, widely used in the textile industry, pose an environmental challenge due to their stability and toxicity. This study aimed to evaluate the efficiency of photocatalysis in the decolorization of this dye using an experimental setup composed of an aluminum-lined chamber, UV light, and a magnetic stirrer. Preliminary tests with UV light and zinc oxide (ZnO) alone showed low decolorization rates (33.6% and 4.8%, respectively), highlighting the need for a combined process. Subsequent tests were conducted with a 10 mg·L<sup>-1</sup> dye solution and varying ZnO masses (25 mg, 50 mg, and 100 mg), both in calcined (400 °C) and non-calcined forms. Results showed up to 99% decolorization in approximately one hour. Catalyst mass influenced the initial reaction rate but not the final

outcome, and calcination had minimal effect. The reaction followed first-order kinetics, indicating that heterogeneous photocatalysis is a promising strategy for the treatment of textile effluents.

Keywords: Heterogeneous Photocatalysis, Reactive Black B Dye, Decolorization Kinetics, Catalyst.

## 1. INTRODUÇÃO

A poluição causada por corantes têxteis representa um desafio ambiental global. A indústria têxtil, responsável pela produção de vestuário e têxteis domésticos, gera grandes volumes de efluentes contendo corantes sintéticos (Marinho *et al.*, 2013). Esses, por serem altamente resistentes à degradação biológica, causam danos significativos aos ecossistemas aquáticos. Além disso, por conta da maioria dos corantes terem uma alta solubilidade na água e baixa degradabilidade, eles se tornam os componentes mais preocupantes nos resíduos provenientes da indústria têxtil (Marinho *et al.*, 2013).

Diante dessas questões um estudo sobre a descoloração do Corante Reativo Preto B pelo método de fotocatalise heterogênea foi realizado, seus malefícios ao ecossistema e qual a maneira mais eficaz de tratamento para estes efluentes industriais, tendo em vista seu método de aplicação, condições operantes, custo, versatilidade e eficiência.

O corante reativo preto B (RPB), é amplamente utilizado pelas indústrias têxteis pelo mundo, destaca-se pela sua toxicidade e persistência ambiental (Pinheiro, 2011). Diante desse cenário, o desenvolvimento de tecnologias eficazes para o tratamento desses efluentes torna-se fundamental. Entre as diversas alternativas, os processos oxidativos avançados (POAs), como a fotocatalise heterogênea, têm se mostrado promissor.

A fotocatalise heterogênea, utiliza semicondutores como o ZnO devido à sua não toxicidade, e a luz como fonte de energia, promove a descoloração de compostos orgânicos complexos, convertendo-os em substâncias menos nocivas. Este trabalho tem como objetivo investigar a cinética de descoloração do corante reativo preto B (RPB) por meio da fotocatalise heterogênea. Serão avaliados os efeitos de diferentes condições operacionais como, tratamento térmico do catalisador e massa de catalisador, sobre a eficiência do processo.

Além disso, foi investigada a possibilidade de aplicar o processo em efluentes têxteis reais. A escolha desse corante RPB foi baseada em uma pesquisa realizada para descobrir quais são os corantes mais utilizados pelas indústrias têxteis da região, sendo os corantes pretos, que normalmente são azuis para a coloração de jeans. Além de considerar a disponibilidade de corantes do setor têxtil do Instituto Federal de Santa Catarina campus Jaraguá do Sul - Centro. A relevância deste estudo reside na busca por soluções sustentáveis para o tratamento de efluentes têxteis. Dessa forma, os resultados obtidos poderão contribuir para o desenvolvimento de maneiras mais eficientes e economicamente viáveis para a despoluição de corpos d'água, promovendo a proteção ambiental e a saúde pública.

## 2 METODOLOGIA

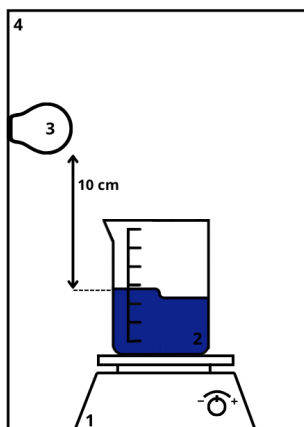
A preparação do óxido comercial ZnO da marca Dinâmica, primeiramente foi realizado um processo de peneiramento para a homogeneização granulométrica das partículas e após isso uma porção foi separada e submetida ao tratamento térmico. Isto envolveu a calcinação de parte do material em um forno mufla a uma temperatura de 400 °C durante 4 horas. O processo de aquecimento foi feito gradativamente, com velocidade de rampa de 3 °C por minuto (Castilhos *et al.*, 2020).

Os experimentos foram conduzidos em um reator em batelada de 1000 mL. Para manter a uniformidade da mistura e evitar a sedimentação do catalisador, utilizou-se agitação magnética. A radiação UV necessária para a reação é fornecida por uma lâmpada de vapor de mercúrio 125 W (Abdel; Sadik; Nashed, 2007 *apud* Castilhos *et al.*, 2020). Para evitar a dissipação da radiação UV para o ambiente circundante, foi utilizado uma caixa de aço envolto em folha de alumínio para isolar a unidade de reação (Castilhos *et al.*, 2020).

Antes da realização dos testes fotocatalíticos, foram realizados o teste de fotólise e o estudo da adsorção (catalisador e solução na ausência de luz) com amostras sintéticas. O objetivo do teste de fotólise é determinar até que ponto a radiação por si só contribui para a remoção do corante. Os testes de adsorção são projetados para avaliar a contribuição da adsorção na eliminação de contaminantes adsorvidos na superfície do catalisador (calcinados e não calcinados) que estão sendo avaliados (Castilhos *et al.*, 2020).

Foram coletados 3 mL de amostra a cada 5 minutos até atingir o equilíbrio de descoloração. Para os ensaios na presença de catalisador, as amostras eram submetidas a filtração utilizando filtro de seringa PVDF Hidrofílico (13 mm de diâmetro, tamanho de poro 0,22 µm, cor marrom, pré-limpo, marca Analítica). Após a filtração, todas as amostras foram submetidas à análise do espectro UV-Vis. Primeiramente foi verificado o efeito do tratamento térmico do material sendo que a amostra que apresentou o melhor desempenho sofreu otimização adicional variando a massa do catalisador. Todos os testes foram realizados em fase líquida em um protótipo experimental semelhante ao ilustrado na figura 1, o fluxograma da metodologia, está na figura 2:

