

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE - UNICENTRO
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E AMBIENTAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM ENGENHARIA
AMBIENTAL

AMANDA TAYARA RIBEIRO DA SILVA

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE REMOÇÃO DE CORANTE TÊXTIL
UTILIZANDO COGUMELO *PLEUROTUS OSTREATUS* E O COMPOSTO
RESIDUAL DE SUA PRODUÇÃO**

IRATI

2023

AMANDA TAYARA RIBEIRO DA SILVA

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE REMOÇÃO DE CORANTE TÊXTIL
UTILIZANDO COGUMELO *PLEUROTUS OSTREATUS* E O COMPOSTO
RESIDUAL DE SUA PRODUÇÃO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, área de concentração em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos, da UNICENTRO.

Orientadora: Prof. Dr^a. Jeanette Beber de Souza

Coorientador: Prof. Dr. André Aguiar Battistelli

Irati

2023

Catálogo na Publicação
Rede de Bibliotecas da UNICENTRO

S586a

Silva, Amanda Tayara Ribeiro da
Avaliação do processo de remoção de corante têxtil utilizando cogumelo
Pleurotus ostreatus e o composto residual de sua produção / Amanda Tayara
Ribeiro da Silva. -- Irati, 2023.
x, 77 f. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual do Centro-Oeste,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, 2023.

Orientadora: Jeanette Beber de Souza
Coorientador: André Aguiar Battistelli
Banca examinadora: Jeanette Beber de Souza, Kely Geronazzo Martins,
Maria Eliza Nagel Hassemer

Bibliografia

1. Azo corante. 2. Efluentes têxteis. 3. Biorremediação. 4. Degradação
enzimática. 5. Adsorção. I. Título. II. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental.

| CDD 628.4



TERMO DE APROVAÇÃO

Amanda Tayara Ribeiro da Silva

Avaliação do processo de remoção de corante têxtil utilizando cogumelo *Pleurotus ostreatus* e o composto residual de sua produção

Dissertação aprovada em 31 de outubro de 2023, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre, no Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Sanitária e Ambiental, área de concentração em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos, da Universidade Estadual do Centro-Oeste, pela seguinte Banca Examinadora:

Banca Examinadora:

Dra. Jeanette Beber de Souza - UNICENTRO
Presidente/Orientadora
Participação via remota

Dra. Maria Eliza Nagel Hassemer - UFSC
Primeira examinadora
Participação via remota

Dra. Kelly Geronazzo Martins - UNICENTRO
Segunda Examinadora
Participação via remota

Irati-PR, 31 de outubro de 2023.

RESUMO

O lançamento de efluentes têxteis sem tratamento, ou submetidos a um tratamento ineficaz, ocasiona graves problemas nos ecossistemas aquáticos, devido à alta carga de compostos tóxicos, bioacumulativos e altamente coloridos. Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar a capacidade e o processo de remoção do corante têxtil Drimaren Red CL-7B, usando o cogumelo *Pleurotus ostreatus* e o composto residual resultante de sua produção, buscando identificar possíveis rotas de remoção e avaliar a atividade enzimática envolvida. Diante deste cenário, foram realizados ensaios de descoloração de um efluente têxtil sintético simulando um efluente real. As concentrações de cogumelo e o substrato aplicado ao efluente foram 50; 100 e 150 g L⁻¹ e os valores de pH empregados foram: 5, 7 e 9 durante 6 horas de tempo de contato. Do mesmo modo, após a determinação da melhor condição experimental, também foram estudados os possíveis mecanismos de remoção ocorridos e avaliação da atividade enzimática do cogumelo e do micélio presente no substrato. Verificou-se que a condição operacional considerada ótima foi obtida com pH 5 para ambas conformações do fungo e concentração foi de 50 g L⁻¹ e 150 g L⁻¹, respectivamente. Sob essas condições, a eficiência de remoção de corante obtida foi próxima a 80% para os cogumelos e 70% para o substrato. Observou-se que o principal mecanismo de remoção foi, de fato, a adsorção. No entanto, é importante destacar que o processo de degradação enzimática também desempenhou um papel importante no aumento da eficiência global. Além disso, verificou-se que a atividade enzimática das Lacases manifestou-se com maior intensidade no substrato e apresentou maior eficiência em faixas de pH ácido, mas fica inativa em faixas de pH alcalino. As análises das enzimas MnP e LiP não revelaram atividade no extrato. Dessa forma, a avaliação realizada com o cogumelo e do composto residual da produção do cogumelo *Pleurotus ostreatus* para o tratamento de efluentes têxteis sintéticos apresenta elevado potencial em decorrência da ação simultânea das enzimas lignolíticas e pelo alto desempenho da adsorção na remoção de corantes têxteis. Este estudo integra-se como parte para confecção de uma metodologia eficaz para o tratamento de efluentes têxteis e uma alternativa de reaproveitamento do composto residual da produção de cogumelos comestíveis.

Palavras-chave: Azo corante; Efluentes têxteis; Biorremediação; Degradação enzimática; Adsorção.

ABSTRACT

The release of textile effluents without treatment, or subjected to ineffective treatment, causes serious problems in aquatic ecosystems, due to the high load of toxic, bioaccumulative and highly colored compounds. In this context, the objective of this study was to evaluate the capacity and process of removing the textile dye Drimaren Red CL-7B, using the *Pleurotus ostreatus* mushroom and the residual compound resulting from its production, seeking to identify possible removal routes and evaluate the enzymatic activity involved. Given this scenario, discoloration tests were carried out on a synthetic textile effluent simulating a real effluent. The concentrations of mushroom and substrate applied to the effluent were 50; 100 and 150 g L⁻¹ and the pH values used were: 5, 7 and 9 during 6 hours of contact time. Likewise, after determining the best experimental condition, the possible removal mechanisms that occurred and the enzymatic activity of the mushroom and mycelium present in the substrate were also studied. It was verified that the operational condition considered optimal was obtained with pH 5 for both conformations of the fungus and concentration was 50 g L⁻¹ and 150 g L⁻¹, respectively. Under these conditions, the dye removal efficiency obtained was close to 80% for the mushrooms and 70% for the substrate. It was observed that the main removal mechanism was, in fact, adsorption. However, it is important to highlight that the enzymatic degradation process also played an important role in increasing overall efficiency. Furthermore, it was found that the enzymatic activity of laccases was manifested with greater intensity in the substrate and showed greater efficiency in acidic pH ranges, but is inactive in alkaline pH ranges. Analysis of MnP and LiP enzymes revealed no activity in the extract. Thus, the evaluation carried out with the mushroom and the residual compound from the production of the *Pleurotus ostreatus* mushroom for the treatment of synthetic textile effluents has high potential due to the simultaneous action of lignolytic enzymes and the high performance of adsorption in the removal of textile dyes. This study is part of creating an effective methodology for treating textile effluents and an alternative for reusing residual compounds from the production of edible mushrooms.

Keywords: Azo dye; Textile effluents; Bioremediation; Enzymatic degradation; Adsorption.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de uma estrutura química característica de um grupo cromóforo de um azocorante.....	18
Figura 2 – Etapas de consumo de água e geração de efluentes	23
Figura 3 - Modelo representativo da estrutura da lignina.....	29
Figura 4 - Fluxograma metodológico da pesquisa.....	34
Figura 5 - Cogumelo e substrato do fungo <i>Pleurotus ostreatus</i>	35
Figura 6 - Máxima absorvância para o efluente bruto.....	36
Figura 7 - Eficiência da remoção de corantes (%) ao longo do tempo utilizando cogumelo ...	50
Figura 8 - Eficiência da remoção de corantes (%) ao longo do tempo utilizando substrato	52
Figura 9 – Efeito do pH na atividade da Lacase.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Classificação e emprego dos principais tipos de corantes têxteis utilizados no Brasil	18
Tabela 2 - Características do efluente têxtil	21
Tabela 3 - Composição do efluente têxtil sintético	35
Tabela 4 - Níveis dos fatores utilizados no planejamento fatorial dos ensaios de descoloração do efluente têxtil com o cogumelo.	37
Tabela 5 - Planejamento fatorial para otimização da remoção de corante	37
Tabela 6 - Condição operacional otimizada	38
Tabela 7 - Concentrações residuais de corante e eficiências de remoção obtidas a partir dos ensaios complementares	48
Tabela 8 - Concentrações residuais de corante e eficiências de remoção obtidas a partir dos ensaios complementares	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abs.- Absorbância

ABIT – Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção

ABTS – 2,2'-azino-bis (3-etilbenzotiazolina-6-sulfonato)

C – Concentração de saída do adsorvato

C0 – Concentração de entrada do adsorvato

Cm – Centímetros

CR – Composto Residual

Cu – Cobre

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO – Demanda Química de Oxigênio

H₂O₂ – Peróxido de hidrogênio

H₂SO₄ – Ácido sulfúrico

HCl – Ácido clorídrico

L – Litros

LiP – Lignina peroxidase

M – Mol

Mg – Miligramas

Min – Minutos

mL – Mililitro

Mn – Manganês

MnP – Manganês Peroxidase

MnSO₄ – Sulfato de manganês

Na₂SO₄ – Sulfato de sódio

NaCl – Cloreto de sódio

NaOH – Hidróxido de sódio

O₂ – Oxigênio molecular

Rpm – Rotações por minuto

UNIDO - United Nations Industrial Development Organization

U – Unidades Internacionais

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	OBJETIVO.....	14
2.1	OBJETIVO GERAL	14
2.1.1	<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>14</i>
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1	INDÚSTRIA TÊXTIL	15
3.1.1	<i>Processo têxtil.....</i>	<i>15</i>
3.2	CORANTES TÊXTEIS	17
3.2.1	<i>Classificação dos corantes</i>	<i>18</i>
3.2.2	<i>Toxicidade dos corantes</i>	<i>19</i>
3.2.3	<i>Corante azo reativo</i>	<i>20</i>
3.3	EFLUENTES TÊXTEIS	20
3.3.1	<i>Caracterização dos efluentes têxteis.....</i>	<i>20</i>
3.3.2	<i>Uso de água e a geração de efluentes têxteis</i>	<i>22</i>
3.3.3	<i>Impactos ambientais relacionados à indústria têxtil</i>	<i>24</i>
3.4	PROCESSOS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES TÊXTEIS	25
	OS SISTEMAS DE LODOS ATIVADOS SÃO AMPLAMENTE UTILIZADOS DEVIDO À SUA EFICIÊNCIA NA REDUÇÃO DE CONTAMINANTES E NA ELIMINAÇÃO DE SÓLIDOS SUSPENSOS EM ÁGUAS RESIDUÁRIAS (DEENA, 2022). UMA DAS VANTAGENS ASSOCIADAS AO TRATAMENTO DE LODOS ATIVADOS É A PRODUÇÃO DE EFLUENTES DE ALTA QUALIDADE COM REMOÇÃO EFICIENTE DE RESÍDUOS ORGÂNICOS E PIGMENTOS COLORIDOS. PORÉM PODE SER NECESSÁRIO CONSIDERAR MEDIDAS, PARA SUA APLICAÇÃO (BUAISHA, 2020; BARRIOS HERNÁNDEZ, 2020).....	26
3.5	FUNGOS BASIDIOMICETOS	26
3.5.1	<i>Sistemas enzimáticos.....</i>	<i>28</i>
3.5.2	<i>Fungo Pleurotus ostreatus.....</i>	<i>31</i>
3.5.3	<i>Substrato residual da produção de cogumelos</i>	<i>31</i>
3.5.4	<i>Tratamento de efluentes têxteis utilizando fungos degradadores de lignina</i>	<i>32</i>
3.5.5	<i>Adsorção de corantes em efluentes têxteis utilizando serragem.....</i>	<i>32</i>
4	MATERIAIS E MÉTODOS	33
4.1	COGUMELO <i>PLEUROTUS OSTREATUS</i>	34
4.2	SUBSTRATO RESIDUAL DA PRODUÇÃO DE COGUMELO	34
4.3	EFLUENTE DA INDÚSTRIA TÊXTIL	35
4.4	VARREDURA ESPECTRAL DO EFLUENTE BRUTO	36
4.5	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	36
4.5.1	<i>Planejamento fatorial para otimização da remoção de corante.....</i>	<i>37</i>
4.5.2	<i>Ensaio complementares realizados para avaliação dos mecanismos de remoção do corante</i>	<i>38</i>
4.6	CARACTERIZAÇÃO DA LACASE.....	39

4.6.1 Efeito do pH na atividade da Lacase	41
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1 ESTUDO DO EFEITO DO COGUMELO <i>PLEUROTUS OSTREATUS</i>	42
5.2 ESTUDO DO EFEITO DO SUBSTRATO RESIDUAL	45
5.3 RESULTADOS COMPLEMENTARES REFERENTE À UTILIZAÇÃO DO COGUMELO <i>IN NATURA</i>	48
5.4 RESULTADOS COMPLEMENTARES REFERENTE AO SUBSTRATO	51
5.5 CARACTERIZAÇÃO DA LACASE	53
6 SÍNTESE DOS RESULTADOS	56
7 CONCLUSÃO	57
8 SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES	58
9 REFERÊNCIA	59

1 INTRODUÇÃO

A indústria têxtil desempenha importante papel nos avanços da sociedade e na economia mundial. O setor têxtil no Brasil teve origem há, aproximadamente, 200 anos, sendo uma das atividades pioneiras no processo de industrialização do País. Atualmente, este setor representa 16,7% dos empregos gerados no Brasil (FUJITA et al., 2015; ABIT, 2019). Além disso, ao longo da história, a indústria têxtil teve grande representatividade na luta pelos direitos civis, ampliação dos meios de trabalho e visibilidade das mulheres.

Atualmente, sabe-se que a influência da indústria nos hábitos de consumo, atrelada ao crescimento populacional, impulsiona a busca por produtos do segmento têxtil e, dessa forma, eleva o consumo de água e geração de grandes quantidades de resíduos ao longo dos processos de produção (FUJITA et al., 2015; ZANONI; CARNEIRO, 2001).

Dentre as etapas de beneficiamento, a água é utilizada de forma direta, representando as etapas de lavagem, tingimento e amaciamento e, de forma indireta, sendo representada pelos processos de aquecimento e resfriamento (MORAN et al., 1997). No que se refere ao uso de água dentro da indústria, seu consumo pode ser determinado conforme a disponibilidade de água e o custo que este serviço, tendo em vista a localização de cada região (TALARPOSHTI et al., 2001). As etapas que mais consomem água e causam contaminação são o tingimento e o acabamento, uma vez que nesses processos são aplicados corantes e diversos produtos químicos para fixação das cores, sendo a água fundamental para essa aplicação (TOLEDO, 2004). Do ponto de vista ambiental, os efluentes altamente coloridos provenientes da fase de tingimento são os mais problemáticos, em razão de sua coloração, alta demanda química e bioquímica de oxigênio, compostos tóxicos e sólidos suspensos (DAÂSSI et al., 2013; ARSLAN-ALATON et al., 2007). Em razão de sua estrutura molecular, estes compostos apresentam complexidade em sua degradação. Os processos convencionalmente utilizados necessitam de grande quantidade de produtos químicos para atingir os níveis de descoloração exigidos pela legislação, uma vez que os efluentes não podem conferir ou alterar as características do corpo receptor (KUNZ et al., 2002).

Dentro da indústria têxtil os corantes sintéticos são amplamente usados devido a sua variedade, aplicabilidade diversa, tendo ampla capacidade de fixação a diferentes tipos de materiais, podendo ser classificados conforme sua origem, método de aplicação à fibra e estrutura química (VÁZQUEZ-ORTEGA; LAGUNES; TRIGOS, 2020). Os corantes sintéticos da classe azo representam 65% dos corantes disponíveis comercialmente, são largamente

utilizados devido à simplicidade na síntese de diazotização que resulta em um amplo espectro de cores (ZANONI; CARNEIRO, 2001). O Drimaren CL-7B, um corante azo, pertence à categoria dos corantes reativos, reconhecidos por sua notável estabilidade de cor, sua capacidade de oferecer uma ampla gama de cores, facilidade de aplicação nos processos (KHAN et al., 2007; ARAUJO et al., 2006).

Porém, cerca de 15% dos corantes são liberados durante sua aplicação, incorporando aos efluentes grande complexidade, uma vez que os corantes azo são altamente tóxicos, recalcitrantes e resistentes a diversas alternativas de tratamento (ALMEIDA; CORSO, 2014). O descarte de efluentes têxteis causa inúmeros impactos ambientais e riscos à saúde humana. A disseminação desses efluentes coloridos no ambiente aquático acarreta elevada carga tóxica e bioacumulativa, impedindo os processos fotossintéticos, criando um ambiente ausente de oxigênio e extinguindo diferentes formas de vida (O. YESILADA *et al.*, 2003).

Os métodos usualmente aplicados para o tratamento de efluentes têxteis, como é o caso dos processos físico-químicos, apresentam resultados eficientes na retirada de material particulado e na redução de matéria orgânica, porém, apresentam inúmeras limitações. A associação dos sistemas primários e secundários são capazes de reduzir a estrutura dos corantes em aminas aromáticas, porém estes subprodutos podem ser mais nocivos do que sua forma original, além da geração de grandes quantidades de lodo e o alto consumo de energia (ÇINAR; DEMIRÖZ, 2010). Os processos biológicos de tratamento responsáveis pela remoção de matéria orgânica apresentam obstáculos na degradação da estrutura dos corantes em decorrência de sua complexidade. Além disso, os corantes são preparados para resistir à degradação a fim de aumentar sua fixação aos tecidos, dessa forma estes compostos são altamente resistentes a degradação microbiana (ZHANG; YU, 2000).

Nesse viés, a busca por opções sustentáveis que sejam economicamente e ecologicamente viáveis são cruciais para o adequado tratamento destes efluentes. Para este fim, os processos de micorremediação apresentam elevada potencialidade, uma vez que utilizam a ação de fungos para remover e/ou abrandar contaminantes presentes no meio ambiente (STAMETS, 2015).

Os fungos basidiomicetos, pertencentes ao Filo *Basidiomycota*, popularmente conhecidos como cogumelos, são amplamente produzidos comercialmente com objetivo de serem utilizados para fins comestíveis. Os fungos são microrganismo responsáveis pela reciclagem da matéria orgânica, pois seu sistema enzimático permite a degradação de

substâncias complexas, tal qual a lignina, transformando-as em CO₂ e água (RINALDI et al., 2008; ALEXOPOULOS et al., 1996). Nesse contexto, estudos indicam que o sistema metabólico dos fungos basidiomicetos também é capaz de degradar, reduzir e mineralizar moléculas recalcitrantes e xenobióticas, tais como as usualmente presentes nos efluentes têxteis (GAYLARDE et al., 2005).

Cabe ressaltar que, atualmente, o composto residual da produção de cogumelos comestíveis, após esgotada a fonte de nutrientes, é usualmente descartado por não apresentar destino rentável aos produtores (BATTISTELLI *et al.*, 2019). Todavia, após a finalização do ciclo de frutificação, o composto em questão encontra-se completamente colonizado pelos micélios dos cogumelos. Portanto, acredita-se que a utilização deste substrato como meio para o tratamento de efluentes têxteis, sobretudo para remoção de corantes, pode ser uma alternativa econômica e ambientalmente viável, cuja ação irá configurar-se em dois processos, na adsorção na superfície do substrato e na degradação enzimática pelas enzimas presentes no composto residual, as quais poderão transcorrer simultaneamente (STAMETS, 2005; BATTISTELLI et al., 2019).

As enzimas lignolíticas provenientes dos fungos basidiomicetos têm um papel fundamental na quebra e purificação de resíduos de lignocelulose presentes no ambiente. Essas enzimas desempenham uma função essencial em diversas atividades biológicas, abrangendo processos como ingestão, metabolismo, decomposição de matéria orgânica e síntese celular. Encontradas em praticamente todos os basidiomicetos que decompõem madeira, sua contribuição é crucial na decomposição ligninolítica, onde estão envolvidas na oxidação de componentes não-fenólicos da lignina. Portanto, no contexto deste estudo, as enzimas investigadas serão Lacases, Lignina Peroxidases e Manganês Peroxidases, devido à sua presença abundante nos fungos basidiomicetos (WESENBERG et al., 2003).

Nesse contexto, o presente estudo se propôs a efetuar uma análise comparativa com enfoque na eliminação do corante Drimaren Red CL-7B, empregando duas abordagens distintas, a saber, a utilização do fungo comestível *Pleurotus ostreatus* e a aplicação do resíduo derivado da produção do mesmo fungo. Este estudo analítico foi conduzido com consideração pela variabilidade das enzimas e potencial de adsorção apresentadas por cada conformação do referido microrganismo, visando avaliar e confrontar suas respectivas eficiências no processo de descoloração do corante em questão.