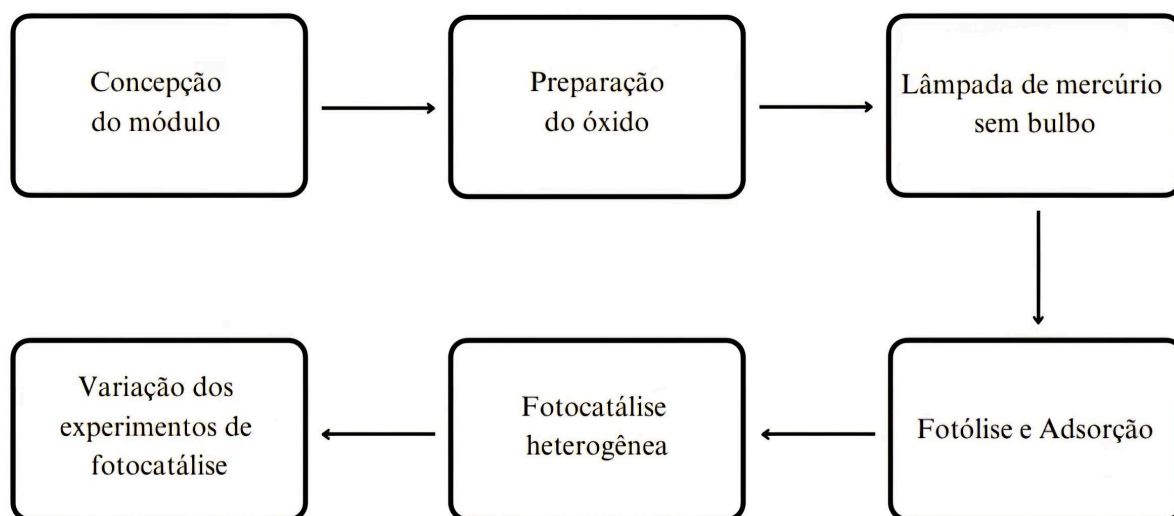
Figura 1 - Desenho esquemático do protótipo experimental.



Legenda: 1- Agitador magnético; 2- Solução contendo o contaminante; 3- Lâmpada de vapor de mercúrio 125 W; 4- Caixa de aço.

Fonte: Acervo Pessoal (2025).

Figura 2 - Fluxograma da metodologia.



Fonte: Acervo Pessoal (2025).

## 2.1 CURVA DE CALIBRAÇÃO

Inicialmente foi preparada uma solução estoque de corante, para posterior utilização nos experimentos. Foi utilizado um béquer de 50 mL e balão volumétrico de 250 mL. A concentração desejada para a solução estoque foi de  $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  de RPB. A partir da solução

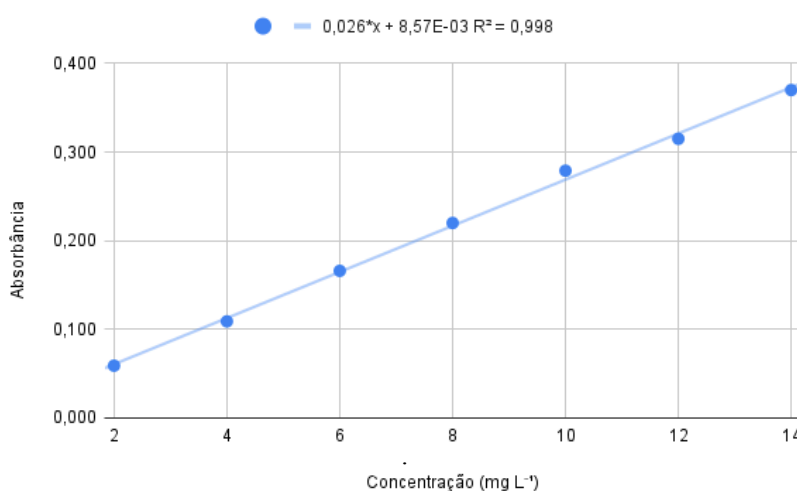
estoque ( $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), foram preparadas diluições das soluções para a curva de calibração em concentrações de  $2$  a  $14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , com cálculos analíticos para determinar o volume da solução estoque a ser transferido para cada balão de  $50 \text{ mL}$ .

Para determinar o comprimento de onda máximo de absorção no espectro visível da solução de  $15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , realizou-se uma análise espectrofotométrica. O resultado do espectro de absorção foi obtido na região do visível, sendo o comprimento de onda máxima encontrado em  $575,0 \text{ nm}$ , com uma absorbância de  $0,411$ .

Após a determinação do comprimento de onda de absorção máxima, uma sequência de análises espectrofotométricas foi realizada com soluções contendo concentrações variadas e conhecidas do corante. Os dados de absorbância coletados dessas análises facilitaram a criação de uma curva de calibração.

Os dados obtidos foram representados em um gráfico, ilustrando a resposta da absorbância em relação à concentração do analito, sendo a curva de calibração elucidada na figura 3.

Figura 3 - Gráfico da curva de calibração do corante RPB.



Fonte: Autores (2025)

A relação entre a concentração do analito ( $x$ ) e a resposta do instrumento, representada pela medição de absorbância  $y$  ( $y$ ), é estabelecida pela curva de calibração definida pela equação 1.

$$0,026 * x + 8,57E^{-03} R^2 = 0,998 \quad (\text{eq. 1})$$

Com uma inclinação de  $0,026$ , isso indica que para cada aumento de  $1$  unidade na concentração do analito, a absorbância do instrumento aumenta em  $0,026$  unidades.

Tal relação significa uma correlação linear direta entre concentração e absorvância, onde a inclinação serve como um indicador da sensibilidade do método: uma inclinação mais íngreme implica uma maior sensibilidade a mudanças na concentração do analito. O coeficiente linear de  $8,57 \times 10^{-3}$  representa o valor de absorvância em concentração zero do analito, o que pode refletir a absorvância de fundo do sistema, como a resposta do instrumento quando nenhum analito está presente.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 ADSORÇÃO

Conforme os resultados obtidos na realização dos testes de adsorção foi evidenciado que o óxido de zinco apresentou somente 4,8% de eficiência na descoloração das amostras do corante reativo preto B. Esses resultados demonstram que a utilização de ZnO na ausência de luz UV não remove de forma significativa o corante utilizado neste estudo.

Barbosa (2024) em seus estudos observou que o óxido de zinco também não apresentou um bom desempenho em testes de adsorção para o corante rodamina B. O catalisador em questão apresentou somente 17% na remoção do corante estudado pelo autor.

Estes resultados também estão de acordo com Lacerda (2010), que realizou ensaios de adsorção com o óxido de ferro recoberto com dióxido de titânio na descoloração do corante azul HFRL. Os resultados do autor indicam que apenas a utilização do catalisador na ausência de luz UV não é eficaz e que sua descoloração ocorre preferencialmente pela geração de radicais hidroxila em solução, processo que depende da luz UV para a ativação do catalisador.

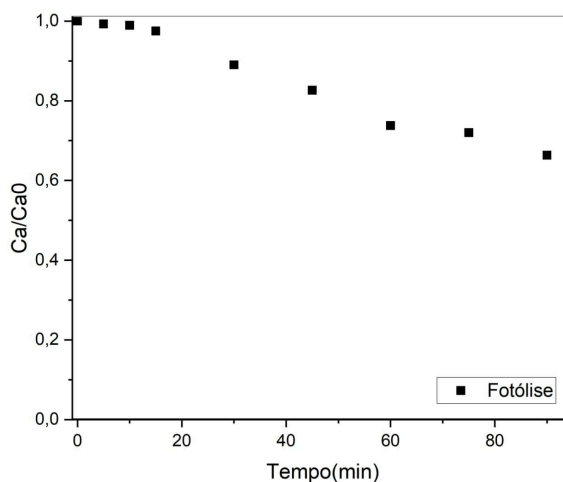
Guerra (2009) realizou testes de adsorção com óxido de zinco nos corantes, *Yellow 145*, *Blue 21*, *Black 5* e *Red 4*. Nos corantes amarelo e azul a adsorção teve pequena contribuição na remoção do corante, alcançando somente 15% e 8% respectivamente. Já nos corantes preto e vermelho os resultados de concentração para a solução final e inicial foram similares, o que demonstra a ineficiência da adsorção do ZnO.

#### 3.2 FOTÓLISE

Nos experimentos realizados com fotólise, foi possível observar que o método utilizado não foi totalmente eficaz para a descoloração do corante RPB uma vez que a fotólise resultou em uma descoloração de apenas 33,6% após 90 minutos de reação conforme apresentado na

figura 4. Esse resultado indica a necessidade de associar a fotólise a outros métodos para melhorar a capacidade na descoloração deste contaminante.

Figura 4 - Gráfico da reação de fotólise



Fonte: Autores (2025).

Estes resultados são similares aos de Giovanazzi (2023), em seu estudo de descoloração de corantes têxteis com fotocatalise e fotólise. Os resultados obtidos no processo realizado unicamente com luz UV, sem a adição de  $\text{TiO}_2$ , demonstraram uma menor redução na concentração dos corantes. A eficiência de descoloração dos corantes ácido, reativo e catiônico utilizados pelo autor no processo de fotólise foi de 17,9%; 17,49% e 19,31%, respectivamente. Tal observação enfatiza a importância do uso do catalisador na reação para a descoloração da solução.

Evangelista (2024), em seu estudo de descoloração fotocatalítica de corantes têxteis em solução utilizando óxido de zinco como catalisador, determinou por meio da realização de testes que o processo de fotólise não é eficiente se comparado ao método fotocatalítico. Os ensaios tiveram duração total de 120 minutos e após a aplicação dos diferentes processos oxidativos avançados, foi possível verificar e comparar seus resultados obtidos, no qual a fotólise apresentou 14,20% de descoloração para o corante reativo testado e somente 9,75% de descoloração em um corante catiônico.

Já no estudo de Secco (2015), foi analisada a descoloração do corante Rodamina B sob radiação ultravioleta (UV). De acordo com os seus resultados, a descoloração máxima obtida foi de 7,6% após um minuto, diminuindo para 4,4% ao final de 120 minutos de reação. Esses dados demonstram que a luz UV, usada de maneira isolada, não promove descoloração

significativa do corante e que a associação dos métodos, adsorção e fotólise, é essencial para melhorar o desempenho do processo.

### 3.3 FOTOCATÁLISE

Com os testes realizados com o método de fotocatalise heterogênea, é possível observar que o processo foi eficaz, já que obteve um percentual maior que 95% na descoloração do corante RPB, conforme observado na Figura 5.

Figura 5 - Comparação das amostras do corante do início e de 50 minutos, respectivamente.



Fonte: Autores (2025).

Pereira (2019, p. 28) em seu trabalho alcançou uma descoloração de 98% em suas amostras quando submetidas ao tratamento fotocatalítico com de  $\text{TiO}_2$ , o que está de acordo com os resultados alcançados neste trabalho. Raphael Borges Magalhães Bergamini (2007) realizou o processo de fotocatalise heterogênea, utilizando 200 mg de  $\text{TiO}_2$  e um efluente com a concentração  $70 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  de cada corante reativo Black 5, Red 239 e Yellow 17. O autor observou que a fotocatalise é fundamental para um bom percentual na remoção de contaminantes de origem têxtil. O corante Black 5 teve melhor resultado, sendo totalmente descolorido em torno dos 10 minutos, enquanto os demais corantes obtiveram percentuais de aproximadamente 85% a 95%.

Estes resultados também estão de acordo com os obtidos por Barbosa (2024), que alcançou 100% de descoloração de uma solução aquosa de Rodamina B, por meio do método de fotocatalise, utilizando  $\text{ZnO}$  como catalisador. Junto a isso, Cervantes e Zaia (2009) estudaram e analisaram o método de fotocatalise heterogênea na descoloração de corantes

têxteis, utilizando como catalisador o  $\text{TiO}_2$ . Foi utilizado um azocorante sintético (não especificado) e junto a isso foi utilizado uma luz UV. Os resultados finais demonstraram uma eficiência de 83% na descoloração ao final do tratamento. Esses dados mostram a eficiência da luz UV quando combinada com um catalisador, demonstrando-se um método promissor para o tratamento de efluentes de origem têxtil.

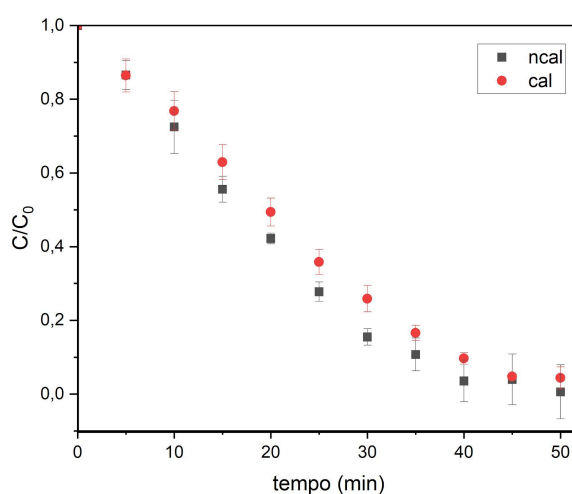
### 3.4 INFLUÊNCIA DO CATALISADOR CALCINADO NOS EXPERIMENTOS

Os catalisadores têm a função de oferecer maior eficiência ao processo, fazendo com que as reações ocorram com maior velocidade. (Almeida, 2017 *apud* Santos, 2021).

A calcinação pode impactar na eficiência desses catalisadores, podendo alterar propriedades geométricas, estruturais e superficiais do catalisador, como a área superficial e o volume dos poros (Santos, 2021). Visto isso, é importante avaliar se o tratamento térmico pode melhorar as propriedades do catalisador, objetivando assim otimizar o material e os resultados deste estudo.

A taxa de descoloração do corante nos ensaios utilizando  $\text{ZnO}$  não calcinado, em 50 minutos, é de 99,40%, enquanto os ensaios aplicando o catalisador calcinado foi de 98,12%. A partir dos resultados que podem ser verificados na figura 6, é possível observar que o tratamento térmico do catalisador não modificou significativamente os resultados de remoção do contaminante.

Figura 6 - Catalisador calcinado e não calcinado.



Fonte: Autores (2025).

Estes resultados coincidem com os de Santos (2021), que testou em seu trabalho os efeitos da temperatura de calcinação do catalisador  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  na degradação de ácido

acetilsalicílico por fotocatalise heterogênea, no qual comparou o catalisador calcinado em temperaturas de 100°C a 600°C com o não calcinado. Analisando os resultados finais do autor, foi possível averiguar que o catalisador não calcinado de Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> obteve a maior taxa de remoção do ácido acetilsalicílico durante todo o processo (120 minutos) quando comparado aos catalisadores calcinados.

No entanto, nos estudos de Gualberto (2018) o tratamento térmico promoveu melhores resultados no processo fotocatalítico. O catalisador calcinado a 400 °C teve uma eficiência na descoloração de azul de metileno de 92,89% do corante em 120 minutos de experimento. Ao calcinar o mesmo material a 800 °C o autor constatou uma melhora nas propriedades fotocatalíticas do material.