2 OBJETIVO

Avaliar o processo de remoção do corante têxtil Drimaren Red CL-7B utilizando cogumelo *Pleurotus ostreatus*, bem como, o composto residual de sua produção.

2.1 Objetivo geral

2.1.1 Objetivos específicos

- Determinar a melhor condição operacional para remoção do corante do efluente têxtil, considerando os parâmetros pH e concentração de substrato utilizado;
- Avaliar as possíveis rotas de remoção de corante do efluente têxtil, levando em consideração os processos de oxidação química, adsorção no substrato, adsorção na estrutura do fungo e degradação enzimática;
- Caracterizar e avaliar atividade enzimática no cogumelo e no composto residual.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Indústria têxtil

A indústria têxtil é um setor de grande destaque mundial e por ser um segmento altamente diversificado, desempenha um papel fundamental nos avanços da sociedade e na economia global, abrangendo desde a produção de fibras e tecidos até a confecção de uma ampla gama de produtos finais, como roupas, produtos para o lar e materiais técnicos. A história da indústria têxtil no Brasil tem origem há aproximadamente 200 anos, constituindo-se em uma das atividades pioneiras no processo de industrialização do país, sendo assim tem grande influência nas dimensões social, econômica, cultural e política. Atualmente, o setor têxtil é o 5º maior ramo industrial no país e o 2º maior setor gerador de empregos (FUJITA *et al.*, 2015; ABIT, 2019).

Na década de 1990 a economia brasileira passou por um processo de globalização econômica, com a liberação do comércio exterior e a falta de política industrial houve a deliberação de pesados impostos sob a indústria têxtil brasileira. Com a implementação do plano de estabilização, transcorreu o fortalecimento do mercado têxtil brasileiro, marcando sua trajetória por um processo de mudança e liberdade econômica (KON; COAN, 2005).

De acordo com *United Nations Industrial Development Organization* (UNIDO), o Brasil se encontra como 10º maior produtor mundial de têxteis com a produção de quase 68 bilhões de reais, sendo correspondente a 3% da produção da China (1º) (UNIDO, 2018). Com os eventos proporcionados pela Covid-19, o setor têxtil no Brasil teve um impacto significativo em suas exportações em 2020, levando as empresas do setor a deixarem para trás práticas antiquadas e a adotarem novas estratégias para manter suas operações (MOREIRA *et al.*, 2023).

A cadeia agroindustrial têxtil envolve a cadeia produtiva, distribuição e confecção que é responsável pela fabricação de fibras têxteis até a distribuição e comercialização. A indústria têxtil é uma área de manufatura que através dos processos de fiação, tecelagem, malharia e beneficiamento transforma as fibras em tecidos e fios, que irão fomentar fabricas de confecção e setores do vestuário (MENDES JUNIOR, 2021).

3.1.1 Processo têxtil

O processo produtivo da indústria têxtil compreende o processamento de diferentes fibras naturais, sintéticas e artificiais. O beneficiamento têxtil consiste no processamento da matéria-prima e transformação das fibras podem ser organizados conforme as seguintes etapas: preparação da matéria prima, fiação, tecelagem, beneficiamento primário (chamuscagem,

desengomagem, purga, mercerização e alvejamento), beneficiamento secundário (tingimento e estamparia), beneficiamento terciário (acabamentos químicos e mecânico) e confecção (RAMOS *et al.*, 2020).

As etapas da cadeia têxtil têm como objetivo transferir cor, suavidade, confortabilidade, estabilidade e maciez ao substrato têxtil. O processamento da matéria-prima inicia-se com a preparação da fibra, processo que consiste na separação das fibras, paralelização, limpeza, regularização, afinamento, torção e embalagem habilitando-a para as seguintes etapas (AGUIAR *et al.*, 2022).

A etapa de fiação consiste na transformação das fibras em fios, sendo caracterizados por seu diâmetro e espessura. No Brasil, os tipos de matéria-prima mais utilizados são fibras de algodão, fibras artificiais, sintéticas, fibras de linho, lã e seda. A etapa de tecelagem consiste na produção de um tecido plano através do processo de entrelaçamento dos fios.

O beneficiamento primário corresponde aos processos que realizam a retirada de óleos e substâncias advindos das etapas de fiação e tecelagem. Essas operações envolvem a lavagem, fervura que tem como objetivo preparar o tecido para a fase de coloração, agregando resistência, maior poder de adsorção e estabilidade ao material (CONWAY, 2016).

O beneficiamento secundário é representado pelas etapas de tingimento e estamparia. O processo de tingimento consiste na modelagem e coloração dos tecidos. O sucesso desta etapa é determinado pela qualidade de fixação do corante à fibra, lavagens recorrentes para retirada de excessos, padronização de cor, qualidade de retenção da cor em relação à luz e uso prolongado da fibra (GUARANTINI; ZANONI, 2000). A adsorção dos corantes aos tecidos os mantém difundidos nas fibras. A estamparia têxtil é o processo responsável pela transferência da cor, impressão de uma imagem ou desenho a um tecido através de técnicas como serigrafia, estamparia digital e estamparia digital por sublimação (SALEM, 2010).

O beneficiamento terciário consiste na última etapa do beneficiamento têxtil, esta etapa é formada por processos físicos e químicos e é ela que atribuirá ao produto final características estéticas e funcionais. Através dos processos de acabamento mecânico e químico é possível transformar a textura, grau de maciez dos tecidos e resistência ao desgaste. A fase da confecção consiste na etapa de planejamento para construção de peças, caracterizado pelos processos de desenho, molde, corte, montagem que dará forma ao produto final (AGUIAR *et al.*, 2022).

3.2 Corantes têxteis

A arte do uso dos corantes tem origem há aproximadamente 4.000 anos, sendo encontrados desde pinturas rupestre em cavernas a artigos egípcios tingidos a base de corante natural. Em 1856, o primeiro corante sintético foi descoberto por William Henry Perkin, dando início a grande revolução dos corantes. A partir da sintetização da mauveína, o primeiro corante sintético foi criado, atualmente 90% dos corantes utilizados são sintéticos (DE SOUZA, 2004).

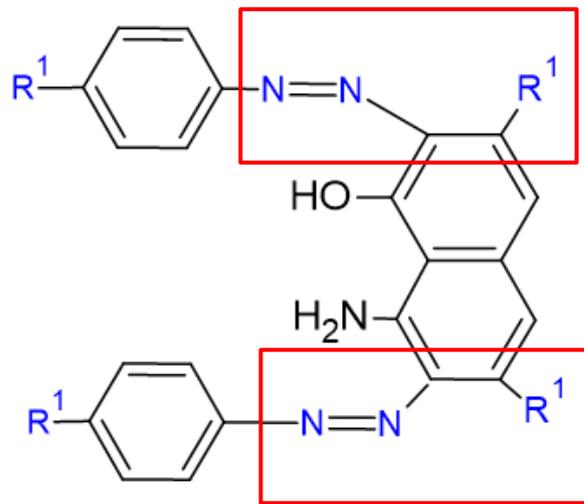
Corantes são substâncias químicas extraídas de fontes naturais como plantas, vegetais e minerais ou produzido de forma sintética, podendo apresentar origem orgânica ou inorgânica (KAMMRADT, 2004). Segundo Benkhaya *et al.* (2020), para a utilização de corantes naturais faz-se necessário o emprego de sais que elevem a afinidade entre o corante e a fibra, porém sua instabilidade à luz, ao tipo de tecido e as etapas de lavagem inviabilizam sua aplicação.

A estrutura molecular dos corantes é formada por dois grupos: o grupo cromóforo e auxocromo. O grupo cromóforo ou grupo funcional é a estrutura formada por um conjunto de átomos responsável pela coloração apresentada por cada corante (ZANONI; YAMANAKA, 2016). Os grupos cromóforos são caracterizados por absorver energia ou luz visível (400 a 700 nm) e transmitem a cor referente ao comprimento de onda não absorvido, denominado cor complementar. O grupo auxocromo é a estrutura ligada ao cromóforo que realizam a transferência das bandas de absorção mudando a intensidade das cores produzindo diversificação das mesmas (MCMULLAN, G. *et al.*, 2001; Zollinger, 1991).

Dentro dos setores industriais, os corantes oferecem aplicabilidade diversa, tendo ampla capacidade de fixação a diferentes tipos de substratos (VÁZQUEZ-ORTEGA; LAGUNES; TRIGOS, 2020). Na indústria têxtil esses corantes conferem cor a variados tipos de produtos através dos processos de fabricação.

Dentre a variedade de corantes, o grupo altamente difundido pertence ao agrupamento azo, o qual apresenta um anel aromático ligado a um agrupamento $-N=N-$, conforme apresentado na figura 1. A estrutura azo representa aproximadamente 70% dos corantes têxteis produzidos (KAMIDA, 2004).

Figura 1 - Exemplo de uma estrutura química característica de um grupo cromóforo de um azocorante



Fonte: KUNZ et al., 2002

Quanto a sua fixação do corante a fibra, as propriedades físico-químicas são essenciais para este processo, podendo ser caracterizados pelas ligações iônicas, ligações de hidrogênio, ligações de *Van der Waals* e ligações covalentes (GUARANTINI; ZANONI, 2000).

3.2.1 Classificação dos corantes

Dentro da indústria têxtil os corantes sintéticos são amplamente usados devido a sua variedade e estabilidade, podendo ser classificados conforme sua origem, método de aplicação à fibra e estrutura química (MATHUR, 2006; ZANONI; CARNEIRO, 2001). De acordo com Hunger (2003), o Índice Internacional de Corantes (Color Index) descreve os corantes conforme o método de aplicação à fibra apresentados na Tabela 1 a seguir:

Tabela 1- Classificação e emprego dos principais tipos de corantes têxteis utilizados no Brasil

Classes	Principais substratos	Método de aplicação	Grupo cromóforo
Ácidos	Nylon, lã, seda, couro e cosméticos	Aplicados por ligações iônicas	Azo, antraquinona, trifenilmetano, azina, xanteno, nitro e nitroso
Azoicos	Algodão, seda, poliéster e acetato de celulose	Compostos insolúveis em água que são diretamente sintetizados à fibra.	Azo
Branqueadores	Poliacrilonitrila, papel, nylon modificado, poliéster	Aplicados na forma de dispersão ou suspensão	Cianina, hemicianina, diaz-hemicianina, difenilmetano,

			triarilmetano, azo, azina, xanteno, acridina, oxazina e antraquinona
À cuba	Detergentes, fibras, óleos, plásticos, sabões, tintas e papel	Corantes aplicados insolúveis em água	Antraquinona e índigoides
Diretos	Algodão, seda, papel, couro e nylon	Interações de <i>Van der Waals</i>	Azo, ftalocianina, estilbeno e oxazina
Dispersivos	Poliéster, poliamida, acetato, acrílico e plásticos	Tingimento por dispersão aquosa	Azo, antraquinona, estiril, nitro, e benzodifuranona
Enxofre	Algodão e seda	Aplicação por adição de um reator químico	Estruturas indeterminadas
Reativos	Algodão, madeira, silk e nylon	Aplicação a partir de ligações covalentes	Azo, antraquinona, ftalocianina, formazan, oxazina e básico
Pré-metalizados	Madeira, couro, alumínio anodizado, lã, fibras naturais e fibras sintéticas	Aplicação por adição de um mordente	Azo e antraquinona
Diretos	Algodão, seda, papel, couro e nylon	Interações de <i>Van der Waals</i>	Azo, ftalocianina, estilbeno e oxazina

Fonte: HUNGER, (2003); ZANONI; YAMANAKA, (2016)

3.2.2 Toxicidade dos corantes

A toxicidade é a capacidade de uma substância química apresentar características nocivas para organismos e meio ambiente. A toxicidade informa o grau de letalidade de uma substância química, proporcionado pela exposição a ela. Corantes são substâncias químicas com alto potencial deletério por apresentar características xenobióticas, mutagênicas, carcinogênicas e recalcitrantes. Dessa forma, suas características provocam uma série de alterações fisiológicas e bioquímicas (ZANONI; YAMANAKA, 2016).

A exposição humana aos corantes pode ocorrer das seguintes formas: oral, pela ingestão de alimentos, medicamentos, água contaminada e por meio do contato direto com a pele. Em contrapartida, a contaminação ambiental por corantes têxteis ocorre da remoção incompleta e tratamento pouco eficaz de efluentes têxteis (CHEQUER; DORTA; OLIVEIRA, 2011).

Os efeitos nocivos provenientes do contato com corantes têxteis podem ser classificados em letais e sub-letais. Os efeitos letais resultam em mortalidade e os sub-letais resultam em anormalidades no DNA, ocasionando alterações no crescimento, desenvolvimento, reprodução e comportamento (KAMIDA, 2004).

3.2.3 Corante azo reativo

Dentro da diversidade de corantes utilizados na indústria, os corantes sintéticos comerciais mais utilizados correspondem à classe dos reativos que apresentam a ligação azo como seu grupo cromóforo. Do mesmo modo, a classe dos corantes reativos são os mais produzidos. Os azo corantes representam a classe com uma ampla gama de cores e estruturas e representam até 70% do total de corantes têxteis usados (LANG et al., 2013). A classe dos corantes reativos apresenta alta estabilidade da cor durante o processo de lavagem, amplo espectro de cores, facilidade de aplicação na etapa de tingimento e baixo consumo de energia (KHAN *et al.*, 2010; ARAUJO *et al.*, 2006).

Porém, esta classe apresenta baixa fixação à fibra agregando ao efluente alta complexidade e baixa biodegradabilidade, emergindo como um poluente ambiental. Além disso, alguns azo corantes apresentam elevados níveis de toxicidade e carcinogenicidade em decorrência de processos químicos que resultam em radicais tóxicos, dificultando o tratamento de águas residuais contendo corantes (COLLIER; STORM; BRONAUGH, 1993; JAYANTHY et al., 2014; BHATIA, 2017).

3.3 Efluentes têxteis

3.3.1 Caracterização dos efluentes têxteis

O setor têxtil destaca-se pela alta geração de empregos e contribuição econômica, porém com a expansão de suas atividades e capacidade de produção provoca-se uma ampliação na geração de resíduos. Durante o processo de produção são gerados resíduos sólidos e efluentes líquidos resultantes dos processos de corte, tingimento e acabamento (KHANDEGAR & SAROHA, 2013). Os efluentes líquidos altamente coloridos, em decorrência da utilização de corantes têxteis, apresentam em sua composição substâncias tóxicas que, quando descartadas sem tratamento adequado, são passíveis de ocasionar contaminação ambiental.

Cerca de 30% da concentração de corante advindos do processo de tingimento e acabamento compõem o efluente final, devido à baixa taxa de fixação do corante à fibra (KHATRI, 2015; CHAVES et al., 2022). O processo de tingimento envolve etapas de modelagem, fixação e lavagem final que compõem diferentes reações químicas, lavagens recorrentes para padronização da cor, análise da qualidade da cor em relação à luz e durabilidade da fibra.

Dessa forma, efluentes têxteis apresentam uma composição heterogênea e de alta complexidade. Sua composição é caracterizada pela presença de substâncias orgânicas (amido, óleos, graxas, gomas, álcoois, ácido acético, surfactantes, enzimas, fenóis, detergentes, pectina e outros) e inorgânicas (hidróxido de sódio, cloretos, sulfetos, carbonato e outros) (SCHALLEMBERGER, 2021).

Em decorrência dos diversos produtos químicos utilizados e baixa fixação dos corantes, esses efluentes podem apresentar intensa coloração, significativa quantidade de sólidos suspensos, pH altamente flutuante, altas temperaturas, concentrações elevadas de demanda química de oxigênio (DQO), significativa quantidade de metais pesados (Cu, Cr e Ni), compostos clorados e surfactantes (ARAUJO E YOKOYAMA, 2006).

A presença de metais pesados em efluentes têxteis é um problema ambiental significativo. De acordo com um estudo realizado por Oliveira et al. (2018), os metais pesados são encontrados em efluentes têxteis devido à utilização de corantes, fixadores e auxiliares têxteis, além da falta de tratamento adequado. Os metais pesados presentes nesses efluentes podem ter efeitos negativos sobre o meio ambiente, incluindo a contaminação do solo e da água, que pode afetar a saúde humana e a biodiversidade (SIDDIQUE et al., 2019). Os efluentes produzidos pelo setor têxtil apresentam alta carga poluidora, em que 90% dos produtos químicos aplicados na etapa do beneficiamento têxtil são descartados (SILVA FILHO, 1994).

Os principais parâmetros físico-químicos características dos efluentes têxteis estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Características do efluente têxtil

Parâmetro	Mínimo	Máximo
pH	5, 5	10,5
Temperatura (°C)	33	45
DBO (mg L⁻¹)	80	6000
DQO (mg L⁻¹)	15	12000
	0	
SST (mg L⁻¹)	15	8000
SDT (mg L⁻¹)	2900	3100
Cloreto (mg L⁻¹)	20	6000
	0	
Nitrogênio Total Kjeldahl (mg L⁻¹)	70	80
Cor (mg L⁻¹)	50	2500
Alcalinidade Total (mg L⁻¹)	50	800
	0	
Óleos e graxas (mg L⁻¹)	10	50
Sulfeto (mg L⁻¹)	5	20
Sulfato (mg L⁻¹)	50	700

	0	
Sódio (mg L ⁻¹)	40	2175
	0	
Potássio (mg L ⁻¹)	30	50
Zinco (mg L ⁻¹)	3	6
Cobre (mg L ⁻¹)	2	6
Cromo (mg L ⁻¹)	2	5

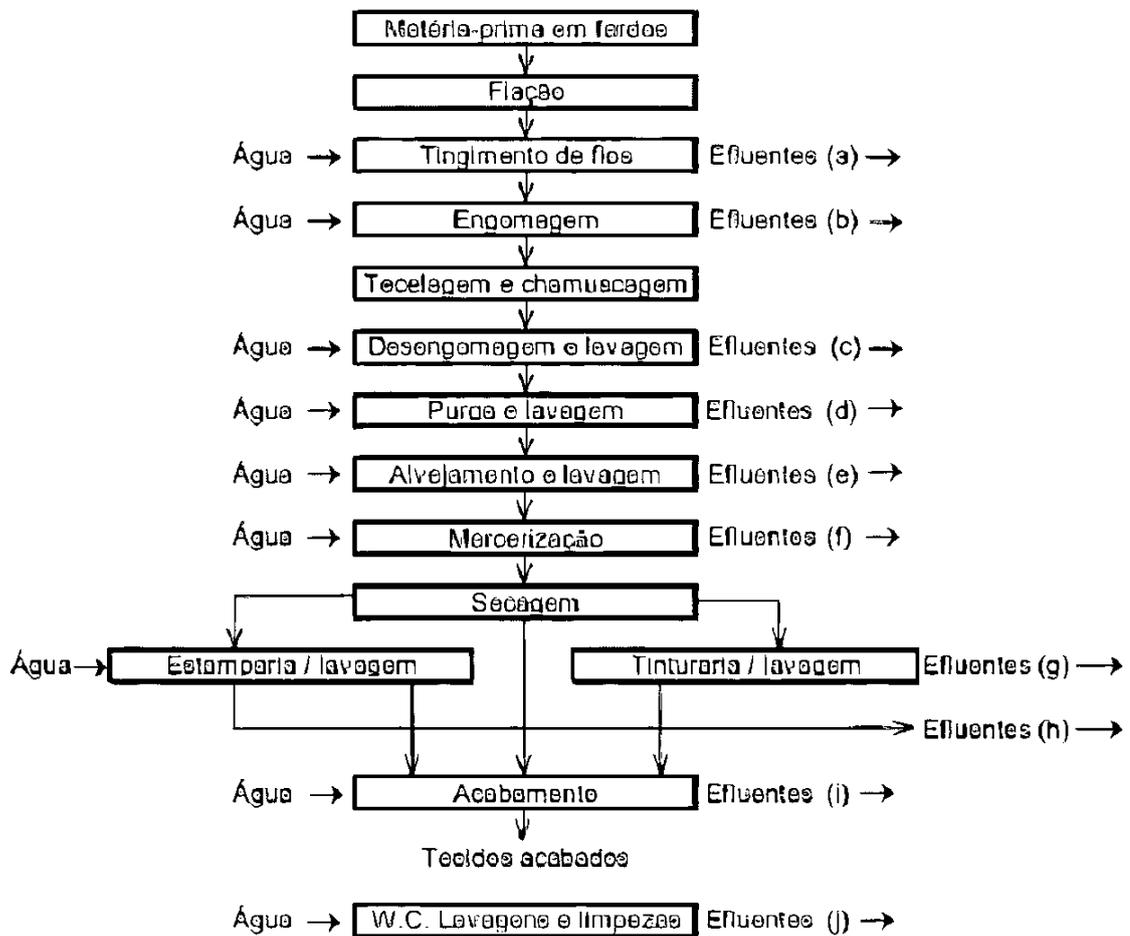
Fonte: adaptado de VALH et al. (2011) e HUSSEIN (2013)

3.3.2 Uso de água e a geração de efluentes têxteis

Nos processos produtivos da indústria têxtil grandes volumes de água são consumidos, figurando o setor têxtil entre os dez ramos industriais que mais consomem água. Os processos operacionais dentro da indústria demandam grandes quantidades de água e podem variar conforme cada etapa e equipamento utilizado (SAMANTA; PANDIT; BASAK, 2019).