Arthur Marinho Cahino (2019) teve como objetivo em seus estudos avaliar a descoloração do corante azul de metileno por meio de fotocatalise solar heterogênea, analisando a influência da calcinação dos catalisadores ZnO/CuO combinados sobre a eficiência do processo. Foram utilizadas uma amostra não calcinada e três amostras calcinadas a 500 °C, 600 °C e 700 °C. Os resultados mostraram uma eficiência de 57,5% para a amostra não calcinada, enquanto as amostras calcinadas apresentaram eficiências de 94,1% (500 °C), 86,2% (600 °C) e 72,3% (700 °C). Pelos seus resultados pode-se observar que a calcinação pode sim melhorar a atividade do material, todavia é importante salientar que o material, a temperatura e o tempo de calcinação pode gerar resultados distintos quando aplicados em processos oxidativos.

Diante disso e dos resultados alcançados optou-se por utilizar apenas o catalisador não calcinado para os testes seguintes, uma vez que o processo de calcinação demanda energia e não influenciou significativamente nos resultados deste estudo.

### 3.5 INFLUÊNCIA DA ALTERAÇÃO DAS MASSAS NOS EXPERIMENTOS

A velocidade de descoloração dos contaminantes tende a aumentar com o aumento da concentração do catalisador, até atingir um valor máximo. Esse limite é determinado, principalmente, por dois fatores: a agregação das partículas do catalisador em concentrações elevadas, o que reduz o número de sítios ativos na superfície, e o aumento da opacidade do meio reacional, que reduz a passagem da radiação no interior do reator (Chen e Ray, 1998 *apud* Machado, 2011).

A concentração ideal do catalisador depende da geometria do fotorreator, das condições operacionais e do tipo de lâmpada UV utilizada (Konstantinou e Albanis, 2004

*apud* Machado, 2011). Com isso, foram realizados experimentos com o objetivo de determinar a concentração ótima de catalisador para a descoloração do corante RPB nas condições experimentais adotadas neste estudo.

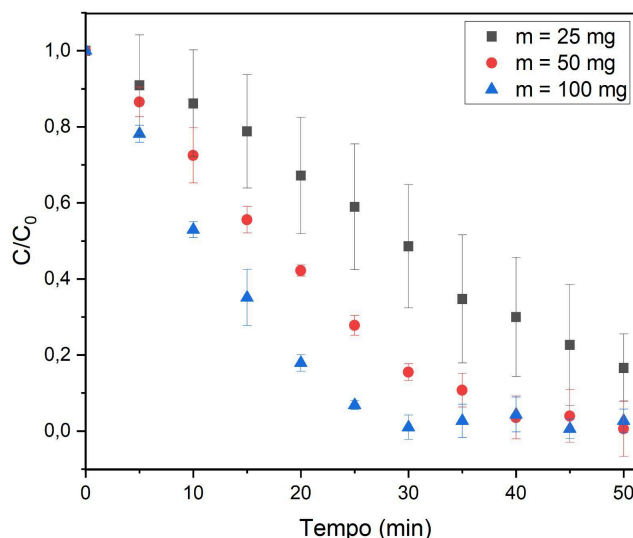
A massa do catalisador foi modificada na faixa entre 25 mg a 100 mg. Inicialmente foram realizados experimentos utilizando uma massa do catalisador de óxido de zinco, igual a 50 mg, no qual apresentou uma descoloração do RPB em 50 minutos de reação de aproximadamente 99%. Com 25 mg de ZnO, o percentual de descoloração do corante foi de 83,06%. Utilizando 100 mg, foi observado que a descoloração do corante foi de 95,14 %.

Conforme Fukuro e Okuse (2017), e o que pode ser observado em seus estudos, o catalisador ZnO, com a massa de 1 g, degradou aproximadamente 80% do corante, mas não foi observada uma diferença significativa entre as massas de 10 e 20 g. Segundo o estudo realizado por Zhu (2011), foram testadas dosagens de filmes de SnO<sub>2</sub>/ZnO/quitosana variando de 0,1 a 1,0 g. As eficiências de descoloração do corante azo MO foram de 71,0%, 87,1%, 92,2%, 96,1% e 96,2% para as massas de 0,1; 0,3; 0,5; 0,7 e 1,0 g, respectivamente. Os autores observaram que, ao aumentar a dosagem de catalisador de 0,7 para 1,0 g, a eficiência teve um acréscimo mínimo, de apenas 0,1%. Com base nesses resultados, Zhu (2011) concluiu que a dosagem ideal do fotocatalisador é 0,7 g, pois proporciona alta eficiência na descoloração com menor desperdício de material, já que descoloriu 96,1% do corante azo MO. Esta mesma tendência observada por Zhu (2011) também foi identificada nos resultados experimentais deste estudo.

Já de acordo com JIA (2016), em sua pesquisa que apresenta os resultados da remoção de cor do corante amarelo brilhante Cibacron 3G-P em função da dosagem de ZnO, variando entre 0,1 e 1,0 g de ZnO. Entre as dosagens testadas, 0,4 g destaca-se como o ideal para a melhor descoloração do corante. Nas dosagens de ZnO de 0,1 e 0,2 g as remoções de cor da solução foram de apenas 43% e 50%, respectivamente. Enquanto nas dosagens de ZnO de 0,3 e 0,4 g, a remoção de cor da solução atingiu quase 90% no mesmo tempo de irradiação. Com esses resultados, JIA (2016) concluiu que a dosagem de 0,4 g de ZnO é a mais eficaz para a descoloração do corante amarelo brilhante Cibacron 3G-P, tendo uma alta remoção em curto tempo.

Os resultados que foram apresentados anteriormente por outros autores mostra a dificuldade na otimização da massa do catalisador em processos de fotocatalise. Seguindo essa discussão, a Figura 7 apresenta os resultados obtidos neste para a descoloração do RPB variando a massa de ZnO.

Figura 7 - Influência da massa do catalisador.



Fonte: Autores (2025).

É observado que de fato o uso de uma maior quantidade de catalisador aumentou a velocidade da reação, haja vista que, no início do experimento nota-se que para a massa de 100 mg a curva declina-se mais rapidamente. No entanto, ao comparar a massa de 50 e 100 mg observa-se que no tempo de 40 min ambas atingem um mesmo percentual de remoção do corante. Isso evidencia que não há a necessidade do uso do dobro de massa de catalisador, uma vez que, os resultados no equilíbrio são equivalentes para as duas dosagens.

Em seus experimentos sobre a descoloração do azul de metileno, Makuda e Nicolini (2019) observaram que o aumento da concentração do catalisador diminuiu a eficiência da descoloração em função do tempo. A descoloração ocorreu na seguinte ordem:  $0,58 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  (100%) >  $1,00 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  (75%) >  $1,42 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  (45%). De fato, Soares *et al.* (2018 *apud* Makuda; Nicolini, 2019) discute em seu trabalho que aumentar a concentração de catalisador não implica necessariamente no aumento da atividade fotocatalítica.