A fabricação de tecidos requer uma grande quantidade de recursos naturais, como água, energia e matérias-primas, além de gerar uma quantidade considerável de resíduos e poluição. Estudos indicam que a indústria têxtil é responsável por cerca de 10% das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE) e consome cerca de 20% da água utilizada pela indústria em todo o mundo (WORLD WILDLIFE FUND, 2021). A Figura 2 apresenta as etapas de consumo de água e geração de efluente têxtil, bem como sua caracterização.

Figura 2 – Etapas de consumo de água e geração de efluentes



Fonte: BRAILE; CAVALCANTI, 1993

Onde: (a) DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) alta, muitos sólidos e pH de neutro a alcalino; (b) e (c) pH neutro, temperatura, DBO e teor de sólidos totais elevados; (d) temperatura elevada e altos teores de DBO, alcalinidade e teor de sólidos totais; (e) DBO elevada; pH alcalino e muitos sólidos; (f) DBO baixa, pH fortemente alcalino e poucos sólidos/ (g) pH neutro a alcalino, muitos sólidos e alta DBO; (h) elevada DBO, pH alcalino; (i) elevada DBO e pH alcalino; (j) DBO, sólidos e pH alcalino.

O consumo exacerbado de água pelo ramo têxtil é ampliado pela manutenção precária dos equipamentos, vazamentos, peças com mal funcionamento, que consequentemente irão ocasionar lavagens ineficazes e excessivamente longas impossibilitando a reutilização da água (ARAÚJO et al., 2019). No que diz respeito ao tipo de tecido, algumas fibras requerem maior quantidade de água para o seu processamento. Estima-se que para produção de 1 Kg de tecido de algodão são necessários de 100 a 150 litros de água (ARSLAN-ALATON et al., 2008; SAMANTA; PANDIT; BASAK, 2019).

Em decorrência dos diversos fatores que afetam o consumo de água, o ramo têxtil é responsável pela geração de elevadas quantidades de água residual por quilo de tecido produzido. Estima-se que 88% da água usada compõem o efluente final e 12% são descartados pelo fenômeno da evaporação (LEÃO; CARNEIRO; SOARES; 2002). Diante deste cenário, a busca por alternativas que enfoquem no reúso da água e na redução ou substituição de produtos químicos de menor impacto é essencial para reduzir os efeitos causados no meio ambiental.

3.3.3 Impactos ambientais relacionados à indústria têxtil

A indústria têxtil representa um dos setores mais importantes e antigos do mundo, e sua produção tem um impacto significativo no meio ambiente. Sua contribuição para poluição ambiental torna os ciclos de vida de produtos têxteis insustentáveis. O impacto geral do setor têxtil é desastroso, em razão da problemática envolvida no lançamento de efluentes, uso de produtos químicos nocivos, o alto consumo de água e energia, a geração de grandes quantidades de resíduos sólidos e gasosos, o enorme consumo de combustível para transporte de peças para locais remotos e uso de materiais de embalagem não biodegradáveis.

Segundo a Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial (UNIDO), a indústria têxtil é responsável por até 20% da poluição da água globalmente. A poluição causada pelos produtos químicos utilizados no processo de tingimento é especialmente preocupante. O uso indiscriminado de corantes tóxicos e solventes orgânicos é uma prática comum na indústria, e essas substâncias podem causar impactos na saúde humana, nos ecossistemas e na qualidade dos recursos hídricos. A poluição da água afeta a saúde pública, pois muitas vezes as comunidades locais utilizam a mesma água para consumo e irrigação (LI et al., 2016).

Em razão da ineficiência de processos operacionais e lançamento de efluentes altamente coloridos no meio ambiente, os produtos provenientes desta descarga se acumulam nos corpos hídricos provocando diversos problemas acerca da quantidade de oxigênio dissolvido (OD), demanda biológica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO) e cor (SEN et al., 2016). A natureza desses efluentes interfere na capacidade de fotossíntese das plantas aquáticas, uma vez que são liberados, impedem a penetração da luz estimulando a criação de compostos perigosos (BHATIA, 2017).

Os impactos ambientais da indústria têxtil também têm consequências de longo alcance para a saúde humana. A exposição à água, ar e solo contaminados pode levar a uma série de problemas de saúde, incluindo problemas respiratórios, irritação da pele e câncer. A má fixação

de um corante permite que suas moléculas permaneçam soltas na fibra podendo entrar em contato com a pele através do suor (REZENDE *et al.*, 2015). Além disso, o uso de produtos químicos perigosos na produção têxtil pode ter efeitos adversos na saúde dos trabalhadores, levando riscos à saúde ocupacional (ZANONI; YAMANAKA, 2016). De acordo com um relatório da Organização Internacional do Trabalho (OIT) (2019), os trabalhadores da indústria têxtil correm o risco de exposição a produtos químicos nocivos, levando a problemas de saúde a longo prazo.

Dentre os efeitos observados após o período de exposição, destacam-se, entre outros: alergias, diminuição da fertilidade, morte, inibição do crescimento e alto índice de ação mutagênica (ALI, 2010; ZANONI; YAMANAKA, 2016). Estudos mostram uma correlação direta entre essas modificações e vários tipos de cânceres em vários órgãos, bem como anormalidades cromossômicas em células de mamíferos.

Devido à alta concentração de ligações azo, grupos sulfonados e anéis aromáticos que compõem esses produtos químicos, eles podem atuar como xenobióticos, que podem alterar a bioquímica e a fisiologia do corpo por suas ações naturais ou subprodutos de seu metabolismo. (ZANONI; YAMANAKA, 2016).

Os impactos ambientais da indústria têxtil são significativos, com consequências de longo alcance para o meio ambiente e a saúde humana. Abordar esses impactos é essencial e é crucial para a indústria adotar práticas sustentáveis e reduzir sua pegada ambiental.

3.4 Processos de tratamento de efluentes têxteis

Devido à elevada carga poluidora disseminada pela indústria têxtil, os processos de tratamento são essenciais para a minimização de impactos ambientais. A combinação de métodos para redução do volume de resíduos produzidos são essenciais para assegurar as conformidades com a legislação ambiental (CUNHA *et al.*, 2019). Lagoas aeróbias, processos biológicos, processos físico-químicos e sistemas de lodos ativados são algumas categorias principais nas quais esses processos podem ser divididos. As vantagens e dificuldades de cada um destes métodos de tratamento de efluentes têxteis variam.

A remoção dos poluentes por meio de processos físico-químicos, por sua vez, depende de interações químicas e físicas. Para desestabilizar e aglomerar partículas e cores em suspensão, por exemplo, a coagulação-floculação implica a adição de produtos químicos (coagulantes e floculantes). A posterior separação dos flocos das águas residuais é facilitada pelos processos de clarificação e sedimentação (GANDHI, 2005). Os métodos físico-químicos são excelentes

para reduzir a cor, DQO e turbidez, mas também podem consumir bastante energia e produtos químicos. A combinação de processos físicos e químicos para remover contaminantes garantem que o efluente obtenha níveis aceitáveis para o descarte.

Nos sistemas biológicos, os microrganismos desempenham um papel na decomposição dos poluentes. Esses processos biológicos utilizam as capacidades metabólicas dos microrganismos para converter contaminantes em biomassa e gases (MARIANO, 2006). Os métodos biológicos são considerados práticos que apresentam baixo consumo de energia. No entanto, exigem uma duração de tratamento. São sensíveis a variações de temperatura e pH (OLIVEIRA et al., 2021; MELO, 2019).

As lagoas aeróbicas apresentam uma abordagem de tratamento especialmente adequada para estações de tratamento de águas residuais de pequeno e médio porte. Nestes sistemas ao ar livre, o crescimento de microrganismos e a degradação de poluentes ocorrem em condições facilitadas pelo fornecimento artificial de oxigênio (ROCHA et al., 2019). Em algumas áreas, os lagos oferecem um meio economicamente viável de tratamento de descargas de resíduos nocivos. No entanto, podem ter limitações na remoção de compostos persistentes e podem necessitar de área de terra significativa (ADHIKARI; FEDLER, 2019).

Os sistemas de lodos ativados são amplamente utilizados devido à sua eficiência na redução de contaminantes e na eliminação de sólidos suspensos em águas residuárias (DEENA, 2022). Uma das vantagens associadas ao tratamento de lodos ativados é a produção de efluentes de alta qualidade com remoção eficiente de resíduos orgânicos e pigmentos coloridos. Porém pode ser necessário considerar medidas, para sua aplicação (BUAISHA, 2020; BARRIOS HERNÁNDEZ, 2020).

3.5 Fungos basidiomicetos

Os fungos são um grupo diverso de microrganismos eucarióticos que podem exibir forma unicelular ou multicelular. Esses organismos utilizam nutrição quimiorganotrófica, o que significa que adquirem energia consumindo matéria orgânica. Uma função ecológica fundamental dos fungos é seu papel na decomposição e reciclagem de nutrientes nos ecossistemas (POINTING *et al.*, 2001). Eles desempenham um papel crítico na decomposição do material orgânico e no retorno dos nutrientes ao solo, apoiando assim o crescimento de outros organismos no ecossistema (WEBSTER, 2007).

O filo Basidiomycota é um dos grupos de fungos mais diversos do Reino Fungi, englobando representantes com o maior grau de heterogeneidade estrutural, sendo encontrados

em uma ampla variedade de habitats, incluindo florestas, pastagens e pântanos, e desempenham importantes papéis ecológicos como decompositores, simbiontes micorrízicos e patógenos de plantas (FONSECA, 2009). Comumente referidos como cogumelos, orelhas-de-pau e fungos da podridão branca, os Basidiomycota apresentam uma estrutura multicelular e aclorofila, sendo a maioria das espécies sapróbicas e desempenhando um papel fundamental na decomposição de troncos e folhas. Esses fungos são encontrados em diferentes substratos e biomas, contribuindo para uma série de processos ecológicos (KIRK et al., 2008).

De acordo com um estudo recente de Cheek et al. (2020), os fungos possuem características morfológicas e fisiológicas que os tornam únicos, estima-se que existam cerca de 148.000 espécies de fungos descritas, sendo a maioria representantes dos filos Ascomycota e Basidiomycota. Porém, estima-se que existam cerca de 3.8 milhões de espécies ainda desconhecidas (HIBBETT et al., 2007; HAWKSWORTH; LÜCKING, 2017). A biodiversidade de microrganismo é substancialmente maior do que a de plantas e animais vertebrados. Em um pequeno pedaço de terra, existe um número maior de espécies de fungos, bactérias e protozoários do que o número combinado de plantas e animais vertebrados presentes em toda a América do Norte (STAMETS, 2005).

Os fungos desempenham um papel vital em diversos ecossistemas, ocupando uma variedade de nichos ecológicos para obter matéria orgânica para o seu crescimento por meio de saprofitismo, parasitismo e mutualismo (ANASTASI; TIGINI; VARESE, 2012). Como resultado, são justamente conhecidos como os grandes recicladores do planeta, decompondo moléculas orgânicas complexas em compostos menores que podem nutrir outros organismos. Esse processo de decomposição desempenha um papel crítico nos ciclos de nutrientes do planeta, garantindo que a matéria orgânica seja devolvida eficientemente ao ecossistema (STAMETS, 2005; FERNÁNDEZ et al., 2020).

De acordo com Fernández et al. (2020), os fungos são responsáveis por decompor 90 % da matéria orgânica no solo, mantendo a saúde do ecossistema terrestre. De forma similar, os autores Xiang et al. (2020), enfatiza o papel crucial dos fungos na ciclagem de nutrientes em ecossistemas aquáticas. A designação “recicladores do planeta” também pode ser atribuído a parte vegetativa do fungo, denominada micélio. A parte micelial dos fungos basidiomicetos possuem a capacidade de liberar enzimas extracelulares que são capazes de decompor diferentes substratos orgânicos, bem como a celulose e lignina (POINTING et al., 2001; BUCHER et al., 2004).

As enzimas desempenham um papel decisivo na biodegradação da lignina, um polímero complexo que é resistente à degradação pela maioria dos organismos. Os basidiomicetos, devido à sua capacidade de quebrar a lignina, servem como importantes agentes de ciclagem de carbono nos ecossistemas florestais. A degradação da lignina por esses fungos não apenas fornece uma fonte de energia e nutrientes para outros organismos, mas também ajuda a liberar o carbono armazenado no material vegetal, contribuindo para a saúde geral e o equilíbrio do ecossistema (HOFRICHTER et al., 2019).

As enzimas lignolíticas não só são capazes de degradar lignina, mas também estruturas de compostos orgânicos que apresentam configuração similar a da lignina, como pesticidas, inseticidas, compostos sintéticos e xenobióticos (MANSUR et al., 2017; HYDE et al., 2019). O crescimento hifal transformam as habilidades dos fungos, aumentando sua capacidade de alcançar poluentes em ambientes contaminados (WEBSTER, 2007; HYDE et al., 2019). Os fungos basidiomicetos produzem enzimas predominantemente extracelulares, sendo estas as principais modificadoras de lignina identificadas como Lacase, manganês-peroxidase, lignina-peroxidases, glutathione peroxidase e celulases (LEVASSEUR et al., 2013).

O sucesso evolutivo do reino Fungi está atrelado a sua capacidade de sobreviver em condições críticas. Os fungos são capazes de suportar condições extremas de pH, temperatura, concentrações elevadas de poluentes e variabilidade quanto a disponibilidade de nutrientes (BANO et al., 2018). Seu alto grau de adaptabilidade permite que prosperem em diferentes situações.

É importante destacar que não só as enzimas lignolíticas têm papel essencial; os fungos apresentam enorme potencial de absorção de metais pesados e alto desempenho de adsorção em sua superfície (BALDRIAN, 2003). Conforme as informações elencadas, os fungos apresentam-se como uma alternativa interessante para o tratamento de efluentes têxteis, uma vez que por similaridade estes microrganismos conseguem realizar a remoção de corantes têxteis.

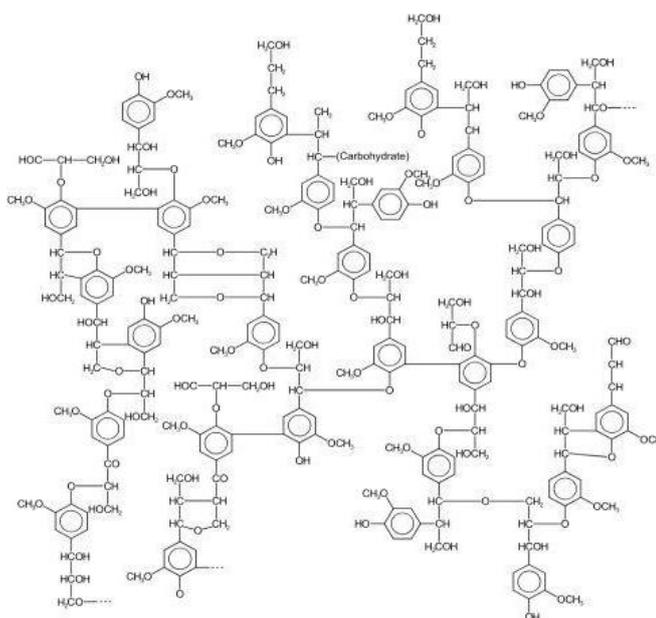
3.5.1 Sistemas enzimáticos

As enzimas desempenham um papel vital em uma ampla gama de processos biológicos, incluindo ingestão, metabolismo, degradação de matéria orgânica e síntese celular (DIXON *et al.*, 2019; ZHANG *et al.*, 2021). As enzimas são substâncias orgânicas altamente específicas que tem como função ser um catalisar de reações químicas ou de um conjunto de reações. Cada enzima possui um formato único que determinará sua função e sua forma é delineada conforme

a disposição de seus aminoácidos (BERG *et al.*, 2002; EBRAHIMI *et al.*, 2020). A performance das enzimas pode ser afetada por diversos fatores, sendo estes pH, temperatura e a presença de um possível inibidor de atividade (NELSON; COX, 2005).

As enzimas lignolíticas produzidas pelos fungos basidiomicetos são responsáveis pela degradação e desintoxicação de resíduos lignocelulósicos do meio ambiente. A lignina é um polímero complexo e resistente (Figura 3) que compõe e serve de suporte aos tecidos vegetais oferecendo proteção a estrutura de árvores e plantas terrestres (FONTES, 2019; MOHNEN, 2014). Devido à sua biodegradabilidade limitada e complexa interação química entre seus monômeros, a lignina é o biopolímero mais abundante na natureza e um constituinte resistente de materiais lignocelulósicos, em consequência, faz-se necessário que os fungos desenvolvam mecanismos inespecíficos para sua deterioração (KUMAR; CHANDRA, 2020).

Figura 3 - Modelo representativo da estrutura da lignina



Fonte: GLAZERA; NIKAIDO, 2007

As principais enzimas modificadoras de lignina que formam o sistema lignolítico são as Lacases (Lac), Lignina-peroxidases (LiP) e Manganês-peroxidases (MnP). A degradação da lignina ocorre por meio de um aparato enzimático realizado pela transferência de átomos de hidrogênio e quebra de sua estrutura (WESENBERG *et al.*, 2003; FONTES, 2019). Uma vez que os fungos basidiomicetos degradam a estrutura complexa da lignina, de forma equivalente eles degradam a estrutura de compostos recalcitrantes presentes em corantes têxteis, devido a sua similaridade com a configuração da lignina.

A enzima lignina-peroxidase é uma oxidorreductase que catalisa reações químicas através da transferência de elétrons. Enzima descoberta inicialmente no fungo *Phanerochaeta chrysosporium*, apresentam um grande potencial na transformação de lignina e seus derivados. O ferro atua como grupo prostético neste componente de glicoproteína, que requer peróxido de hidrogênio (H_2O_2) para funcionar como agente catalítico. (MOREIRA NETO, 2006).

LiP é um catalisador tanto para o acoplamento oxidativo de fenóis a quinonas quanto para a clivagem oxidativa de ligações de éter arílico não-fenólicos. Na presença de peróxido de hidrogênio, também oxida outras substâncias relacionadas à lignina, como álcool veratrílico e Mn^{2+} , removendo elétrons, produzindo radicais catiônicos (KUMAR; CHANDRA, 2020; BRINKMAN et al., 1997; REYS, 2003). A enzima lignina-peroxidase tem alto potencial de aplicação na biorremediação e degradação de biomassa lignolítica, sendo capaz de desintoxicar efluentes industriais, corantes, componentes clorados e outros (WESENBERG et al., 2003).

A enzima Manganês-peroxidase apresenta propriedades estruturais semelhantes à da lignina-peroxidase, uma vez que também faz parte do grupo das glicoproteínas, dispondo do ferro como grupo prostético, sendo necessário a presença de peróxido de hidrogênio para realizar suas atividades (WARIISHI et al., 1992).

A enzima manganês peroxidase é uma isoenzima, oxidando Mn^{2+} em Mn^{3+} formando intermediários altamente reativos que atuam de forma eficaz nos processos de degradação. A MnP é biocatalisador para a limpeza de corpos hídricos e solos contaminados, porque a decomposição de lignina e composto tóxicos como hidrocarboneto aromático policíclico (HAPs) depende exclusivamente da disponibilidade de íons de manganês (MOREIRA NETO, 2006; MARTÍNEZ et al., 2009).

Lacases são enzimas extracelulares que constituem o grupo das glicoproteínas monoméricas, diméricas e tetraméricas que apresentam íon de cobre como grupo prostético (CLAUS, 2003). Produzida por quase todos os basidiomicetos decompositores de madeira, sua participação é de extrema importância na decomposição ligninolítica integrando a oxidação de componentes não-fenólicos da lignina (WESENBERG et al., 2003).

As Lacases têm sido exaustivamente estudadas, com ênfase em sua aplicabilidade industrial, seu potencial ligninolítico e sua capacidade de catalisar a oxidação de fenóis e, principalmente, de compostos aromáticos. Devido ao seu uso no branqueamento de corantes, na síntese de produtos químicos e na remediação de solo e água contaminados, as lacases desempenham um papel significativo na indústria. (DURÁN et al. 2002).