Balbino (2015) avaliou a eficiência da fotocatalise heterogênea na descoloração do corante azul de metileno utilizando diferentes concentrações do catalisador dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ). As concentrações testadas foram de  $0,5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $1,0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  e  $1,5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ , sendo que a maior taxa de descoloração (85,4%) foi observada com o uso de  $1,0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  de  $\text{TiO}_2$  após 150 minutos de irradiação UV. O aumento da concentração para  $1,5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  não resultou em melhoria significativa na eficiência do processo. Esse comportamento pode ser explicado por dois fatores principais. Primeiro, de acordo com a cinética química, a reação atinge um ponto em

que o aumento na massa do catalisador não promove mais aumento na velocidade da reação, pois a quantidade de sítios ativos já é suficiente para manter a máxima taxa possível da etapa limitante da reação. Esse fenômeno indica que a reação pode estar próxima do equilíbrio dinâmico, sendo pouco influenciada por aumentos adicionais na quantidade de catalisador.

### 3.6 AJUSTES CINÉTICOS

O ajuste cinético se refere ao uso de modelos matemáticos para avaliar a ordem e a velocidade de uma reação além de compreender como funciona o processo de transferência de massa. O principal objetivo da criação de modelos cinéticos é encontrar uma equação quantitativa que represente de forma mais próxima os dados experimentais, ou seja, a concentração do corante ao longo do tempo. Uma vez definido o modelo cinético mais apropriado aos resultados experimentais, é possível determinar parâmetros como ordem e velocidade específica da reação (Ramos, 2022). Com base nisso, foi estudado as diferentes cinéticas de reações para o processo de descoloração, conforme mostrado na tabela 1 com os seus respectivos ajustados conforme o apêndice 1. Pela tabela é possível observar os ajustes que melhor se adequaram aos experimentos realizados.

Tabela 1 - Ajustes cinéticos

		0,025 g	0,10 g	calcinado	não calcinado
Cinética de 1ª ordem	K (min <sup>-1</sup> )	0,03	0,077	0,04	0,05
	r <sup>2</sup>	0,98	0,99	0,98	0,99
Cinética de 2ª ordem	K (m <sup>3</sup> / mol.min)	0,19	0,4	0,27	0,4
	r <sup>2</sup>	0,95	0,95	0,95	0,94

Fonte: Autores (2025).

Ao analisar os ajustes cinéticos para todos os ensaios experimentais da descoloração do corante RPB, observa-se que o maior coeficiente de correlação “R<sup>2</sup>” está no modelo de cinética de primeira ordem para todos os dados experimentais. Estes resultados são semelhantes aos de Gonçalves *et al* (2017), no qual o estudo indicou que a descoloração do Azul de Metileno seguiu este mesmo modelo.

Conforme supracitado, Yang *et al.* (2003, *Apud* Julson *et al.*, 2006) obtiveram resultados similares para a descoloração do corante azul ácido 9 (AB9) em que o modelo de primeira ordem também foi o mais preditivo. Esses resultados corroboram também com o mecanismo de descoloração de corantes azo, no qual a cinética de primeira ordem foi a de melhor ajuste (Tanaka *et al.* 2003, *Apud* Julson *et al.*, 2006). Mounir *et al.* (2007) em seu experimento descoloriu o corante BR46 utilizando o método de fotocatalise e os resultados obtidos também indicam que a cinética de descoloração segue este mesmo modelo.

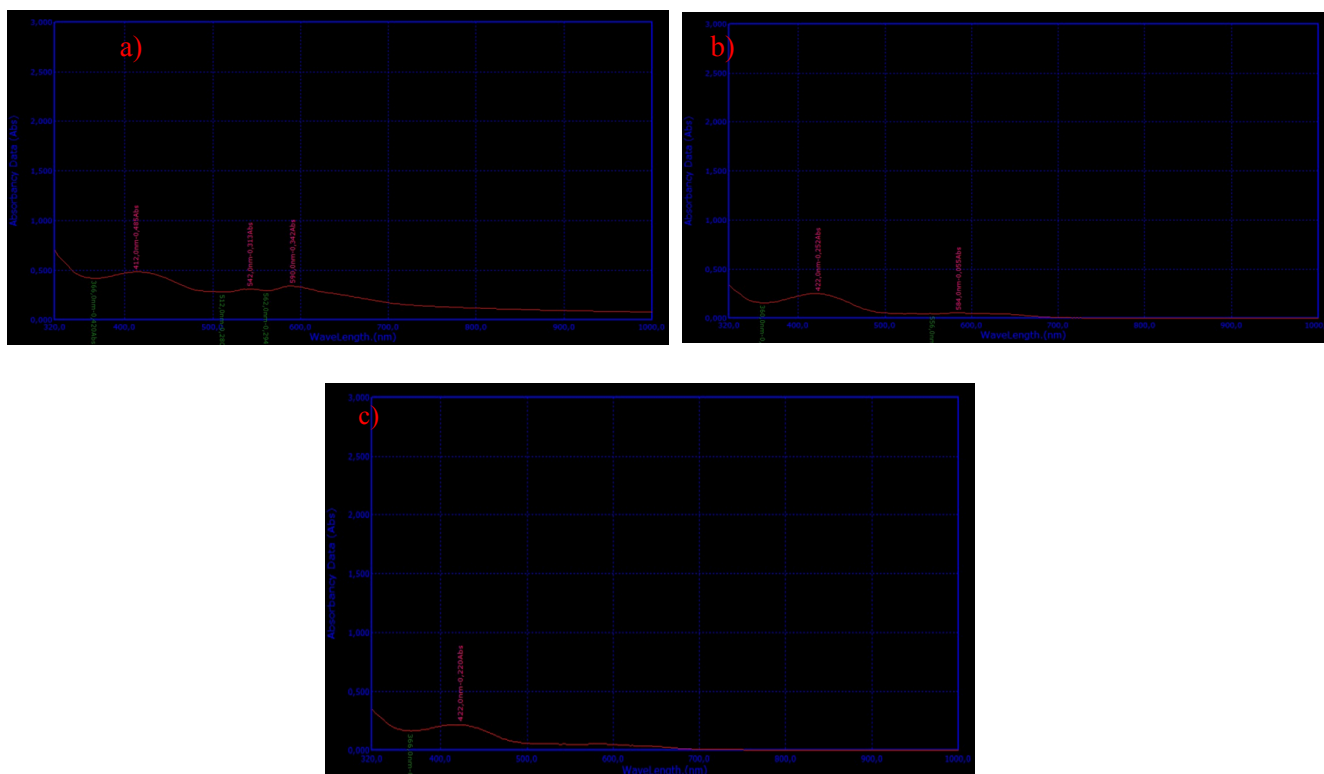
### 3.7 REALIZAÇÃO DA FOTOCATÁLISE NO EFLUENTE

Inicialmente foi coletado uma amostra de efluente de tinturaria disponibilizado pelo laboratório têxtil do Instituto Federal de Santa Catarina em Jaraguá do Sul - câmpus centro, o qual foi utilizado para a realização dos testes de fotocatalise heterogênea com a finalidade de determinar a eficácia deste método em um efluente real. Na realização dos testes, foi aplicado o uso do catalisador (ZnO) não calcinado pois foi o que melhor apresentou resultados no tratamento do efluente sintético, além disso, optou-se por realizar a padronização do tempo conforme os testes executados no efluente sintético.