3.5.2 Fungo *Pleurotus ostreatus*

Os cogumelos do gênero *Pleurotus* pertencentes ao grupo dos fungos basidiomicetos, popularmente conhecidos como cogumelo ostra abrangem cerca de 40 espécies, ocupando o segundo lugar na produção no Brasil (ANCP, 2019). Diversas espécies que são cultivadas comercialmente, como *Pleurotus ostreatus*, *Pleurotus sajor-caju*, *Pleurotus eryngii*, *Pleurotus pulmonarius*, *Pleurotus djamor* e *Pleurotus citrinopileatus* (BELLETTINI et al., 2019).

Devido à sua maior robustez e facilidade de cultivo, os cogumelos *Pleurotus* têm um enorme potencial de crescimento no Brasil, dispondo de uma estrutura rica em nutrientes, altas quantidades de proteínas, carboidratos, vitaminas, minerais e baixo teor de gordura (C. SALES-CAMPOS et al., 2011; WANG et al., 2015).

Como o gênero *Pleurotus* possui uma enzima complexa composta por celulases, hemicelulases, legninases, peroxidases, Lacases e proteases, entre outras enzimas, ela pode ser cultivada artificialmente e é tipicamente encontrada em florestas tropicais e subtropicais em todo o mundo. Também é capaz de degradar uma ampla gama de substratos que contêm celulose, hemicelulose e lignina (FERNANDES et al., 2014).

3.5.3 Substrato residual da produção de cogumelos

O substrato residual da produção de cogumelos (SRC) é definido como resíduo de compostagem após a fase de frutificação e retirada do cogumelo. Estima-se que 1 kg da produção de cogumelo gera 5 kg de biomassa de substrato que serão descartados por não apresentarem destino rentável aos produtores (FINNEY et al., 2009). O substrato é composto por uma combinação de resíduos agrícolas, micélio e enzimas lignolíticas extracelulares expelidas pelos fungos ao longo de seu crescimento

Geralmente, o substrato é composto por resíduos agrícolas como serragem, palha, bagaço de cana, sendo complementados com aditivos químicos (KAMTHAN; TIWARI, 2017). Fatores nutricionais e ambientais afetam pontualmente na qualidade e intensidade de frutificação dos cogumelos. Os fatores nutricionais caracterizam-se como procedimentos de compostagem, métodos de cultivo e fatores ambientais, resíduo de idade do substrato, tipo de fungo e materiais do substrato afetam os aspectos físicos, químicos e biológicos do SRC. O substrato tem uma alta densidade aparente e normalmente contém 60% de água e 40% de materiais secos. Esse substrato tem uma grande proporção de materiais orgânicos e apenas uma pequena proporção de nutrientes (SCHALLEMBERGER, 2023).

3.5.4 Tratamento de efluentes têxteis utilizando fungos degradadores de lignina

A aplicação de fungos decompositores de lignina como uma estratégia de tratamento para efluentes têxteis emerge como uma abordagem sustentável e de longa duração destinada a mitigar os impactos adversos sobre o ambiente decorrentes das operações da indústria têxtil. Devido à inclusão de corantes e outros compostos orgânicos, os efluentes têxteis apresentam alta demanda química de oxigênio (DQO) e forte coloridas. Novas abordagens vêm sendo investigadas para tratar e reparar eficientemente efluentes têxteis, utilizando a capacidade enzimática desses fungos (KAMIDA, 2005; PEREIRA, 2010; DULLIUS, 2004).

A ecologia dos fungos degradadores da lignina é um dos seus principais benefícios no tratamento de efluentes têxteis. Estes fungos atuam de forma natural e sustentável, em contraste com os procedimentos de tratamento convencionais, que frequentemente dependem de produtos químicos agressivos e processos que consomem muita energia. Eles produzem lignina peroxidase e manganês peroxidase, duas enzimas que convertem contaminantes em formas menos perigosas. Isto constitui uma solução têxtil econômica e sustentável, reduzindo a carga química no efluente e minimizando a produção de subprodutos perigosos (BURATINI, 2008; JACQUES, 2010; SOARES et al., 2011)

Além disso, os fungos que decompõem a lignina podem auxiliar na extração de materiais benéficos dos efluentes têxteis. Esses fungos podem converter poluentes orgânicos em biomassa por meio de um processo conhecido como biorremediação, que pode então ser usado para uma variedade de coisas, como a geração de bioenergia ou como fonte de produtos úteis de base biológica (NASCIMENTO et al., 2016). Este método circular, que está em linha com a crescente ênfase global nos conceitos de economia circular, não só elimina as águas residuais têxteis, mas também incentiva a sustentabilidade dos recursos. A utilização de fungos produtores de lignina no tratamento de efluentes têxteis mostra-se muito promissora na abordagem das questões ambientais ligadas à indústria têxtil, oferecendo uma solução a longo prazo, eficiente em termos de recursos e amiga do ambiente para reduzir o seu impacto nos ecossistemas e qualidade da água (BALDANTONI et al., 2017).

3.5.5 Adsorção de corantes em efluentes têxteis utilizando serragem

Devido a sua eficiência e características sustentáveis, a adsorção de cores de efluentes têxteis a partir de serragem tem despertado muito interesse nas áreas de engenharia ambiental e tratamento de águas residuais (AMORIM, 2019). Os grupos funcionais hidroxila e carboxila na serragem, um material de biomassa lignocelulósica, criam uma estrutura porosa e fibrosa

que proporciona uma grande variedade de locais de adsorção para os corantes orgânicos que estão frequentemente presentes nas águas residuais têxteis. Interações eletrostáticas, forças de *Van der Waals* e ligações de hidrogênio entre as moléculas do corante e os grupos funcionais na superfície da serragem são os principais mecanismos subjacentes a esse processo de adsorção (SILVA, 2015).

A eficiência da serragem como adsorvente de corante têxtil depende de uma série de variáveis, como pH, temperatura, tempo de contato e concentração inicial do corante. Para que a eficiência de adsorção seja maximizada, devem ser criadas condições ideais. Além disso, a seleção de modelos de isotermas de adsorção é crucial na definição do comportamento de adsorção, uma vez que permite o cálculo de variáveis cruciais como capacidade de adsorção e intensidade dos sítios de adsorção. Estudos também mostraram que a serragem pode ser modificada para aumentar sua capacidade de adsorção utilizando processos químicos e técnicas de ativação, aumentando potencialmente seu potencial de remoção de corantes em aplicações em escala industrial (ANTUNES et al, 2010).

A utilização da serragem como agente de adsorção para corantes não apenas oferece um método eficaz para o tratamento de efluentes têxteis, mas também está em consonância com os princípios da gestão sustentável de resíduos e da química verde. A serragem é uma solução desejável e financeiramente sólida para operações de limpeza devido ao seu baixo custo, fácil disponibilidade e capacidade de renovação (RODRIGUES et al., 2005; NASSAR; MAGDY, 1997). Além disso, a construção de adsorventes personalizados a partir de serragem, como carvão ativado, demonstra o potencial inventivo do recurso. A utilização de serragem para a adsorção de cor em efluentes têxteis é uma estratégia cientificamente sólida e ambientalmente responsável que tem o potencial de reduzir os efeitos ambientais negativos do setor têxtil, ao mesmo tempo em que apoia métodos sustentáveis de tratamento de águas residuais (VAUGHAN et al., 2001; GUARI, 2013).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo foi realizado nas dependências do Laboratório de Saneamento Ambiental e Qualidade da Água pertencentes ao Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO). Com o intuito de atender às metas delineadas, os experimentos foram estruturados em um total de seis etapas, conforme evidenciado na Figura 4.

Figura 4 - Fluxograma metodológico da pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

4.1 Cogumelo *Pleurotus ostreatus*

O cogumelo adicionado ao efluente têxtil nos ensaios foi resultante da produção de fungo *Pleurotus ostreatus* (Jacq. ex Fr.) P. Kumm, concedido pela empresa NatuFungi, localizada no município de Guarapuava-PR. Para cada ensaio, os cogumelos do tipo Shimeji foram triturados e mantidos em congelador convencional até o momento de sua utilização. Esse procedimento foi realizado com o intuito de aumentar a remoção do corante, uma vez que o congelamento causa a ruptura da parede celular do cogumelo, facilitando a extração das enzimas (CAMMAROTA; SILVA; COELHO, 2010; KAMEDA et al., 2006).

4.2 Substrato residual da produção de cogumelo

O substrato adicionado ao efluente têxtil nos ensaios foi um composto residual (CR) da produção de fungos *Pleurotus ostreatus*, cedido pela empresa Fungitake, localizada no município de Umuarama-PR, apresentando a mesma composição da empresa NatuFungi. O substrato era composto por serragem, casca de soja, gesso agrícola, carbonato de cálcio, água e os esporos do fungo *Pleurotus ostreatus*. A Figura 5 exibe a representação do cogumelo e seu substrato.

Ao final do cultivo, os blocos de serragem são descartados, porém sua estrutura fica completamente colonizada pelas hifas e micélios que contém enzimas lignolíticas capazes de realizar a quebra de estruturas complexas (STAMETS, 2005).

Figura 5 - Cogumelo e substrato do fungo *Pleurotus ostreatus*



Fonte: Elaborado pela autora (2022) Legenda: (A): Cogumelo; (B): Substrato

4.3 Efluente da indústria têxtil

Para elaboração do efluente têxtil sintético, o experimento seguiu o procedimento disposto por Spagni et al. (2010), replicando o efluente têxtil real após a etapa do tratamento biológico. O efluente têxtil sintético utilizado é composto pelo corante azo reativo Drimaren Red CL-7B e substâncias químicas auxiliares assim como empregado na indústria têxtil, preparados em três faixas de pH 5, 7 e 9, com auxílio do pHmetro de bancada **Gehaka - PG1800**. Para obtenção das concentrações indicadas na Tabela 3 foram pesados os reagentes específicos em balança analítica e realizada a diluição em água destilada. A composição e a concentração do efluente são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição do efluente têxtil sintético

Produto Químico	Concentração (g L ⁻¹)
Corante Drimaren Red CL-7B	0,04
Cloreto de amônio	0,23
Fosfato dipotássico	0,009
Fosfato monopotássico	0,017
Cloreto de ferro (III)	0,00125
Acetato de sódio	1,4
Cloreto de sódio	0,126
Bicarbonato de sódio	0,668

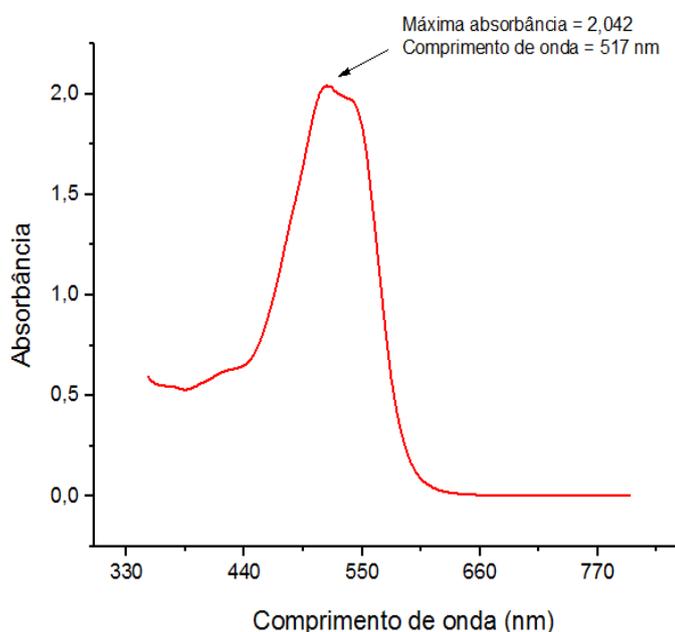
Fonte: Adaptado do SPAGNI et al. (2010)

O azo corante utilizado foi cedido por uma empresa do ramo têxtil de Brusque-SC. Entretanto, não há citação sobre este azo corante na literatura científica da área.

4.4 Varredura espectral do efluente bruto

A espectrofotometria é um método que utiliza uma fonte de luz para obter informações de concentração de uma determinada substância química. Para identificar a absorbância e comprimento de onda do efluente bruto composto pelo corante reativo Drimaren Red CL-7B e água destilada, realizou-se a espectrofotometria de varredura entre os comprimentos de onda de $\lambda = 190$ a 1100 nm (luz visível) em um espectrofotômetro de absorção UV/Vis HACH 6000. O comprimento de onda e absorbância correspondente ao corante Drimaren Red CL-7B foi de 2,042 e 517 nm, respectivamente conforme a Figura 6.

Figura 6 - Máxima absorbância para o efluente bruto



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

4.5 Procedimento experimental

O experimento foi realizado em escala de bancada laboratorial, empregando-se béqueres de vidro contendo 400 ml de efluente, nos quais foram adicionados os cogumelos *in natura* previamente triturados e congelados em contato com o efluente têxtil sintético com concentração de 40 mg/L, sob agitação constante por meio de um agitador magnético (1500 rpm) durante 6 horas. O procedimento descrito foi replicado utilizando o substrato residual proveniente da produção do cogumelo.

No decorrer dos experimentos, amostras de 10 ml foram retiradas a cada hora para descrição da cinética de remoção do corante utilizado. Em seguida, as amostras foram centrifugadas a 3900 rpm durante 30 minutos e filtradas em papel de filtro qualitativo de

gramatura de 80 g/m². Ao longo dos ensaios, diferentes condições operacionais foram testadas, as quais são apresentadas na Tabela 4:

Tabela 4 - Níveis dos fatores utilizados no planejamento fatorial dos ensaios de descoloração do efluente têxtil com o cogumelo.

Variáveis	Nível (-)	Nível (0)	Nível (+)
pH	5	7	9
Concentração (g L ⁻¹)	50	100	150

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Para determinar a eficiência de remoção do corante, empregou-se o cálculo de porcentagem de descoloração conforme a Eq. 1:

$$R = \frac{(C_i - C_f)}{C_i} * 100 \quad (1)$$

Onde:

R, Remoção do corante (%);

C_i, Concentração inicial do efluente (mg/L);

C_f, Concentração final do efluente (mg/L);

4.5.1 Planejamento fatorial para otimização da remoção de corante

O planejamento fatorial é uma ferramenta estatística em que sua principal função é avaliar o efeito de variáveis simultaneamente e selecionar as variáveis pertinentes de um experimento (VICENTINI et al., 2011). O planejamento fatorial tem como objetivo avaliar o efeito de dois ou mais fatores simultaneamente, reduzindo-se a quantidade de ensaios sem prejudicar a confiabilidade do experimento (PERALTA-ZAMORA et al., 2005). Na Tabela 5 são apresentados os ensaios que foram realizados conforme o planejamento fatorial 3² com vistas a avaliar o efeito dos fatores pH e concentração em relação a remoção do corante utilizando o cogumelo e o substrato.

Tabela 5 - Planejamento fatorial para otimização da remoção de corante

Ensaio	X1	pH	X2	Concentração (g L ⁻¹)
1	-1	5	-1	50
2	-1	5	0	100
3	-1	5	+1	150
4	0	7	-1	50
5	0	7	0	100
6	0	7	+1	150
7	+1	9	-1	50
8	+1	9	0	100
9	+1	9	+1	150

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.. Legenda: X1 e X2: nível dos fatores.

Para realizar o planejamento experimental, bem como as análises estatísticas, foram utilizados os *softwares* Statistica e RStudio. Os efeitos e interações entre as variáveis foram avaliados pela Análise de Covariância (ANCOVA), permitindo determinar possíveis observações despercebidas e redução do erro experimental.

4.5.2 Ensaio complementares realizados para avaliação dos mecanismos de remoção do corante

Com base nos resultados alcançados por meio dos ensaios conduzidos no item 4.5, foi possível determinar a condição operacional otimizada do procedimento destinado à remoção de corante, levando em consideração as variáveis relacionadas à concentração e pH, conforme Tabela 6.

Tabela 6 - Condição operacional otimizada

Variáveis	Cogumelo	Substrato
Concentração (g L ⁻¹)	50	150
pH	5	5

Fonte: Elaborado pela autora, 2022

Posteriormente, foram empreendidos experimentos complementares, visando à avaliação das possíveis vias de remoção do corante no efluente têxtil, abarcando os processos de oxidação química, adsorção no substrato, adsorção na estrutura do fungo e degradação enzimática. Nesse contexto, mediante a comparação de distintas configurações operacionais, tornou-se possível estimar a contribuição de cada um desses processos para o processo de remoção do corante em questão. Com o propósito de atingir esse objetivo, a configuração operacional otimizada foi reproduzida considerando diferentes condições específicas:

- **Condição I:** O sistema foi operado mantendo inalteradas as condições operacionais correspondentes à configuração otimizada. Entretanto, procedeu-se à coleta de amostras em intervalos de 30 minutos, com a finalidade de avaliar a variação da remoção do corante ao longo do tempo.
- **Condição II:** Não foi empregado nenhum substrato adicional, restringindo-se, assim, à inclusão exclusiva da amostra de efluente têxtil sintético no sistema. Consequentemente, excluiu-se a possibilidade da manifestação dos processos de remoção de corante por adsorção e degradação enzimática.

- **Condição III:** Aplicou-se sulfito de sódio (Na_2SO_3) a uma concentração de 160 mg L^{-1} e cloreto de cobalto (CoCl_2) a uma concentração de 2 mg L^{-1} como catalisadores, com o intuito de reduzir a concentração de oxigênio dissolvido no sistema para um valor aproximadamente igual a $0,00 \text{ mg L}^{-1}$, conforme preconizado por Puskeiler e Weuster-Botz (2005). Adicionalmente, durante todo o experimento, um fluxo contínuo de nitrogênio gasoso (N_2) foi introduzido na amostra, com o propósito de manter a concentração de oxigênio dissolvido próxima a $0,0 \text{ mg/L}$ durante toda a duração do experimento. Essa abordagem metodológica foi selecionada, levando em consideração a dependência do processo de degradação enzimática da disponibilidade de oxigênio, conforme observado por Aksu et al. (2007) e Kaushik e Malik (2009). Dessa maneira, foi possível avaliar a remoção de corante em condições de ausência de oxigênio e sua subsequente comparação com os resultados obtidos em outras condições experimentais.

- **Condição IV:** Conduzida com parâmetros operacionais semelhantes aos da configuração otimizada, porém, adotou-se uma aeração constante da amostra ao longo de todo o período de operação, utilizando uma pedra porosa associada a um compressor. Tal configuração foi testada visando avaliar o impacto da concentração de oxigênio dissolvido na atividade enzimática dos fungos.

- **Condição V:** O efluente foi substituído por água destilada, permitindo, dessa maneira, investigar a eventual liberação de pigmentação por parte do composto residual quando este interage com o efluente, o que poderia ser identificado erroneamente como corante por meio da metodologia de quantificação empregada.

- **Condição VI:** Foi empregada uma amostra de substrato não colonizado por fungos, eliminando, portanto, a possibilidade de ocorrência dos processos de remoção por degradação enzimática e adsorção na estrutura dos fungos.

4.6 Caracterização da Lacase

As enzimas contidas tanto no cogumelo bem como no substrato (SRC) foram extraídas utilizando um tampão acetato de sódio com pH de 0,1 M (valor ajustado a 5) e uma concentração de 150 g L^{-1} , mantidos sob agitação constante a 100 rpm em um agitador magnético. Este procedimento foi executado ao longo de um período de interação de 1 hora, mantido à temperatura ambiente para assegurar a eficiência da extração (SCHALLEMBERGER, 2021).

Em seguida, a solução resultante foi submetida a uma centrifugação a uma velocidade de 4000 rpm, durante um período de 5 minutos, a fim de separar as fases. O sobrenadante obtido foi então empregado nas investigações subsequentes. É relevante observar que todas as análises subsequentes relacionadas à caracterização da enzima Lacase foram conduzidas em duplicata.

4.6.1 Atividade Enzimática

A atividade enzimática foi quantificada em Unidades Internacionais (U), definindo-se uma unidade de atividade enzimática como a quantidade mínima de enzima requerida para catalisar a oxidação de 1 μmol de substrato por minuto, conforme estabelecido por Buswell e colaboradores (1996). Para a avaliação da atividade de cada enzima em questão, a Equação 2 foi empregada com sucesso.

$$\frac{U}{L} = \frac{\Delta\text{abs} * V_t * 10^6}{\epsilon * d * V_a * t} \quad (2)$$

Onde:

Δabs : diferença entre absorvância final e inicial;

V_t : volume total da reação (mL);

ϵ : coeficiente de extinção molar (36000 $\text{L M}^{-1}\text{cm}^{-1}$ para Lacase; 11590 $\text{L M}^{-1}\text{cm}^{-1}$ para Manganês peroxidase; 9300 $\text{L M}^{-1}\text{cm}^{-1}$ para Lignina peroxidase);

d : comprimento do passo (cm);

V_a : volume de amostra (mL);

t : tempo de reação (min).