Os dados estão detalhados nas figuras 8-a, 8-b e 8-c, nas quais são retratadas as varreduras das amostras contendo a maior concentração do efluente real utilizado nos testes, sendo esta de 100 mL de efluente diluído em 900 mL de água, totalizando 1000 mL de solução.

No efluente sem tratamento, figura 8-a, ao observar a varredura, verifica-se que na região do visível são encontrados três picos provenientes da amostra. Após o início do tratamento por fotocatalise, é possível notar a ausência de dois dos picos iniciais presentes na figura 8-a. Ao final do processo, retratado na figura 8-c, fica evidente a presença de somente um dos picos iniciais, sendo possível constatar, com estes resultados, que houve redução na intensidade do mesmo, na absorbância e conseqüentemente a diminuição na concentração do corante. As demais varreduras referentes às outras concentrações estão presentes nos apêndices 2 e 3.

Figura 8 - Varredura da amostra mais concentrada (100:900), no início do experimento (a), após 30 minutos do experimento (b) e no final do experimento (c).



Fonte: Autores (2025).

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo investigou a cinética e a viabilidade de uma reação de descoloração de um corante pelo método fotocatalítico heterogêneo utilizando óxido de zinco (ZnO) como catalisador. O corante Reativo Preto B (RPB) foi escolhido devido à sua ampla aplicação na indústria têxtil regional e à sua conhecida persistência ambiental. O estudo abrangeu desde a confecção de um protótipo experimental a uma avaliação sistemática dos parâmetros que afetam a eficiência do processo.

Os resultados demonstraram conclusivamente a eficácia do método fotocatalítico. Testes preliminares de fotólise (apenas luz UV) e adsorção (apenas catalisador) mostraram baixa capacidade de descoloração em condições individuais, com taxas de descoloração de 4,8% e de 33,6%. Este resultado destaca a importância da utilização da fotocatalise no processo de descoloração do RPB. Durante o processo, a eficiência de descoloração atingiu mais de 95%, confirmando a alta eficiência do método.

Os estudos de otimização do processo mostraram que o tratamento térmico do catalisador (calcinação a 400 °C) não melhorou significativamente a eficiência de

descoloração em comparação com o catalisador não calcinado. Da mesma forma, a variação da massa do catalisador (25 mg, 50 mg e 100 mg) mostrou que, embora a massa maior tenha acelerado a reação no estágio inicial, os resultados finais de descoloração foram semelhantes.

A análise cinética dos dados experimentais foi um ponto central deste trabalho, e os resultados indicaram de forma consistente que a reação de descoloração do RPB segue um modelo de cinética de primeira ordem, evidenciado pelos altos coeficientes de correlação ( $R^2$ ) obtidos, próximos a 0,99. Isso sugere que a velocidade da reação é diretamente proporcional à concentração do corante, um parâmetro fundamental para o dimensionamento e a otimização de reatores em escala industrial.

Diante desses resultados, tanto no corante RPB, quanto no efluente real, foi possível visualizar a descoloração produzida pela fotocatalise heterogênea com o óxido de zinco (ZnO), demonstrando ser um método promissor e ambientalmente seguro para o tratamento de efluentes têxteis.

## REFERÊNCIAS

- BALBINO, Rodrigo de Oliveira. **Remoção do corante azul de metileno por fotocatalise heterogênea com radiação UV artificial e dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>) como catalisador**. 2015. 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015. Disponível em: [https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/6950/3/CM\\_COEAM\\_2015\\_2\\_26.pdf](https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/6950/3/CM_COEAM_2015_2_26.pdf). Acesso em 13 mai. 2025
- BARBOSA, João Hampshire Olsson. **Remoção do corante Rodamina B em efluente sintético por fotocatalise heterogênea com ZnO e Nd/Zno**. Mestrado em Engenharia Química - Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: <https://www.bdt.d.uerj.br:8443/handle/1/22784>. Acesso em: 14 abr. 2025
- BERGAMINI, Raphael Borges Magalhães. **Degradação de corantes têxteis ácidos e reativos por fotocatalise heterogênea, usando TiO<sub>2</sub>, como fotocatalisador**. Rio De Janeiro. 2007. Disponível em: <https://www.bdt.d.uerj.br:8443/bitstream/1/11946/1/dissertacao%20raphael%20borges%20magalhaes%20bergamini.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2025.
- CAHINO, Arthur Marinho. **Caracterização e avaliação do catalisador ZnO/CuO na degradação do azul de metileno utilizando a fotocatalise solar**. 2019, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/16977/1/Arquivototal.pdf>. Acesso em: 25 mai de 2025.
- CASTILHOS, Stefani et al. **Assessment comparison of commercial TiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> sol-gel on the degradation of caffeine using artificial radiation**. *Environmental Science And Pollution Research*, [S.L.], v. 27, n. 18, p. 22155-22168, 29 jan. 2020. Disponível em: Semanal. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-020-07748-x>. Acesso em: 19 out. 2024.
- CERVANTES, Thiago N. M.; ZAIA, Dimas A. M.; SANTANA, Henrique de. **Estudo da fotocatalise heterogênea sobre Ti/TiO<sub>2</sub> na descoloração de corantes sintéticos**. *Química Nova*, v. 32, n. 9, p. 2423–2428, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/VTsp6YNbLJK8tHhpfJqkZxw/?lang=pt>. Acesso em: 25 mai. 2025.
- EVANGELISTA, Stefani Shirazawa. **Estudo da degradação fotocatalítica de corantes têxteis em solução utilizando ZnO**. Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Têxtil - Universidade Federal de Santa Catarina. Blumenau, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/257584>. Acesso em: 23 abr. 2025.
- FUKURO, Yuri Izabelli; OSUKE, Jaime William. **Degradação do corante azul de metileno pelo método de Fotocatalise Heterogênea** Ponta Grossa. 2018. Disponível: [https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/16599/1/PG\\_COENQ\\_2018\\_1\\_12.pdf](https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/16599/1/PG_COENQ_2018_1_12.pdf). Acesso em: 16 abr. 2025.
- GIOVANAZZI, Lucas Ciúcio. **Gerenciamento De Resíduos Sólidos Contaminados : Estudo De Caso Em Uma Empresa Têxtil De Grande Porte Do Estado De Santa Catarina**. 2023.

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Santa Catarina, Blumenau, 2023. Disponível em:

<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/249585/TCC-LucasCiucio-assinado%20%28mandar%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 20 mai. 2025.

GONÇALVES, Maria Carolina Pereira; PADILHA, Shena Rafaela Rebouças; LOPES, Mariana Fachin; PARIS, Elaine Cristina; GIRARDI, Tania Regina. **Aplicação de Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> comercial para descoloração do corante Azul de Metileno pelo processo de fotocatalise heterogênea**. Revista de Engenharia e Tecnologia. V. 9, N°. 2. Ago. 2017. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/download/11269/209209209720>. Acesso em: 05 jun. 2025.

GUALBERTO, Jéssica Cristina da Silva. **Síntese e caracterização de ZnO pelo método de Pechini para aplicação em fotocatalise**. Manaus. 2018. Disponível em: \*Dissertação\_Jéssica C. S. Gualberto.pdf. Acesso em: 16 abr. 2025.