A atividade da enzima Lacase foi quantificada de acordo com um método colorimétrico, que se baseou na oxidação do substrato denominado ácido 2,2'-azino-bis-(3-etilbenzo-tiazol-6-sulfônico) (ABTS). A reação foi montada com precisão, consistindo em 4 mL de solução de ABTS (com concentração de 1,8 mM), 0,5 mL de tampão de acetato de sódio (0,1 M; pH 5) e 0,5 mL da amostra em estudo. Essa mistura foi mantida a uma temperatura constante de 40°C por um período de 5 minutos em um banho de água cuidadosamente controlado. Em seguida, a absorvância resultante foi medida usando um espectrofotômetro, com leitura a um comprimento de onda de 420 nm, conforme descrito por Bourbonnais e Paice (1990).

Para fins de controle experimental, foram preparadas duas amostras de referência: uma delas substituindo a amostra pela solução de tampão (com 1 mL de tampão e 4 mL de ABTS), e a outra substituindo o ABTS pelo tampão (com 0,5 mL de amostra e 4,5 mL de tampão). Essas amostras controle serviram como base para a quantificação da atividade enzimática, permitindo a determinação precisa dos efeitos causados pela presença da amostra no processo de oxidação do ABTS.

A determinação da atividade da enzima MnP (manganês peroxidase) baseou-se na formação de um complexo denominado Mn (III)–malonato. O procedimento experimental envolveu a composição de uma mistura reacional contendo 1 mL de solução de MnSO_4 (4 mM), 0,5 mL de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) com concentração de 0,4 mM, 1 mL de tampão malonato (20 mM; pH 5) e 1 mL da amostra sob investigação. A temperatura da reação foi mantida a 30°C por um período de 5 minutos, utilizando um banho de água com controle preciso da temperatura. Posteriormente, a absorbância resultante foi medida por meio de espectrofotometria a 270 nm, seguindo o método estabelecido por Wariishi e Gold (1992).

Com o propósito de realizar controles experimentais, duas amostras de referência foram preparadas: uma delas substituindo a amostra pelo tampão de malonato de sódio (composta por 1,1 mL de tampão de malonato de sódio, 1 mL de MnSO_4 e 0,5 mL de H_2O_2), enquanto a outra substituiu o MnSO_4 pelo tampão (composta por 2 mL de tampão, 0,1 mL de amostra e 0,5 mL de H_2O_2). A análise dessas amostras de controle foi essencial para estabelecer uma base de referência e permitir a quantificação precisa da atividade enzimática, destacando os efeitos causados pela presença da amostra no processo de formação do complexo Mn (III)–malonato.

A determinação da atividade da enzima LiP (lignina peroxidase) se baseou na capacidade dessa enzima de oxidar o álcool veratrílico, transformando-o em veratraldeído. O procedimento experimental envolveu a composição de uma mistura reacional precisa, contendo 0,5 mL de álcool veratrílico com concentração de 10 mM, 0,5 mL de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) com concentração de 0,4 mM, 1 mL de tampão tartarato de sódio (100 mM; pH 3) e 0,5 mL da amostra de interesse. A reação foi mantida a uma temperatura constante de 30°C por um período de 5 minutos, usando um banho de água com controle rigoroso da temperatura. Em seguida, a absorbância resultante foi quantificada por meio de espectrofotometria, com leitura do comprimento de onda de 310 nm, conforme descrito por Tien e Kirk (1984, 1988).

Para efeitos de controle experimental, duas amostras de controle foram cuidadosamente preparadas: uma delas substituindo a amostra pela solução de tampão (composta por 1,5 mL de tampão, 0,5 mL de álcool veratrílico e 0,5 mL de H_2O_2), enquanto a outra substituiu o álcool veratrílico pelo tampão (composta por 1,5 mL de tampão, 0,5 mL de amostra e 0,5 mL de H_2O_2). Essas amostras de controle desempenharam um papel fundamental ao estabelecer uma linha de base para a quantificação precisa da atividade enzimática, permitindo uma análise minuciosa dos efeitos causados pela presença da amostra no processo de oxidação do álcool veratrílico.

4.6.1 Efeito do pH na atividade da Lacase

Para a determinação do pH ótimo da enzima foi realizado o mesmo protocolo utilizado no ensaio da atividade da Lacase com o substrato ABTS, conforme descrito no item 3.7.2,

apenas empregando diferentes soluções tampões. Os valores de pH avaliados foram 2, 4, 6, 8 e 10, utilizando tampão McIlvaine (ácido cítrico 0,1 M e fosfato dissódico 0,2 M) para os pH 2 a 8 e tampão borato (PanReac AppliChen: 3,092 g de ácido bórico, 3,728 g de cloreto de potássio e 2,34 ml de hidróxido de sódio 50%) para pH 10.

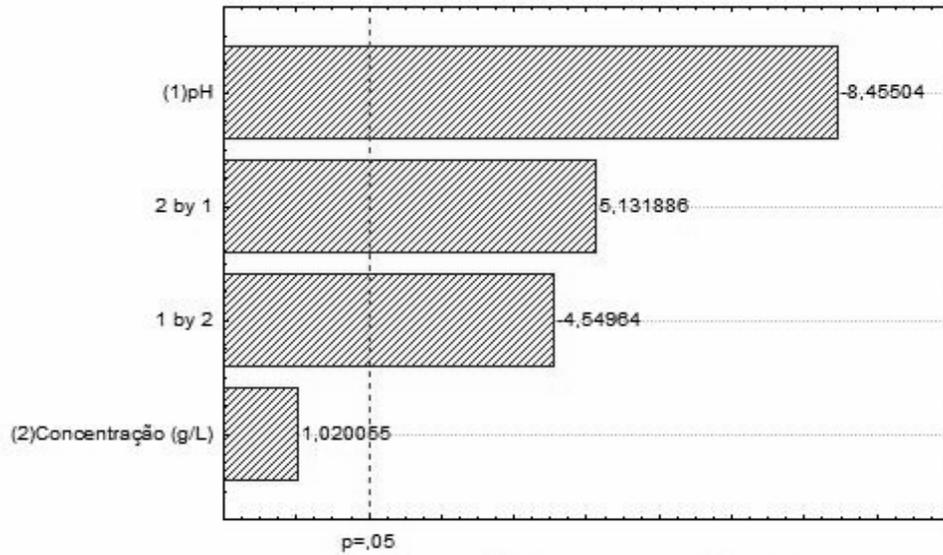
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados obtidos no decorrer deste estudo, que tem como objetivo principal determinar a melhor condição operacional para remoção do corante do efluente têxtil e avaliar suas possíveis rotas de remoção. O estudo foi conduzido a partir de uma análise comparativa empregando duas abordagens distintas, a saber, a utilização do fungo comestível *Pleurotus ostreatus* e a aplicação do resíduo derivado da produção do mesmo fungo, considerando os parâmetros pH, concentração de substrato, variabilidade das enzimas e potencial de adsorção apresentadas por cada conformação do referido microrganismo, visando avaliar e confrontar suas respectivas eficiências no processo de descoloração.

5.1 Estudo do efeito do cogumelo *Pleurotus ostreatus*

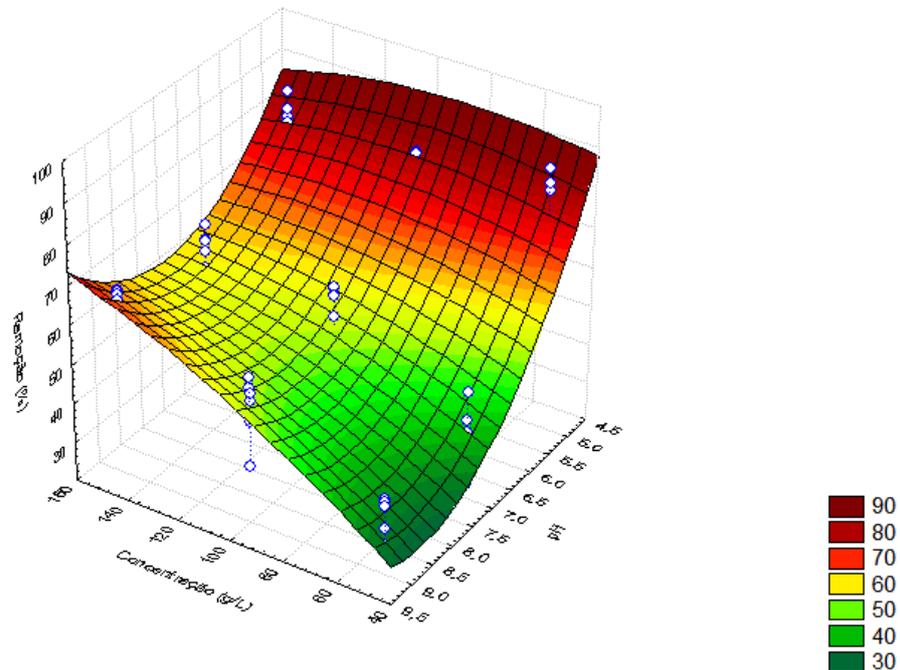
Com o efeito de interação entre as variáveis preditoras é possível determinar as melhores condições e possíveis rotas para o tratamento do efluente empregado, utilizando o cogumelo *Pleurotus ostreatus in natura*, conforme apresentado nas Figuras 7 e 8. A interação e efeito das variáveis preditoras são apresentadas na Figura 7.

Figura 7 - Diagrama de Pareto dos efeitos das variáveis pH e concentração e de suas interações.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Figura 8 - Gráfico de superfície de resposta elaborado em função da remoção de corante



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Observa-se que para o fator concentração as condições experimentais que indicaram as melhores eficiências de remoção foram em 50 e 150 g L⁻¹. A taxa de remoção de corante obtida nos níveis inferior e superior foram superiores a 80%. Porém, para o fator pH as melhores remoções foram obtidas apenas para o nível inferior, ou seja, no pH 5.

Análogo à Figura 8, o diagrama aponta efeito significativo do fator pH, assim como de suas interações com a concentração. Com a acidificação do meio, maiores são os valores de remoção expressas pela variável dependente. Devido às suas atividades simbióticas, os fungos basidiomicetos são capazes de sobreviver em condições críticas de *habitat*. Sendo assim, os fungos desfrutam de qualquer tipo de substrato que apresente fontes de carbono, armazenando energia para seu crescimento biológico (AZEVEDO, 1997).

De acordo com Ferreira et al. (2017) dentre os requisitos que afetam o crescimento micelial, a disponibilidade de íons metálicos corrobora para seu desenvolvimento, sendo determinado pelo fator pH. Os valores de pH dentro da faixa ácida tanto indicam aumento no crescimento dos fungos como de suas atividades enzimáticas (ALHUIJAILY et al., 2020). Dessa forma, a aplicação de cogumelos sobre o efluente em pH 5 pode favorecer a remoção de corantes, devido à ampliação da atividade enzimática.

De acordo com pesquisas sobre o crescimento micelial da espécie *Pleurotus ostreatus* conduzidas por Silva et al. (2021), conclui-se que um pH mais ácido é mais favorável para o desenvolvimento do micélio. Khan e Husain (2007) conduziram um estudo de descoloração de corantes reativos utilizando enzimas, atingindo uma remoção máxima em pH 3,0 e 4,0. Cruz Filho et al. (2016) realizaram a otimização do processo de remoção do corante preto de remazol B utilizando a combinação das espécies *Aspergillus Níger* e *Pennisetum purpureum*, atingindo 96,80% de remoção em pH 2,0. Upadhyay e Przystas (2022) realizaram a descoloração de duas classes de corantes com os fungos *Pleurotus ostreatus* e obtiveram remoção de 94,31% e 73,13% no pH de 5,6.

Além disso, quando o adsorvente entra em contato com o adsorvato no pH 5, o meio ácido modifica a carga superficial do substrato, tornando-a positiva, corroborando para a adsorção de ânions. Tendo em vista que corantes reativos, quando diluídos, formam ânions, a adsorção é favorecida, diminuindo a competição por íons. A taxa de adsorção de íons negativos aumenta conforme a redução do pH, devido a redução da força de repulsão eletrostática (TAGLIAFERRO et al., 2011; MARIN et al., 2015). Cabe ressaltar, ainda, que a trituração do cogumelo aumenta sua área de contato com o efluente e, conseqüentemente, a eficiência de remoção de corante, uma vez que a área superficial é diretamente proporcional à adsorção (SCHIMMEL, 2008).

Nos estudos referentes ao processo de adsorção, é importante destacar a significativa relevância do fator pH. Isso se deve ao fato de que a variação do pH exerce uma influência marcante no equilíbrio iônico do adsorvente, impactando diretamente nas suas interações (PEDROSO; ARAÚJO, 2016; AHMED et al., 2016). Gupta et al. (2013) conduziram testes de

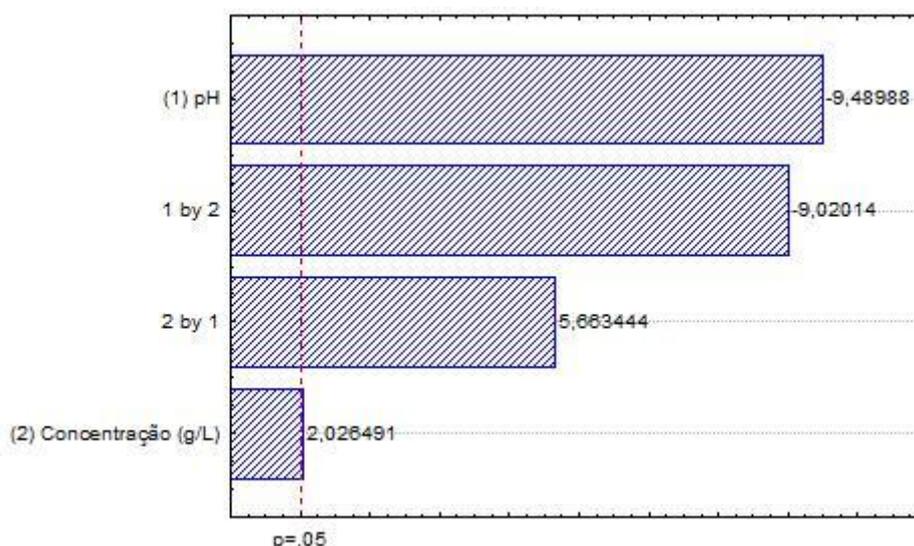
descoloração de efluentes têxteis e alcançaram a máxima adsorção a um pH de 3,0. Já no estudo realizado por Kyzas et al. (2012), foi observado que a eficiência da adsorção de corantes reativos aumenta significativamente à medida que o pH é reduzido, atingindo um nível de eficiência de 51% em pH 2,0.

Portanto, é evidente que o pH desempenhou um papel de extrema importância nos ensaios, juntamente com a concentração, e os resultados obtidos demonstraram significância estatística. Isto é corroborado pela análise dos gráficos e pelo coeficiente de determinação (R^2) de 0,83 verificado pelo método de regressão linear, o qual explica 83% da variação na variável dependente. Em outras palavras, a variação na variável dependente é substancialmente explicada pelas variáveis independentes no modelo de regressão empregado. O valor de R^2 aponta para uma correlação significativa e um ajuste satisfatório entre as observações feitas e as expectativas teóricas, o que confirma a robustez do modelo aplicado. Isso também reforça a relevância do pH e da concentração como fatores influentes nos resultados obtidos.

5.2 Estudo do efeito do Substrato Residual

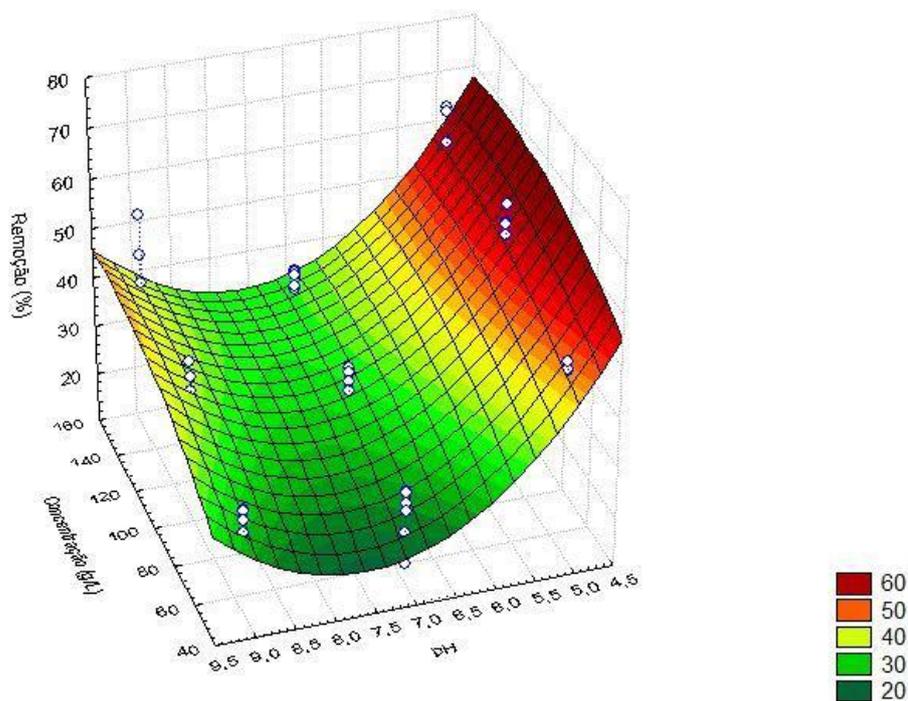
As Figuras 9 e 10 apresentam o efeito das variáveis preditoras e suas interações, dessa forma, é possível determinar as rotas viáveis para o tratamento do efluente têxtil sintético empregando o substrato residual da produção do cogumelo *Pleurotus ostreatus*.

Figura 9 - Diagrama de Pareto dos efeitos das variáveis pH e concentração e de suas interações



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Figura 10 - Gráfico de superfície de resposta elaborado em função da remoção de corante



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Observa-se que, para o fator concentração, as condições experimentais indicaram que as melhores remoções ocorreram na concentração de 150 g L^{-1} . A taxa de remoção de corante obtida para esta concentração foi próxima de 70%. De forma similar, para o fator pH as melhores remoções foram obtidas apenas para um único nível, correspondente ao pH 5.

O efeito de mudança do pH do meio inicial na remoção do corante têxtil e a quantidade de substrato aplicado foram estudadas. Além disso, outros fatores envolvidos no processo de remoção, como tempo de agitação e concentração do efluente mantiveram-se estáveis. Com base na figura 9, as maiores taxas de remoção restringem-se à faixa ácida de pH, a acidificação do meio proporciona maiores resultados de descoloração devido a sua relação com a estrutura do fungo e com o processo de adsorção.

A Figura 9 ilustra a interação e o efeito das variáveis preditoras. Além disso, o diagrama de Pareto sustenta as proposições obtidas pela figura 10 e hierarquiza o efeito das variáveis preditoras sob o resultado final, enfatizando o impacto do pH e de sua interação com a concentração.

Análogo ao que é observado com cogumelos *in natura*, o substrato demonstrou taxas de remoção mais elevadas em ambiente ácido. O fator pH afeta intrinsecamente o crescimento micelial e atividade enzimática, que são favorecidos pela faixa ácida de pH (ALHUIJAILY et al., 2020). Pesquisas relacionadas à caracterização da lacase, conforme conduzidas por Fithri et

al. (2020), destacam uma atividade enzimática mais expressiva em ambiente de pH ácido. Esses resultados corroboram com os encontrados por Zheng et al. (2017) e Kumar et al. (2016), os quais também observaram uma atividade elevada em condições ácidas, ao passo que registraram uma diminuição da atividade em faixas de pH mais alcalinas.

Tal como os fungos, o processo de adsorção também apresenta algumas particularidades. Tal processo é influenciado por fatores como propriedade do adsorvente e do adsorvato, pH, área superficial, temperatura e origem do solvente. As características isotermas da adsorção determinam e quantificam o grau de adsorção (DO NASCIMENTO et al., 2014).

A relação entre quantidade adsorvida e pH depende das características do composto residual utilizado e da disponibilidade de íons metálicos (MSAKY; CALVET, 1990). Os ensaios conduzidos com o substrato, apresentou um desempenho similar ao do cogumelo no processo de adsorção. É fundamental ressaltar que as variações no pH revelam as propriedades intrínsecas do substrato em questão. Em outras palavras, o substrato exibe maior eficiência na remoção de substâncias em um ambiente ácido devido às suas características estruturais, sua composição e a forma como é constituído.

A variável concentração também influencia a taxa de remoção de corante têxtil. Os valores de remoção alcançados nos três níveis de concentração no pH 5 são mais satisfatórios em relação aos resultados obtidos na faixa neutra e alcalina, porém, com o aumento da quantidade de substrato em contato com o efluente, maiores são os valores de descoloração. Esses resultados são atribuídos ao aumento da área superficial, que apresenta relação diretamente proporcional com a adsorção (SEKAR et al., 2014).

Pesquisas conduzidas por Schalleberger et al. (2023) corroboram os resultados obtidos neste estudo, uma vez que, com o aumento da concentração de substrato, a taxa de adsorção aumentou de 43,60% para 62,86%. Nos estudos conduzidos por Tian et al. (2011) constatou-se o aumento de 69,99% para 100% de adsorção. A eficiência no processo de adsorção é diretamente proporcional à quantidade de sítios ativos disponíveis (HAMEED, 2009).

Dessa forma, é evidente que o pH desempenhou um papel de extrema importância nos ensaios, juntamente com a concentração, e os resultados obtidos demonstraram significância estatística. Isto é corroborado pela análise dos gráficos e pelo coeficiente de determinação (R^2) de 0,85, o qual explica 85% da variação na variável dependente. Em outras palavras, o pH modela significativamente o comportamento da remoção de corante.

O valor de R^2 aponta para uma correlação significativa e um ajuste satisfatório entre as observações feitas e as expectativas teóricas, o que confirma a robustez do modelo aplicado.

Isso também reforça a relevância do pH e da concentração como fatores influentes nos resultados obtidos.

5.3 Resultados complementares referente à utilização do cogumelo *in natura*

Com o objetivo de entender melhor os processos que proporcionaram a remoção do corante, ensaios complementares foram realizados. Os resultados correspondentes a cada uma das condições avaliadas estão detalhados na Tabela 7.

Tabela 7 - Concentrações residuais de corante e eficiências de remoção obtidas a partir dos ensaios complementares

Condição	Descrição	Concentração residual de corante (g L ⁻¹)	Eficiência de remoção (%)
I	Condição otimizada	9,55	76,42
II	Efluente Bruto	27,11	33,06
III	Ausência de O ₂	12,04	70,28
IV	Com aeração	13,29	67,18
V	Água Destilada	1,18	-

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

De acordo com os resultados apresentados, constatou-se que as condições aplicadas na situação I permitiram a obtenção de resultados igualmente satisfatórios em relação aos ensaios de otimização, atingindo a remoção de 76,42% do corante. Já no Ensaio V, por sua vez, é possível observar que os cogumelos não apresentam liberação de cor significativa, o que permitiu constatar que este não se apresenta como um fator com influência expressiva nos processos.

Em relação aos ensaios III e IV, pode-se observar que as eficiências de remoção foram semelhantes, atingindo eficiências de 70,28 e 67,18%, respectivamente. Conforme apontado por Kaushik e Malik (2009), a presença e a disponibilidade de oxigênio são requisitos essenciais para que ocorra o processo de degradação enzimática. Entretanto, outros fatores físico-químicos e biológicos também podem impedir ou intensificar a performance da ação desses microrganismos. De acordo com Gaylarde et al. (2005), os principais fatores físicos que afetam a degradabilidade são *habitat*, temperatura e luz. De forma similar, fatores químicos, como a composição química do microrganismo, disponibilidade de oxigênio, pH e estrutura química do poluente, também podem influenciar a degradação.

Em função disto, supõe-se que, independentemente da presença ou ausência de oxigênio, a considerável eficiência de remoção observada pode ser atribuída primordialmente à capacidade de adsorção dos cogumelos. Todavia, a atividade enzimática configura-se como uma possibilidade que não pode ser descartada. Uma vez que, na condição otimizada I observou-se uma eficiência de remoção superior em relação à condição IV (ausência de O₂).

Em comparação entre as condições otimizada (I) e com aeração (III), entende-se que o processo de adsorção pode ter sido afetado negativamente, e não o processo enzimático. O ensaio que empregou aeração forçada pode ter prejudicado o processo de adsorção, resultante da turbulência da formação de bolhas de ar. Acredita-se que tal condição pode ter promovido a ocorrência do processo de dessorção física do corante, além de problemas no transporte de massa, dificultando o contato entre adsorbato e adsorvente, afetando negativamente o desempenho do tratamento (ABD EL-RAHIM et al., 2008). Conforme os pesquisadores Kołodyńska, Krukowska e Thomas (2017), os principais fatores que afetam o processo de dessorção são alteração do pH, concentração do adsorvente, agitação e tempo de contato. Ademais, Soares et al. (2004) propõem que a dessorção ocorre devido à saturação do adsorbato após um período específico de contato, apresentando consonância com os resultados observados no presente estudo.

Para o ensaio referente à condição II (empregando apenas efluente bruto a eficiência de remoção alcançada foi de 33,06 %. Tal comportamento não era esperado, uma vez que o cogumelo não foi adicionado, logo, não existia a possibilidade de remoção por meio dos processos de adsorção e degradação enzimática.

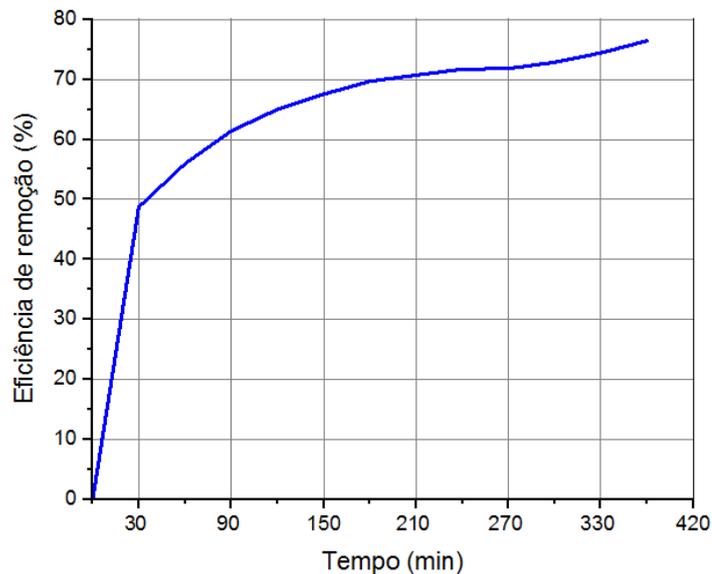
Um dos fatores que, teoricamente, poderia ter contribuído para a remoção de corante observada nesta condição é a ocorrência do processo oxidação química, principalmente via fotodegradação (GUARANTINI; ZANONI, 2000). Entretanto, no presente estudo, devido aos ensaios terem sido realizados em um ambiente fechado, com baixa incidência da luz solar, além da inexistência de um catalizador para o processo, não acredita-se que este mecanismo tenha contribuído de forma expressiva. Silva et al. (2010), em um estudo semelhante envolvendo a remoção de cor de efluentes têxteis com cogumelos *Agaricus bispora*, também avaliaram a possibilidade de ocorrência do processo de oxidação química do corante e constaram que este mecanismo é pouco representativo, alcançando menos de 1% de remoção.

Nesse contexto, tendo em vista a que o efluente têxtil sintético utilizado no estudo apresenta, dentre seus componentes, o cloreto férrico (substância química com propriedades coagulantes), acredita-se que a remoção observada pode ser atribuída, sobretudo, à precipitação do corante após reação com os íons de ferro liberados no meio (METCALF; EDDY, 2014).

Mcyotto et al. (2021) avaliou o efeito da estrutura do corante na eficiência de remoção de cor, utilizando diferentes coagulantes, e observou que os ensaios realizados com cloreto férrico alcançaram uma eficiência máxima de remoção de 96,9%.

Por fim, de acordo com a condição I especificada no item 4.5.2, foram realizadas coletas para quantificação da concentração de corante em intervalos de 30 minutos, ao longo de um período de 6 horas. Com base nessas medições, calculou-se a eficiência de remoção de corante ao longo do tempo para a condição otimizada. Os resultados são apresentados de forma gráfica na Figura 11.

Figura 7 - Eficiência da remoção de corantes (%) ao longo do tempo utilizando cogumelo



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Nota-se que a remoção do corante ao aplicar o cogumelo é um processo gradual. É fundamental destacar que os processos de adsorção e degradação enzimática ocorrem em diferentes velocidades. Assim, acredita-se que nas primeiras horas do experimento, a remoção acontece principalmente por adsorção, devido à sua rápida resposta. Posteriormente, a remoção continua a aumentar e, finalmente, se estabiliza, o que está relacionado à disponibilidade de sítios ativos no sistema. Com o passar do tempo, ocorre a diminuição desses sítios ativos, predominando uma adsorção mais lenta e possível predomínio da ação enzimática (BALAN; MONTEIRO, 2001; SCHALLEMBERGER, 2021).

5.4 Resultados complementares referente ao substrato

Com o objetivo de entender melhor os processos que levam a remoção do corante empregando o substrato utilizado para produção do fungo, foram conduzidos ensaios adicionais. Os resultados correspondentes a cada uma das condições avaliadas estão detalhados na Tabela 8.

Tabela 8 - Concentrações residuais de corante e eficiências de remoção obtidas a partir dos ensaios complementares

Condição	Descrição	Concentração residual de corante (g L ⁻¹)	Eficiência de remoção (%)
I	Condição otimizada	12,44	68,18
II	Efluente Bruto	29,6	32,03
III	Ausência de O ₂	17,34	58,58
IV	Com aeração	18,85	56,40
V	Água Destilada	9,72	-
VI	Substrato S/Fungo	21,08	47,95

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

De forma semelhante ao que se observou no ensaio empregando cogumelos, constatou-se que as condições aplicadas na situação I atingiram resultados igualmente satisfatórios em relação aos ensaios de otimização, atingindo a remoção de 68,18%. Nota-se que, na condição V, o substrato aplicado em água destilada também não demonstrou liberação de cor considerável, sugerindo, portanto, que esse elemento não desempenha um papel significativo nos processos em questão.

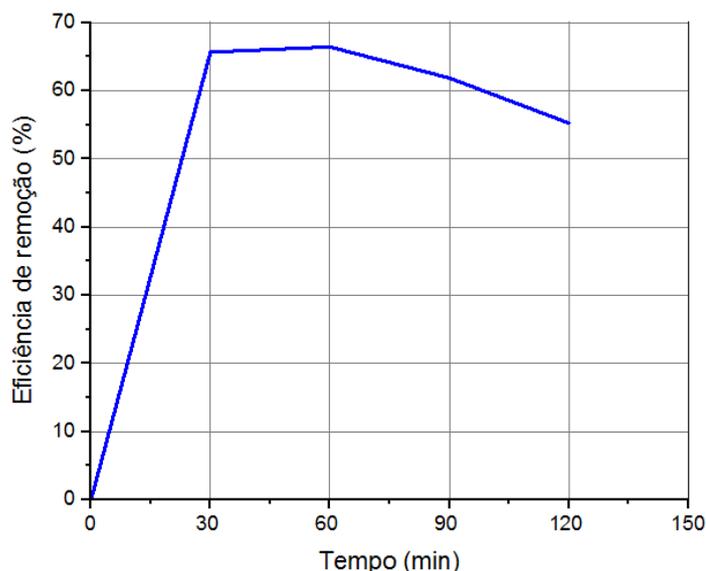
Ressalta-se que os resultados de eficiência obtidos nos ensaios III e IV (58,58%, 56,40%, respectivamente) apresentaram uma notável semelhança. Porém, em relação aos resultados obtidos na condição otimizada (I), ocorre um aumento de aproximadamente 10% na eficiência de remoção. Conforme evidenciado no item anterior, o aumento de interferência no sistema pode provocar o processo de dessorção, ocasionando a redução da eficiência de remoção (KOŁODYŃSKA; KRUKOWSKA; THOMAS, 2017; BALAN, MONTEIRO, 2001). Da mesma forma, acredita-se que a inibição da ação dos fungos provocou a discrepância dos resultados, visto que o oxigênio é ferramenta fundamental para a atividade enzimática (KAUSHIK; MALIK, 2009).

A pequena diferença em relação às condições III (com aeração) e IV (sem aeração) sugere a possível existência de efeitos inibitórios, advindos das características intrínsecas da estrutura química dos corantes e do sistema empregados. Em contrapartida, nos ensaios IV e VI observou-se eficiências de remoção distintas (56,40% e 47,95%, respectivamente). Considerando que em ambas as condições não seria viável a ocorrência do processo de degradação enzimática, uma vez que no ensaio IV a ausência de oxigênio e no ensaio VI o substrato não colonizado por fungos impedem a ação das enzimas, acredita-se que a estrutura e características do substrato podem ter sido fatores determinantes para o processo (KAUSHIK; MALIK, 2009).

Na condição IV a remoção do oxigênio foi forçada pela adição de sulfito de sódio e cloreto de cobalto, porém o bloco de substrato utilizado foi o mesmo da condição otimizada (I). No entanto, na condição VI, o substrato utilizado apresentava características distintas, uma vez que o mesmo era um substrato recente.

De acordo com a condição I especificada no item 4.5.2, foram conduzidas medições da concentração de corante em intervalos de 30 minutos ao longo de um período de 6 horas. Com base nessas medições, calculou-se a eficiência de remoção de corante ao longo do tempo para a condição otimizada. Os resultados são apresentados de forma gráfica na Figura 12.

Figura 8 - Eficiência da remoção de corantes (%) ao longo do tempo utilizando substrato



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Observa-se que a maior parte da remoção do corante ocorreu nos primeiros 60 minutos, correspondendo a aproximadamente 68 %, sendo que após esse período, a eficiência de descoloração tendeu a decrescer ao longo das seis horas seguintes, alcançando um valor aproximado de 55%.

A cinética de adsorção do substrato exibe uma remoção crescente, alcançando a máxima eficiência de remoção na primeira hora. Em seguida, ocorre o declínio da eficiência de remoção. A análise cinética é de grande relevância, pois ela evidencia como o tempo de contato afeta a quantidade de contaminante adsorvida pela biomassa (MÜLLER et al., 2019). Acredita-se que a redução da remoção foi promovida pela saturação dos sítios ativos do adsorvente. Assim, uma vez atingido o ponto de remoção máxima, verifica-se uma diminuição nos sítios ativos, resultando em uma estabilização da adsorção e o início do processo de repulsão entre as moléculas de corante adsorvidas e as moléculas livres e o de dessorção (SCHALLEMBERGER, 2021). Estudos realizados por Alhujaily et al. (2020) e Yan e Wang (2013), constataram maiores taxas de remoção nos primeiros 60 minutos, indo ao encontro dos resultados obtidos.

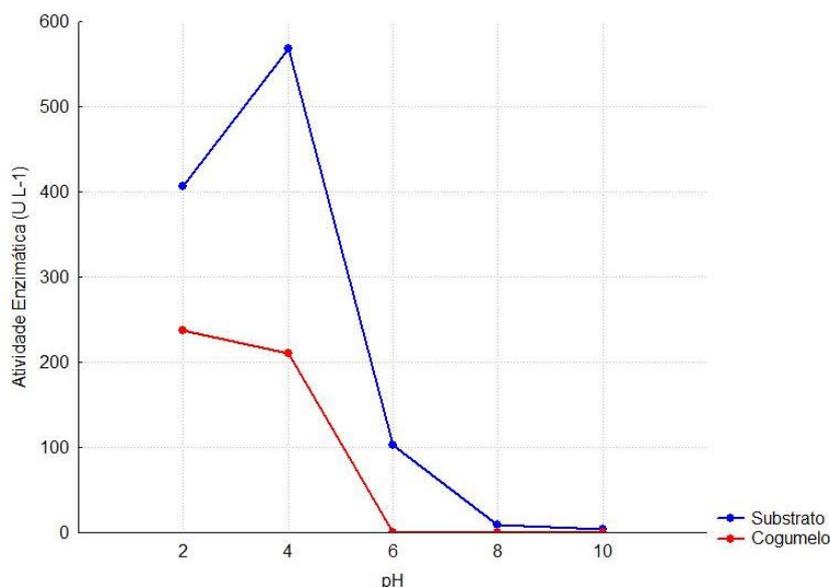
A adsorção é um processo de transferência de massa em que estuda a capacidade do adsorvato concentrar substâncias presentes em efluentes, realizando a separação de componentes. Esse processo é altamente eficaz em tratamento de água e efluentes (NASCIMENTO et al., 2014). A serragem de madeira é um substrato composto por matéria orgânica amplamente empregado em estudos sobre adsorção devido ao seu alto potencial de adsorção e baixo custo (MÜLLER et al., 2019).

Müller et al. (2019) avaliou a adsorção do corante azul de metileno utilizando duas espécies de madeira, e ambas demonstraram elevada eficiência, alcançando 47% na remoção do corante. Nos ensaios conduzidos por Shrestha (2021), a adsorção com serragem permitiu alcançar 98,4% de remoção do corante pelo processo de adsorção. A serragem de madeira, por natureza, exibe um potencial significativo de adsorção. Os elementos constituintes do substrato residual empregado no estudo sugerem que esses componentes podem ter ampliado consideravelmente a capacidade de adsorção.

5.5 Caracterização da Lacase

Com o intuito de detectar a influência da atividade enzimática originada do *Pleurotus ostreatus* nas condições empregando o cogumelo e o substrato de sua produção, a atividade enzimática foi analisada em uma faixa de pH de 2 a 10, empregando o ABTS como substrato de reação, conforme a Figura 13.

Figura 9 – Efeito do pH na atividade da Lacase



Fonte: Elaborado pela autora, 2023

Os resultados da atividade da Lacase demonstram que sua eficiência é maior em faixas de pH ácido (2 a 6), mas fica inativa em faixas de pH alcalino (8 a 10). Nota-se o decaimento da atividade da enzima ocorre nas duas configurações testadas. De acordo com Alhujaily et al., 2020, o fator pH afeta intrinsecamente o crescimento micelial e atividade enzimática, que são favorecidos pela faixa ácida de pH. Além disso, a atividade da Lacase pode ser alterada pela disponibilidade oxigênio ou pelas características da própria enzima (EL-BATAL et al., 2015).

Tendo em vista o potencial de adaptação dos fungos a condições extremas, o excesso de íons OH^- como o de H^+ pode interferir nas características da enzima, reduzindo sua ação. Esses efeitos divergentes são identificados nas curvas acima quando os valores pH são extremos (NELSON; COX, 2005). No entanto, no que diz respeito à curva de substrato, identificou-se que o pH ótimo para a máxima atividade da Lacase foi de 4,0, o que está em consonância com o pH ótimo encontrado nos ensaios de otimização, conforme representado na Figura 9. Para a curva relacionada ao cogumelo, o pH ideal foi de 2,0, demonstrando uma diminuição da atividade à medida que o pH aumenta. Com base em pesquisas conduzidas por Heinzkill et al. (1998) e Balsrian et al. (2006), o pH ideal para a atividade da Lacase está diretamente ligado ao substrato utilizado. No caso do ABTS, o pH ótimo situa-se na faixa entre 2,0 e 5,0. Estudos realizados por Fernandes (2023) revelaram que o ponto de máxima atividade enzimática da Lacase foi registrado em pH 5. Araújo et al. (2019) investigaram o efeito da variação do pH na atividade das Lacases e constataram que a máxima atividade enzimática observada foi em pH 4,5.

A divergência entre as curvas pode ser explicada pela estrutura dos substratos utilizados. Os cogumelos constituem a estrutura reprodutiva dos fungos, abrigando uma alta concentração de esporos. O composto residual é o ambiente de desenvolvimento deste fungo, caracterizado por uma abundante presença de hifas. Essas hifas fúngicas desempenham o papel de uma matriz que retém as enzimas extracelulares, resultando em uma concentração mais elevada de enzimas no composto residual (STAMETS, 2005). Além disso, o cultivo de fungos basidiomicetos em ambientes sólidos proporciona maiores taxas de atividade enzimática (ALEXANDRINO et al., 2007).

Na análise da atividade das enzimas ligninolíticas determinada através da leitura de absorvância nos comprimentos de onda de 420 nm para a Lacase, 270 nm para MnP e 310 nm para a LiP. Ao avaliar a atividade da Lacase por meio de sua reação com ABTS, foi possível determinar que o extrato bruto enzimático para o substrato e cogumelo apresentava uma atividade correspondente a 605,7 UL^{-1} e 159,1 UL^{-1} , respectivamente. As análises das enzimas MnP e LiP não revelaram atividade no extrato, o que pode ser atribuído à complexidade do processo de produção dessas enzimas, que requer condições específicas, tais como pH, temperatura e condições ambientais (HOFRICHTER, 2002; SILVA et al., 2004).