GUERRA, Wilson Nunes de Almeida. **Descoloração e Mineralização de Corantes Reativos por Processo Fotocatalítico Utilizando ZnO e Radiação UV**. Rio de Janeiro. 2009.

Disponível em:

<https://www.bdt.uerj.br:8443/bitstream/1/11919/1/Wilson%20Nunes%20de%20Almeida%20Guerra.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2025.

JIA, Z. et al. **Photocatalytic degradation and absorption kinetics of cibacron brilliant yellow 3G-P by nanosized ZnO catalyst under simulated solar light**. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, v. 60, p. 267–274, mar. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876107015004393#sec0003>. Acesso em: 01 mai. 2025.

JULSON, Alison J.; OLLIS, David F.. Kinetics of dye decolorization in an air–solid system. **Applied Catalysis B: Environmental**, [S.L.], v. 65, n. 3-4, p. 315-325, jun. 2006. Elsevier BV. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389407003561>. Acesso em: 23 mai. 2025

LACERDA, C. A. M. **Avaliação da efetividade de remoção de cor de soluções corantes e efluentes têxteis pelo tratamento fotocatalítico de óxidos de ferro recobertos com dióxido de titânio**. 2010. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/items/530af237-d4b7-407f-98e7-cb5139dbd58c/full>. Acesso em: 20 mai. 2025.

MACHADO, Tiele Caprioli. **Degradação Fotocatalítica de rosvastatina em solução aquosa empregando ZnO em suspensão: Cinética, subprodutos e toxicidade**. Mestrado de Química - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/36407/000817632.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em 7 abr. 2025.

MAKUDA, Juliana Lika; NICOLINI, Maria Vitória Silva. **Descoloração do azul de metileno por meio de fotocatalise heterogênea utilizando radiação solar**. 2019. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2019. Disponível em:

[https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/16495/1/PG\\_COENQ\\_2018\\_2\\_09.pdf](https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/16495/1/PG_COENQ_2018_2_09.pdf). Acesso em: 26 mai. 2025.

MARINHO, Gloria; PEIXOTO, Fabia Pinho; RODRIGUES, Kelly. **CORANTES TÊXTEIS: UMA REVISÃO**. HOLOS, [S. l.], v. 5, p. 98–106, 2013. DOI: 10.15628/holos.2013.1239. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/1239>. Acesso em: 9 maio. 2024.

MARTINS, Leonardo Madeira. **Estudo da aplicação de processos oxidativos avançados no tratamento de efluentes têxteis visando seu reuso**. Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente-Universidade Federal do Piauí. Teresina, 2011. Disponível em: \*DISSERTACAO-LEONARDO-MADEIRA.pdf (embrapa.br). Acesso em: 15 abr. 2024.

MOUNIR, B. *et al.* Discoloration of a red cationic dye by supported TiO<sub>2</sub> photocatalysis. **Journal Of Hazardous Materials**, [S.L.], v. 148, n. 3, p. 513-520, set. 2007. Elsevier BV. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389407003561>. Acesso em: 23 maio 2025.

PEREIRA, Francisco Raphael. **Fotodegradação do corante azul de metileno através de fotocatalise**. Licenciatura em Química. Ceres, Goiás. 2019. Disponível em: [https://repositorio.ifgoiano.edu.br/bitstream/prefix/671/1/Tcc\\_Raphael%20Francisco%20Pereira.pdf](https://repositorio.ifgoiano.edu.br/bitstream/prefix/671/1/Tcc_Raphael%20Francisco%20Pereira.pdf). Acesso em: 14 abr. 2025.

PINHEIRO, Alessandro de Sá. **Avaliação da toxicidade e genotoxicidade dos corantes azo reativos Remazol Preto B e Remazol Alaranjado 3R e da eficácia da radiação com feixe de elétrons na redução da cor e efeitos tóxicos**. 2011. 139 f. Tese (Doutorado) - Curso de Tecnologia Nuclear - Aplicações, Universidade de São Paulo, São Paulo (Cidade), 2012. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85131/tde-02032012-135231/en.php>. Acesso em: 31 mar. 2024.

RAMOS, J. G. S. (2022). **Estudo da degradação de mistura de corantes têxteis por processos oxidativos avançados**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química), Universidade Federal de Pernambuco, Recife. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/58477/4/TCC%20-%20J%C3%B4ley%20Ramos.pdf>

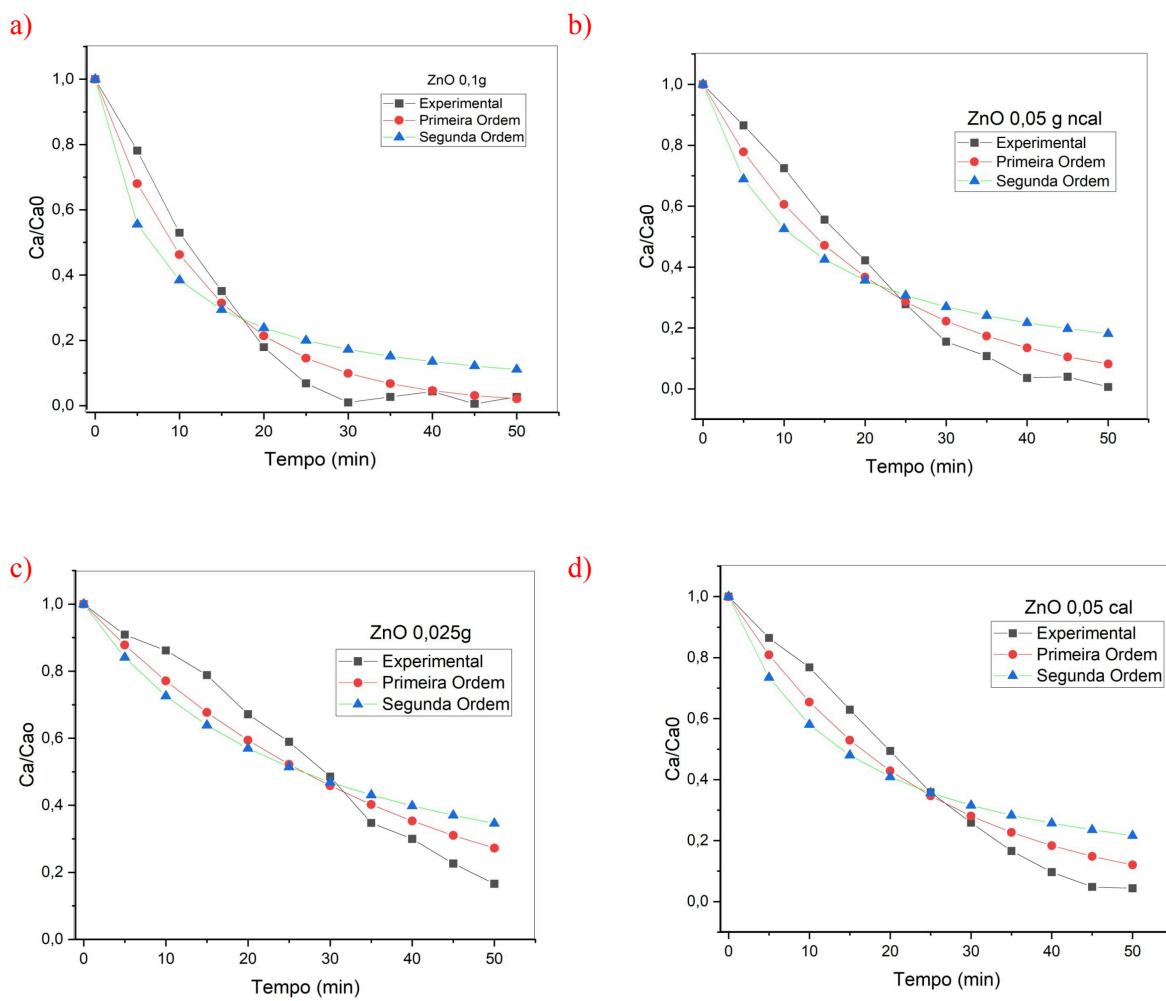
SANTOS, Raí Marcel Malikoski dos. **Avaliação dos efeitos da temperatura de calcinação do Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na degradação de ácido acetilsalicílico via fotocatalise heterogênea**. Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Química - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2021. Disponível em: <https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/26498/1/fotocataliseheterogeneaniobio.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2025.