6 SÍNTESE DOS RESULTADOS

O emprego dos fungos basidiomicetos para o tratamento de efluentes integra-se como um instrumento para construção de um método de descoloração, uma vez que os fungos pertencentes a esse filo possuem características fundamentais para remoção de corantes têxteis. Os resultados obtidos quanto à aplicação do corpo frutífero do *Pleurotus ostreatus* revelam notável potencial na remoção de corante, alcançando alta eficiência por meio dos processos de adsorção e ação enzimática.

No entanto, ao contrário do substrato, o cogumelo demonstrou maior eficiência de remoção com a menor concentração testada. Com o aumento de massa de cogumelo, a remoção de cor manteve-se estável. Supõe-se que a liberação de algum composto pelo cogumelo, dificuldade de estabelecer contato durante o processo de agitação e formação de outros produtos podem ter influenciado sua ação.

Embora a remoção pelo cogumelo ocorra por meio do processo de adsorção, sua eficiência aumenta progressivamente ao longo do tempo. É importante notar que o processo de adsorção é tipicamente rápido e sua velocidade diminui à medida que os sítios ativos se reduzem. Portanto, a extensão da remoção pode ter sido influenciada pela atividade enzimática dos cogumelos, que, mesmo em concentrações mais baixas, pode ter exercido impacto nos resultados.

Os resultados de remoção obtidos foram atribuídos, principalmente, ao processo de adsorção. No entanto, tanto o processo de adsorção quanto o de degradação enzimática foram favorecidos em condições de pH ácido e com o aumento da concentração do substrato. Notavelmente, o substrato demonstrou taxas de remoção mais elevadas em um ambiente com pH 5. Da mesma forma, ao analisar o impacto do pH na atividade da Lacase, observou-se um padrão consistente, com maior atividade em pH ácido. A utilização do composto residual da

produção do cogumelo *Pleurotus ostreatus* para o tratamento de efluentes têxteis sintéticos apresenta elevado potencial em decorrência da ação simultânea das enzimas lignolíticas e pelo alto desempenho da adsorção na remoção de corantes têxteis.

7 CONCLUSÃO

Nesta pesquisa, investigou-se o potencial do fungo *Pleurotus ostreatus* e do composto residual de sua produção na remoção de corantes têxteis. Determinou-se a melhor condição operacional para a remoção do corante do efluente têxtil, considerando os parâmetros de pH e concentração de substrato utilizados, bem como as possíveis rotas de remoção. Buscou-se avaliar a atividade enzimática no cogumelo e no composto residual.

De acordo com os ensaios para otimização do processo, verificou-se que a condição operacional considerada ótima foi obtida com pH 5 tanto para o composto residual como para o cogumelo. Referente à concentração do cogumelo e do composto residual, a condição operacional ótima foi obtida com 150 g L⁻¹ e 50 g L⁻¹, apresentando eficiência de remoção de 86,55 % e 68,19%, respectivamente. Nos ensaios para determinar a atividade enzimática, a comparação realizada com o cogumelo e substrato elucidou a existência significativa da enzima Lacase e como seu desempenho pode ter influenciado o processo de remoção. Com base nos resultados obtidos, a variável pH tem papel fundamental nos resultados de remoção obtidos, bem como sua interação com a concentração. Esses resultados indicam que a utilização dessa abordagem pode ser eficaz na redução da poluição causada por corantes têxteis em efluentes.

A utilização do composto residual da produção do cogumelo *Pleurotus ostreatus* para o tratamento de efluentes têxteis sintéticos apresenta elevado potencial em decorrência da ação simultânea das enzimas lignolíticas e pela alta performance da adsorção na remoção de corantes têxteis. Este estudo integra-se como parte para confecção de uma metodologia eficaz para o tratamento de efluentes têxteis e uma alternativa de reaproveitamento do composto residual da produção de cogumelos comestíveis.

8 SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES

Em função das análises realizadas, resultados obtidos e limitações observadas, algumas recomendações são necessárias. Na análise das rotas de remoção, observou-se a necessidade de mais estudos acerca do composto residual, sendo necessário para próximos estudos avaliar:

- Somente faixas de pH ácido;
- Determinar toxicidade após o tratamento;
- Efeitos da agitação, aeração e ausência de oxigênio no substrato;
- Composição e idade do substrato tem sob sua capacidade de remoção no tratamento;
- Quantidade, manutenção e armazenamento do substrato para possível aplicação dentro da indústria.

9 REFERÊNCIA

ABIT. Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção. São Paulo: Abit, 2019.

ADHIKARI, Kushal et al. Water sustainability using pond-in-pond wastewater treatment system: case studies. *Journal Of Water Process Engineering*, [S.L.], v. 36, p. 101281, ago. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101281>.

AGUIAR, Catia Rosana Lange (org.). et al. *ENGENHARIA TÊXTIL: uma abordagem simplificada*. Florianópolis: Editora da UFSC. 311 p. ISBN: 9786558050513. 2022.

AHMED, K., REHMAN, F., PIRES, C.T.G.V.M.T., RAHIM, A., SANTOS, A. L., AIROLD, C. Aluminum doped mesoporous silica SBA-15 for the removal of remazol yellow dye from water. *Microporous and Mesoporous Materials*, 236, 167 – 175, 2016.

AKSU, Z. et al, 2007. Inhibitory effects of chromium (VI) and Remazol Black B on chromium (VI) and dyestuff removals by *Trametes versicolor*. *Enzyme and Microbial Technology*, v. 40, n. 5, p. 1167–1174.

ALEXANDRINO, A. M.; FARIA, H. G.; SOUZA, C. G. M.; PERALTA, R. M. Reutilization of Orange waste for production of lignocellulolytic enzymes by *Pleurotus ostreatus* Jack:Fr). *Cienc. Tecnol. Aliment*, vol 27, p. 364-368, 2007.

ALEXOPOULOS, C.J.; MIMS, C.W.; BLACKWELL, M. *Introductory mycology*. 4. ed. New York: John Iley & Sons, Inc., 1996. 870 p.

ALHUJAILY, A. et al. Adsorptive removal of anionic dyes from aqueous solutions using spent mushroom waste. *Applied Water Science*, v. 10, p. 138–184, 2020.

ALHUJAILY, A. et al. Highly efficient and sustainable spent mushroom waste adsorbent based on surfactant modification for the removal of toxic dyes. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, [s. l.], v. 15, p. 1-15, jul. 2018.

ALI, Hazrat. Biodegradation of synthetic dyes - A review. *Water, Air, and Soil Pollution*, [S. l.], v. 213, n. 1-4, p. 251-273, 2010. DOI: 10.1007/s11270-010-0382-4.

ALMEIDA, E. J. R.; CORSO, C. R. Comparative study of toxicity of azo dye Procion Red MX-5B following biosorption and biodegradation treatments with the fungi *Aspergillus niger* and *Aspergillus terreus*. *Chemosphere*, [s. l.], v. 112, p. 317-322, out. 2014.

AMORIM, M. C. C.; SILVA, P. T. de S. e.; BARBOSA, P. S.; MONTEFUSCO, N. E. Anaerobic biodegradation of Cassava wastewater under different temperature and inoculums. *Comunicata Scientae*, v. 10, n. 1, 2019.

ANASTASI, A.; SPINA, F.; ROMAGNOLO, A.; TINGINI, V.; PRIGIONE, V.; VARESE, G. C. Integrated fungal biomass and activated sludge treatment for textile wastewaters bioremediation. *Bioresource Technology*, v. 123, p. 106-111, 2012.

ANPC - ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS PRODUTORES DE COGUMELOS. O setor de cogumelos no Brasil. Disponível em: <<https://www.anpccogumelos.org/cogumelos>>. Acesso em: 15 set. 2022.

ANTUNES, M.L.P.; CAMARGO, S.R.G. de; JESUS, C.P. de; RUSSO, A.C. Estudo da utilização de Serragem de Madeira como Adsorvente Para Tratamento de Efluentes Têxteis. *Estudos Ambientais*, v. 12, n. 12, p. 6-14, 2010.

ARAÚJO, F.V.F.; YOKOYAMA, L.; TEIXEIRA, L. A. C. Remoção de cor em soluções de corantes reativos por oxidação com H₂O₂/UV. *Química Nova*, v. 29, p. 11 – 14, 2006.

ARAÚJO, W. C.; JESUS, J. O. N.; PEDRO, F. J. D.; RODRIGUES, L. K. O.; SANTOS, D. S.; SANTOS, I. S.. Estudo socioeconômico do Polo de Confecções no Agreste de Pernambuco: uma análise descritiva e exploratória. *Brazilian Journal of Development*, v.5, n.11, p.26812-26826, 2019.

ARGIROFF, William A. et al. Fungal community composition and genetic potential regulate fine root decay in northern temperate forests. *Molecular Ecology*, [S.L.], v. 32, n. 8, p. 2005-2021, 3 fev. 2023. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/mec.16852>.

ARSLAN-ALATON, I.; GURSOY, B. H.; SCHMIDT, J. E. Advanced oxidation of acid and reactive dyes: Effect of Fenton treatment on aerobic, anoxic and anaerobic processes. *Dyes and Pigments*, v. 78, p. 117-130, 2007.

AZEVEDO, J. L. Fungos – Genética e melhoramento de fungos na biotecnologia. *Biotecnologia, Ciência e Desenvolvimento*, Brasília, v. 1, p. 12-15, 1997.

BACKES, Emanuelli et al. Aplicação de lacases em biorremediação: comparação entre enzimas livres e imobilizadas. *Biodegradação e Biorremediação*, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 176- 191, jan. 2022. Mérida Publishers. <http://dx.doi.org/10.4322/mp.978-65-84548-03-9.c10>.

BALDANTONI, A. D. et al. Anthracene and benzo(a)pyrene degradation in soil is favoured by compost amendment: perspectives for a bioremediation approach. *Journal of Hazardous Materials*, 2017.

BALDRIAN, P. Interactions of heavy metals with white-hot fungi. *Enzyme and Microbial Technology*, v. 32, 78-91, 2003.

BALDRIAN, Petr et al. Fungal laccases – occurrence and properties. *Fems Microbiology Reviews*, [S.L.], v. 30, n. 2, p. 215-242, mar. 2006. Oxford University Press (OUP). <http://dx.doi.org/10.1111/j.1574-4976.2005.00010.x>.

BARRIOS-HERNÁNDEZ, Mary Luz et al. Removal of bacterial and viral indicator organisms in full-scale aerobic granular sludge and conventional activated sludge systems. *Water Research X*, [S.L.], v. 6, p. 100040, jan. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wroa.2019.100040>.

BATTISTELLI, A. A. et al. Avaliação da eficiência do composto residual da produção de fungo *Pleurotus ostreatus* na remoção de corantes em efluentes têxteis. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AMBIENTAL, 30., 2019, Manaus. Anais [...]. Rio de

Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Ambiental, 2019. Trabalho II-134. Disponível em: <<https://abesnacional.com.br/XP/XPEasyArtigos/Site/Uploads/Evento45/TrabalhosCompletosPDF/II-134.pdf>>. Acesso em: 7 nov. 2022.

BENKHAYA, S.; M'RABET, S.; HSISSOU, R.; EL HARFI, A. Synthesis of new low-cost organic ultrafiltration membrane made from Polysulfone/Polyetherimide blends and its application for soluble azoic dyes removal. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 9 (3), p. 4763–4772, 2020.

BERG, Jeremy M. et al. *Biochemistry*. 5. ed. New York: W. H. Freeman And Company And Sumanas, Inc, 2002.

BERNARDI, E. et al. CULTIVO DE PLEUROTUS SAJOR-CAJU EM DIFERENTES SUBSTRATOS PASTEURIZADOS. *Arquivos do Instituto Biológico*, [S.L.], v. 78, n. 2, p. 217-223, jun. 2011. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/18081657v78p2172011>.

BHATIA, D. et al. Biological methods for textile dye removal from wastewater: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, Inglaterra, v. 42, n. 1, p. 1-70, out. 2017.

BRAILE, P.M.; CAVALCANTI, J.E.W.A. Manual de tratamento de águas residuárias. São Paulo: CETESB, 1993.

BRINKMANN, A. M., LIERS, C., & WARIISHI, H. Laccase and lignin peroxidase-catalyzed oxidation of veratryl alcohol and its effect on kraft pulp delignification. *Journal of Biotechnology*, 53(2-3), 215-227, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(97\)01670-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(97)01670-0).

BUAISHA, Magdi et al. Heavy Metal Removal Investigation in Conventional Activated Sludge Systems. *Civil Engineering Journal*, [S.L.], v. 6, n. 3, p. 470-477, 1 mar. 2020. Ital Publication. <http://dx.doi.org/10.28991/cej-2020-03091484>.

BUSWELL, J. A. et al. Lignocellulolytic enzyme profiles of edible mushroom fungi. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 12, n. 5, p. 537–542, 1996.

C. SALES-CAMPOS.; C.S.M. DE CARVALHO.; L.V.B. DE AGUIAR.; M.C.N. DE ANDRADE. Cinética Micelial Dos Fungos Comestíveis *Pleurotus Ostreatus* E *Lentinula*

Edodes Em Resíduos Lignocelulósicos v. 78,, p. 1–9, v. 78. p. 141 DOI:10.1590/1805-1657.2011.

CHAVES, Nayane Oliveira et al. AS PRINCIPAIS TÉCNICAS UTILIZADAS PARA REMOÇÃO DE CORANTES DAS ÁGUAS RESIDUAIS DA INDÚSTRIA TÊXTIL: UMA REVISÃO. *Perspectivas da ciência e tecnologia*, Rio de Janeiro, v. 14, 28 out. 2022.

CHEEK, M. et al. New scientific discoveries: Plants and fungi. *Plants People Planet*, v. 2, n. 5, p. 371-388, 2020.

CHEQUER, F. M. D.; DORTA, D. J.; OLIVEIRA, D. P. Azo dyes and their metabolites: does the discharge of the azo dye into water bodies represent human and ecological risks? In: HAUSER, P. J. (Ed.). *Advances in Treating Textile Effluent*. Rijeka: InTech, p.27-48, 2011.

ÇINAR, O.; DEMİRÖZ, K. Biodegradation of Azo Dyes in Anaerobic–Aerobic Sequencing Batch Reactors. In: ERKURT, H. A. (Ed.). *Biodegradation of Azo Dyes*. Nicosia, North Cyprus: Springer, 2010. Cap. 3. p. 59-72. (The Handbook of Environmental Chemistry).

CLAUS, H. Laccases: structure, reactions, distribution. *Micron*, 34(6), 1-17, 2003. doi: 10.1016/S0968-4328(03)00042-1

COELHO, G. F.; GONÇALVES Jr, A. C.; DE SOUSA, R. F. B.; SCHAWANTES, D.;

MIOLA, A. J.; DOMINGUES, C. V. R. Uso de técnicas de adsorção utilizando resíduos agroindustriais na remoção de contaminantes em águas. *Journal of Agronomic Sciences*, Umuarama, v. 3, n. especial, p. 291-317, 2014.

COLLIER, S.W.; STORM, J.E.; BRONAUGH, R.L. Reduction of azo dyes during in vitro percutaneous absorption. *Toxicology and Applied Pharmacology*, New York, v. 118, n. 1, p. 73-79, 1993.

CONWAY, R. Technical textile finishing. In: HORROCKS, R. A.; ANAND, S. C. *Handbook of Technical Textile*, Woodhead Publishing, v.1, 2 ed., 2016, 396p.

CRUZ FILHO, Iranildo José da et al. Otimização do processo de remoção do corante preto de remazol B por uso de biomassa mista de *Aspergillus niger* van Tieghem, 1867 (Ascomycota: trichocomaceae) e *pennisetum purpureum* schumach., 1827 (poales. *Revista Brasileira de*

Gestão Ambiental e Sustentabilidade, [S.L.], v. 3, n. 6, p. 375-384, 2016. Revista Brasileira de Gestao Ambiental e Sustentabilidade. <http://dx.doi.org/10.21438/rbgas.030611>.

CUNHA, A. L. X. et al.; Tratamento físico-químico de efluente têxtil utilizando sulfato de alumínio, carvão ativado e Moringa Oleífera. Revista GEAMA Ciências Ambientais e Biotecnologia, v. 5, p. 47-55, 2019.

DAÂSSI, D. et al. Decolorization of the metal textile dye Lanaset Grey G by immobilized white-rot fungi. Journal Of Environmental Management, [s.l.], v. 129, p. 324-332, nov. 2013.

DE SOUZA, K. V. Degradação de corantes e remediação de resíduos têxteis por processos Fenton. Curitiba, 2004. 109 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal do Paraná.

DEENA, Santhana Raj et al. Enhanced biogas production from food waste and activated sludge using advanced techniques – A review. Bioresource Technology, [S.L.], v. 355, p. 127234, jul. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127234>.

DO NASCIMENTO, R. F. et al. Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais. Fortaleza: Imprensa Universitária. 2014. E-book. 2014. 256 p. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/10267>. Acesso em: 29 nov. 2002.

DULLIUS, C. H. Utilização de fungos para biodegradação de corantes têxteis sintéticos. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional). Universidade Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2004.

DURÁN, N.; TEIXEIRA, M. F. S.; CONTI, R.; ESPOSITO, E. . Ecological-friendly pigments from fungi. Critical Review Food Science Nutrition, v. 42, p. 53-66, 2002.

EBRAHIMI, S., FARHADIAN, M., & ARABI, S. The role of enzymes in cellular signaling pathways. Journal of Cellular Biochemistry, 121(6), 4276-4286, 2020.

EL-BATAL, Ahmed I. et al. Laccase production by *Pleurotus ostreatus* and its application in synthesis of gold nanoparticles. Biotechnology Reports, [S.L.], v. 5, p. 31-39, mar. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.btre.2014.11.001>.

EL-RAHIM, W. M. A.; EL-ARDY, O. A. M.; MOHAMMAD, F. H. A. The effect of pH on bioremediation potential for the removal of direct violet textile dye by *Aspergillus niger*. *Desalination*, [s. l], v. 249, n. 3, p. 1206-1211, dez. 2009.

FERNANDES, André José. Aumento de Escala na Produção de Lacase Por *Trametes Versicolor* Utilizando Biorreator de Baixo Cisalhamento. 2023. 62 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Biotecnologia Industrial, Universidade de São Paulo, Lorena, 2023.

FERNANDES, J. M. C. et al. Fungal biodegradation and multi-level toxicity assessment of vinasse from distillation of winemaking by-products. *Chemosphere*, v. 238, p. 124572, 2020.

FERREIRA, F. S. et al. Otimização das Condições de Crescimento de Fungos Degradadores de Madeira. *Revista Científica de Estudos Superiores de Parintins*, [s. l], n. 1, Maio 2017. Disponível em: <<http://periodicos.uea.edu.br/index.php/marupiara/article/view/430>>. Acesso em: 28 out. 2022.

FERREIRA, Viviane Xavier et al. O uso sustentável da água: a produção mais limpa em uma indústria têxtil do estado de são paulo. *Revista Brasileira Multidisciplinar*, [S.L.], v. 22, n. 3, p. 119, 1 set. 2019. *Revista Brasileira Multidisciplinar - Rebram*. <http://dx.doi.org/10.25061/2527-2675/rebram/2019.v22i3.777>.

FINNEY, K. N. et al. The reuse of spent mushroom compost and coal tailings for energy recovery: Comparison of thermal treatment technologies. *Bioresource Technology*, v. 100, n. 1, p. 310–315, 2009.

FITHRI, L., TRI PUSPANINGSIH, N. N., ASMARANI, O., MATUZAHROH, N., FITRAH DEWI, G. D., & ARIZANDY, R. Y. Characterization of Fungal Laccase Isolated from oil palm empty fruit bunches (OPEFB) and Its Degradation from The Agriculture Waste. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2020. doi:10.1016/j.bcab.2020.101676

FUJITA, Renata Mayumi Lopes; JORENTE, Maria José. A Indústria Têxtil no Brasil: uma perspectiva histórica e cultural. *Moda palavra e periódico*. n 5. p 153-174. 2015.

GANDHI, Giordano. *Tratamento e Controle de Efluentes Industriais*, UERJ, Rio de Janeiro, 2004.

GAYLARDE, Christine Claire; BELLINASSO, M. D. L.; MANFIO, Gilson Paulo. Biorremediação. *Biotecnologia Ciência & Desenvolvimento*, v. 34, p. 36-43, 2005.