SECCO, Morgana Rafaela. **Descoloração de solução aquosa contendo Rodamina B via processos oxidativos (UV, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV, Fenton e Foto-Fenton)**. 2015. 69 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/127926>. Acesso em: 25 abr. 2025.

ZHU, H.-Y. et al. **Efficient decolorization of azo dye solution by visible light-induced photocatalytic process using SnO<sub>2</sub>/ZnO heterojunction immobilized in chitosan matrix.** Chemical Engineering Journal, v. 172, n. 2-3, p. 746–753, ago. 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894711007662#sec0040>. Acesso em: 01 mai. 2025.

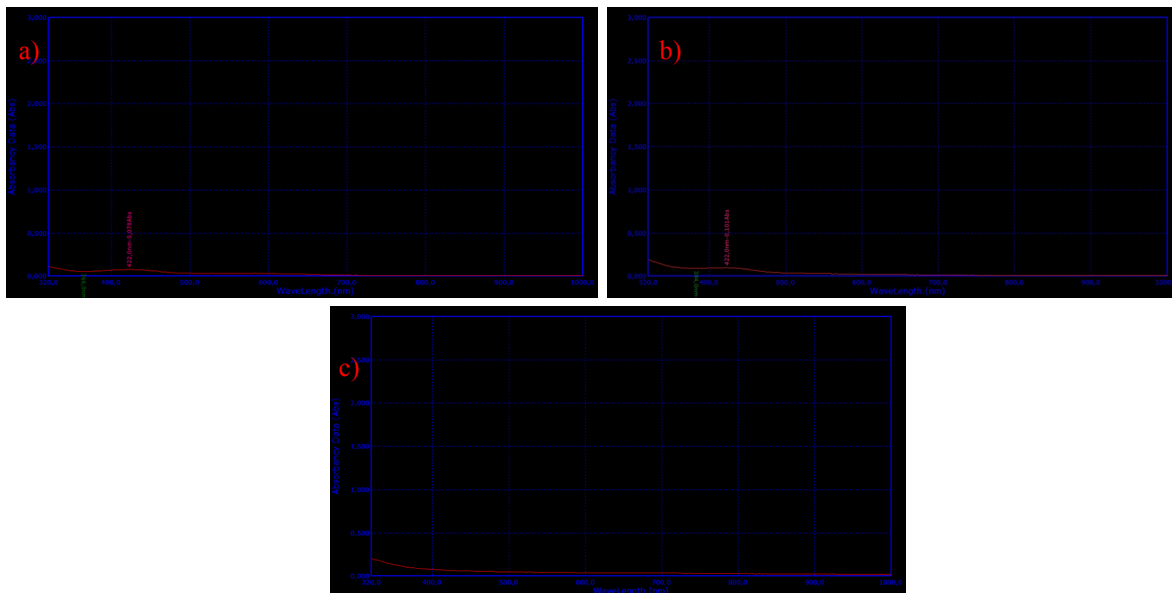
## APÊNDICES

Apêndices 1 - Gráficos da modelagem/ajuste cinético, ZnO 0,1g (a), ZnO 0,05g ncal (b)  
ZnO 0,025g (c) e ZnO 0,05g cal (d).



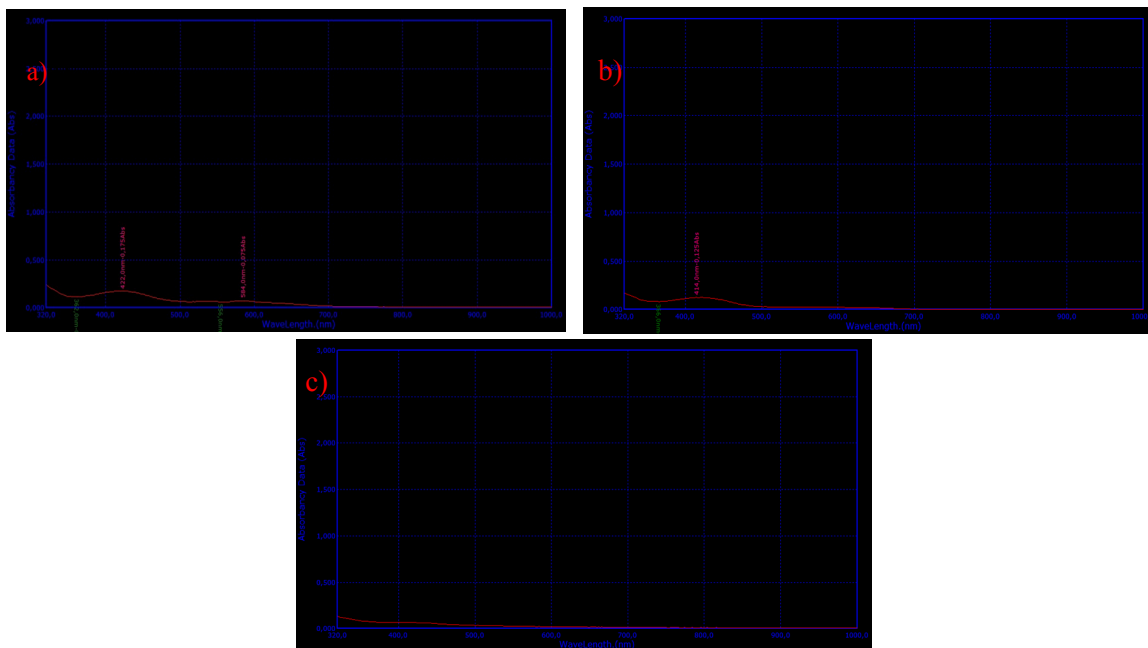
Fonte: Autores (2025).

Apêndices 2 - Gráfico das varreduras em relação a concentração de 50:950, no início do experimento (a), após 30 minutos do experimento (b) e ao final do experimento (c).



Fonte: Autores (2025).

Apêndices 3 - Gráfico das varreduras em relação a concentração de 25:975, no início do experimento (a), após 30 minutos do experimento (b) e ao final do experimento (c).



Fonte: Autores (2025).