GLAZER, A. N.; NIKAIDO, H. *Microbial Biotechnology: fundamentals of applied microbiology*. New York: W. H. Freeman, 1995.

GUARATINI, C. C. I.; ZANONI, M. V. B. Corantes Têxteis. *Quim. Nova*, v. 23, n. 1, p. 71-78, jan./fev. 2000.

GUPTA, Vinod Kumar et al. Adsorptive removal of dyes from aqueous solution onto carbon nanotubes: a review. *Advances In Colloid And Interface Science*, [S.L.], v. 193-194, p. 24- 34, jun. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cis.2013>.

HAMEED, B.H. et al. Spent tea leaves: a new non-conventional and low-cost adsorbent for removal of basic dye from aqueous solutions. *Journal Of Hazardous Materials*, [S.L.], v. 161, n. 2-3, p. 753-759, jan. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.04.019>.

HAWKSWORTH, D. L. et al. Global species richness estimates of fungi: how many are there and where are they? In: W. C. Stotler and B. J. Crandall-Stotler (eds.), *Advances in Botanical Research*, vol. 98, pp. 1-42, 2020.

HEINZKILL, Marion et al. Characterization of Laccases and Peroxidases from Wood-Rotting Fungi (Family Coprinaceae). *Applied And Environmental Microbiology*, [S.L.], v. 64, n. 5, p. 1601-1606, maio 1998. American Society for Microbiology. <http://dx.doi.org/10.1128/aem.64.5.1601-1606.1998>.

HIBBETT, D. S. et al. A higher-level phylogenetic classification of the Fungi. *Mycological research*, v. 111, n. 5, p. 509–47, 2007

HISCOX, J. et al. Fungus wars: basidiomycete battles in wood decay. *Studies In Mycology*, [s. l.], v. 89, n. 1, p. 117-124, 1 mar. 2018.

HOFRICHTER, Martin. Review: lignin conversion by manganese peroxidase (mnp). *Enzyme And Microbial Technology*, [S.L.], v. 30, n. 4, p. 454-466, abr. 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0141-0229\(01\)00528-2](http://dx.doi.org/10.1016/s0141-0229(01)00528-2).

HUNGER, K. *Industrial Dyes: Chemistry, Properties, Applications*. Frankfurt: Wiley-vch, 2003.

HUSSEIN, Falah H. Chemical properties of treated textile dyeing wastewater. *Asian Journal of Chemistry*, [S. l.], v. 25, n. 16, p. 9393–9400, 2013. DOI: 10.14233/ajchem.2013.15909.

HYDE, K. D. et al. The amazing potential of fungi: 50 ways we can exploit fungi industrially. *Fungal Diversity*, v. 97, n. 1, p. 1-22, jun. 2019. doi: 10.1007/s13225-019-00430-9.

JACQUES, R.J.S.; SILVA, K.J. da; BENTO, F.M.; CAMARGO, F.A.O. Biorremediação de um solo contaminado com antraceno sob diferentes condições físicas e químicas. *Ciência Rural*, v.40, n.2, p.280-287, 2010.

JAYANTHY, V. et al. Phytoremediation of dye contaminated soil by *Leucaena leucocephala* (subabul) seed and growth assessment of *Vigna radiata* in the remediated soil. *Saudi Journal Of Biological Sciences*, India, p. 1-10, 2014.

KAMIDA, H. M.; DURRANT, L. R.; MONTEIRO, R. J. R.; ARMAS, E. D. Biodegradação de efluente têxtil por *Pleurots sajor-caju*. *Química Nova*, v. 28, p. 629-632, 2005.

KAMMRADT, P. B. Remoção de cor de efluentes de tinturarias industriais através de processo de oxidação avançada. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2004.

KAMTHAN, R.; TIWARI, I. Agricultural Wastes- Potential Substrates For Mushroom Cultivation. *European Journal of Experimental Biology*, v.7, p.1-4, 2017.

KAUSHIK, P. & MALIK, A. Fungal dye decolourization: recent advances and future potential. *Environment International*, v. 35, n. 1, p. 127-141, 2009.

KHAN, A. A.; HUSAIN, Q. Decolorization and removal of textile and non-textile dyes from polluted wastewater and dyeing effluent by using potato (*Solanum tuberosum*) soluble and immobilized polyphenol. oxidase. *Bioresource Technol.*, v. 98, p.1012-1019, 2007.

KHANDEGAR, V.; SAROHA, A. K. Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluente – A review. *Journal of Environmental Management*, 128, p. 949-963, 2013.

KHATRI, A.; PEERZADA, M.H.; MOHSIN, M., WHITE, M. A review on developments in dyeing cotton fabrics with reactive dyes for reducing effluent pollution. *Journal of Cleaner Production*, v.87, pp. 55-57, 2015.

KIEBIST J, HOFRICHTER M, ZUHSE R et al. Oxyfunctionalization of pharmaceuticals by fungal peroxygenases. In: Grunwald P (Hrsg) *Pharmaceutical Biocatalysis–Chemoenzymatic Synthesis of Active Pharmaceutical Ingredients*. Jenny Stanford Publishing, Singapur, 2019.

KIRK, T. K.; CANNON, P. F.; MINTER, D. W.; STALPERS, J. A. *Dictionary of the Fungi*. 10. Ed. Wallingford: CABI Bioscience, 2008. 784 p.

KOŁODYŃSKA, D.; KRUKOWSKA, J.; THOMAS, P.. Comparison of sorption and desorption studies of heavy metal ions from biochar and commercial active carbon. *Chemical Engineering Journal*, [S.L.], v. 307, p. 353-363, jan. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2016.08.088>.

KON, Anita; COAN, Durval Calegari. Transformações da indústria têxtil brasileira: a transição para a modernização. *Revista de Economia Mackenzie*, ano 3, n. 3, p. 11-34, 2005.

KUMAR, R., KAUR, J., JAIN, S., KUMAR, A. Optimization of laccase production from *Aspergillus flavus* by design of experiment technique: Partial purification and characterization. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*. 14, 125–131, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jgeb.2016.05.006>

KUMAR, V.; CHANDRA, R. Bioremediation of Melanoidins Containing Distillery Waste for Environmental Safety. *Bioremediation of Industrial Waste for Environmental Safety*. Singapore: Springer,. v. II. p. 495–529, 2020.

KUNZ, A.; PERALTA-ZAMORRA, P.; MORAES, S. G.; DURÁN, N. Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. *Química Nova*, São Paulo, v. 25, n. 1, p. 78-82, jan./fev. 2002.

KYZAS, George Z. et al. Modelling the effect of pre-swelling on adsorption dynamics of dyes by chitosan derivatives. *Chemical Engineering Science*, [S.L.], v. 81, p. 220-230, out. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2012.07.007>.

LANG, W., SIRISANSANEEYAKUL, S., NGIWSARA, L., MENDES, S., MARTINS, L.O.,

OKUYAMA, M., KIMURA, A., 2013. Characterization of a new oxygeninsensitive azo reductase from *Brevibacillus laterosporus* TISTR1911: toward dye decolorization using a packed-bed metal affinity reactor. *Bioresour. Technol.* 150, 298, 2013.

LEÃO, M. M. D.; CARNEIRO, E. V.; SCHWAB, W. K.; RIBEIRO, E. D. L.; SOARES, A. F. S.; NETO, M. L. F.; TORQUETI, Z. S. C. Controle ambiental na indústria têxtil: acabamento de malhas. Belo Horizonte: SEGRAC 2002. 356 p. Projeto Minas Ambiente.

LEVASSEUR, Anthony et al. Expansion of the enzymatic repertoire of the CAZy database to integrate auxiliary redox enzymes. *Biotechnology For Biofuels*, [S.L.], v. 6, n. 1, p. 41, 2013. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1186/1754-6834-6-41>.

LI, J.; LIU, Q.; HUANG R.; WANG G. Synthesis of a novel Ce(III)-incorporated crosslinked chitosan and its effective removal of fluoride from aqueous solution. *Journal of Rare Earths*. v.34, nr.10, p.1053-1061, 2016.

MARIANO, Adriano Pinto. AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE BIORREMEDIAÇÃO DE SOLOS E DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS CONTAMINADOS COM ÓLEO

DIESEL. 2006. 162 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geociências e Meio Ambiente, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2006.

MARTIN, P. et al. Avaliação do efeito da temperatura, pH e granulometria do adsorvente na adsorção do corante azul reativo 5G. *Engevista*, v. 17, n. 1, p. 59-68, mar. 2015.

MARTÍNEZ, Á.T., RUIZ-DUEÑAS, F.J., MARTÍNEZ, M.J., DEL RÍO, J.C., GUTIÉRREZ,

A. Enzymatic delignification of plant cell wall: from nature to mill. *Current Opinion in Biotechnology*, 20(3), 348-357, 2009. doi: 10.1016/j.copbio.2009.05.002.

MATHUR, N. et al. ASSESSING MUTAGENICITY OF TEXTILE DYES FROM PALI

(RAJASTHAN) USING AMES BIOASSAY. *Applied Ecology And Environmental Research*, India, v. 4, n. 1, p. 111-118, ago. 2005.

MCMULLAN, G.; MEEHAN, C.; CONNEELY, A.; KIRBY, N.; ROBINSON, T.; NIGAM,

P.; BANAT, I. M.; MARCHANT, R. Microbial decolourisation and degradation of textile dyes. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* vol. 56, pp. 81-87, 2001

MCYOTTO, Felix et al. Effect of dye structure on color removal efficiency by coagulation. *Chemical Engineering Journal*, [S.L.], v. 405, p. 126674, fev. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2020.126674>.

MELO, Elisa Dias de et al. Avaliação da tratabilidade de efluentes de indústrias de cosméticos capilares por processos biológicos aeróbios. *Revista Augustus*, [S.L.], v. 24, n. 49, p. 155-178, 17 dez. 2019. Sociedade Unificada de Ensino Augusto Motta -UNISUAM. <http://dx.doi.org/10.15202/1981896.2019v24n49p155>.

MENDES JUNIOR, Biagio de Oliveira. SETOR TÊXTIL – PRODUÇÃO, COMÉRCIO INTERNACIONAL E PERSPECTIVAS PARA BRASIL, NORDESTE, CEARÁ E

PERNAMBUCO EM 2021: caderno setorial etene. 185. ed. Fortaleza: Banco do Nordeste, 2021. 10 p.

Metcalf & Eddy (2003) *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. 4th Edition, McGraw-Hill, New York.

MORAN, C.; HALL, M. E.; HOWELL, R. Effects of Sewage Treatment on Textile Effluent. *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, v. 113, p. 272-274, 1997.

MOREIRA NETO, Sérgio L. Enzimas Lignofílicas produzidas por *Psilocybe castanella* CCB444 em solo contaminado com hexaclorobenzeno. 2006, 110f. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade Vegetal e Meio Ambiente) – Instituto de Botânica da Secretaria de Estado do Meio Ambiente, São Paulo, 2006.

MOREIRA, Erica et al. O impacto da pandemia no segmento de vestuário e da indústria têxtil. *Getec, Brasil*, v. 12, n. 40, p. 40-56, 2023.

MSAKY, J. J.; CALVET, R. Adsorption behavior of Copper and zinc in soils: Influence of pH on adsorption characteristics. *Soil Science*, v. 150, n.2, p. 513-522, ago. 1990.

MÜLLER, Laura Cecilia et al. Adsorção do azul de metileno em serragem de *Pinus elliottii* (pinus) e *Drepanostachyum falcatum* (bambu). *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, [S.L.], v. 24, n. 4, p. 687-695, ago. 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522019160344>.

NASCIMENTO, K. K. R. et al. Use of sweet ‘Pêra’ peel as an adsorbent in the treatment of textile effluents. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 23, n. 9, p. 716-722, 2019.

NASCIMENTO, Ronaldo Ferreira do et al. ADSORÇÃO: aspectos teóricos e aplicações ambientais. E-book. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014. 256 p. Disponível em:<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/10267>. Acesso em: 27 maio 2023.

NASCIMENTO, T. G. V. Aplicação da Metodologia de Planejamento de Experimentos no tratamento de Efluentes de Laticínios na Reação do tipo Fenton Heterogêneo. Dissertação. 65f. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química – Universidade Federal de São João Del-Rei. Ouro Branco, 2017.

NASSAR, M.M. e MAGDY, Y.H. Removal of different basic dyes aqueous solution on palm-fruit bunch particles. *Chemical Engineering Journal*, v.66, p.223, 1997.

OLIVEIRA, Débora Carvalho da Silva et al. Processos biológicos para o tratamento de efluentes: uma revisão integrativa. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, [S.L.], v. 8, n. 18, p. 397-415, 2021. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*. [http://dx.doi.org/10.21438/rbgas\(2021\)081826](http://dx.doi.org/10.21438/rbgas(2021)081826).

OLIVEIRA, L. F. D., COSTA, M. C. R., COSTA, M. D. F., & SILVA, F. H. D. Presença de metais pesados em efluentes têxteis. *Revista Saúde & Ambiente*, 19(2), 178-188, 2018.

PERALTA-ZAMORA, P.; MORAIS, J. L.; NAGATA, N. Por que otimização multivariada? *Engenharia Sanitária e Ambiental*, [s. l], v. 10, n. 2, p. 106-110, 2005.

PEREIRA, Aline Ramalho Brandão et al. Biodegradação de corantes e efluentes têxteis por fungos. *Holos Environment*, v. 10, n. 2, p. 165-179, 2010.

PUSKEILER, R.; WEUSTER-BOTZ, D. Combined sulfite method for the measurement of the oxygen transfer coefficient k_La in bioreactors. *Journal of biotechnology*, v. 120, n. 4, p. 430-438, 2005.

RAMOS, Márcio Daniel N. et al. Critical Analysis of the Characteristics of Industrial Effluents from the Textile Sector in Brazil. *Revista Virtual de Química*, [S.L.], v. 12, n. 4, p. 1001-1016, 2020. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20200073>.

REYS, L. F. Estudo da degradação de Polietileno Tereftalato (PET) por Fungos Basidiomicetes Lignofílicos. 2003. 104f. Dissertação (Mestrado em Ciência de Alimentos) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

RINALDI, A.C.; COMADINI, O.; KUYPER, T. W. Ectomycorrhizal fungal diversity: separating the wheat from the chaff. *Fungal Diversity*, n. 33, p. 1 – 45, nov. 2008.

ROCHA, Antônio Carlos de Lima et al. Panorama da pesquisa sobre tratamento e reúso de efluentes da indústria de antibióticos. *Saúde em Debate*, [S.L.], v. 43, n. 3, p. 165-180, dez. 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-11042019s312>.

ROSOLEN, Luciana Antonelli. Biodegradação de efluente têxtil e nove corantes técnicos utilizando fungos basidiomicetos. 2004. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004. Acesso em: 05 jan. 2023.

SALEM, Vidal. Tingimento têxtil: fibras, conceitos e tecnologias. São Paulo: Edgard Blucher, 2010.

SAMANTA KK, PANDIT P, SAMANTA P, BASAK S. Water consumption in textile processing and sustainable approaches for its conservation [Internet]. *Water in Textiles and Fashion*. Elsevier Ltd.; 2019. 41–59 p. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-102633-5.00003-8>

SCHALLEMBERGER, J. B.; LIBARDI JUNIOR, N. ; DALARI, B. L. S. K. ; CHAVES, M. B. ; HASSEMER, M. E. N. . Textile azo dyes discolouration using spent mushroom substrate: enzymatic degradation and adsorption mechanisms. *Environmental Technology*, p,1-22, 2021.

SCHALLEMBERGER, Juliana Barden et al. Effect of Spent Mushroom Substrate on Azo Dye Removal and Effluent Treatment. *Brazilian Archives Of Biology And Technology*, [S.L.], v. 66, p. 1-12, 2023. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4324-2023210843>.

SCHIMMEL, D. Adsorção dos corantes reativos azul 5g e azul turquesa qg em carvão ativado comercial. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). UNIOESTE, 2008.

SEKAR, M.; SAKTHI, V.; RENGARAJ, S. Kinetics and equilibrium adsorption study of lead (II) onto activated carbon prepared from coconut shell. *Colloid and Interface Science*, v. 279, p. 307-313, nov. 2014.

SEMCHENKO, Marina et al. Fungal diversity regulates plant-soil feedbacks in temperate grassland. *Science Advances*, [S.L.], v. 4, n. 11, p. 1-9, 2 nov. 2018. American Association for the Advancement of Science (AAAS). <http://dx.doi.org/10.1126/sciadv.aau4578>.

SEN, S. K.; RAUT, S.; BANDYOPADHYAY, P.; RAUT, S. Fungal decolouration and degradation of azo dyes: A review. *Fungal Biology Reviews*, v. 30, p. 112-133, 2016.

SHRESTHA, Dibyashree. Efficiency of Wood-Dust of *Dalbergia sisoo* as Low-Cost Adsorbent for Rhodamine-B Dye Removal. *Nanomaterials*, [S.L.], v. 11, n. 9, p. 2217, 28 ago. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/nano11092217>.

SIDDIQUE, R., KHATIB, M. A., KASSIM, K. A., & SAKINAH, M. Removal of heavy metals from textile wastewater: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 208, 595-614, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.184>.

SILVA FILHO, M. N. Produtos químicos utilizados na indústria têxtil e a questão ecológica. *Química Têxtil*, São Paulo: ABQCT, (36), 11-16, 1994.

SILVA NETO, Benedito Rodrigues da (org.). *Micologia: fungos e/ou seus metabólitos como objeto de estudo*. Ponta Grossa: Atena, 2020. 174 p.

SILVA, R. L. L.; COELHO, M. A. Z.; CAMMAROTA, M. C. Remoção de cor de efluentes têxteis com cogumelos *Agaricus bispora*. *Acta Scientiarum. Technology*, [s.l.], v. 32, n. 3, p.219-225, 9 nov. 2010. Universidade Estadual de Maringá. <http://dx.doi.org/10.4025/actascitechnol.v32i3.6339>

SILVERSTEIN, R. M.; WEBSTER, F. X.; KIEMLE, D. J. *Identificação Espectrométrica de Compostos Orgânicos*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 506p.

SIMÕES, Geiziany da Silva et al. CONTRIBUIÇÃO AOS CONHECIMENTOS DA DIVERSIDADE DE FUNGOS BASIDIOMYCOTA NO SUL DO AMAZONAS, BRASIL.

Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, [S.L.], v. 10, n. 4, p. 203, 14 dez. 2021. Anima Educação. <http://dx.doi.org/10.19177/rgsa.v10e42021203-217>.

SOARES, I.A. et al. FUNGOS NA BIORREMEDIAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS.

Arquivos do Instituto Biológico, [S.L.], v. 78, n. 2, p. 341-350, jun. 2011. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1808-1657v78p3412011>.

SOARES, P.A.; SILVA, T.F.C.; MANENTI, D.R.; SOUZA, S.M.A.G.U.; BOAVENTURA, R.A.R.; VILAR, V.J.P. Insights into real cotton-textile dyeing wastewater treatment using solar advanced oxidation processes. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 21, n. 2, p. 932-945, 2014. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-013-1934-0>

SPAGNI, Alessandro; GRILLI, Selene; CASU, Stefania; MATTIOLI, Davide. Treatment of a simulated textile wastewater containing the azo-dye reactive orange 16 in an anaerobic-biofilm anoxic-aerobic membrane bioreactor. *International Biodeterioration and Biodegradation*, [S. l.], v. 64, n. 7, p. 676–681, 2010. DOI: 10.1016/j.ibiod.2010.

SPECIES FUNGORUM. Disponível em: <<http://www.speciesfungorum.org>> Acessado em: Dez, 2022.

STAMETS, P. Mycelium running: how mushrooms can help save the world. New York: Ten Speed Press, 2005. 340 p.

SURYADI, Herman et al. Biodelignification of lignocellulose using ligninolytic enzymes from white-rot fungi. *Heliyon*, [S.L.], v. 8, n. 2, p. 1-12, fev. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08865>.

TAGLIAFERRO, G. V. et al. Adsorção de chumbo, cádmio e prata em óxido de nióbio (v) hidratado preparado pelo método da precipitação em solução homogênea. *Química Nova*, v. 34, n. 1, p. 101-105, nov. 2010.

TIAN X, LI C, YANG H, YE Z, XU H. Spent mushroom: a new lowcost adsorbent for removal of congo red from aqueous solutions. *J Desalin Water Treat* 27:319–326, 2011.

TIEN, M.; KIRK, T.K. Lignin-degrading enzyme from *Phanerochaete chrysosporium* purification, characterization and catalytic properties of a unique H₂O₂-requiring oxygenase. *Proceeding National Academic Science USA*. 81: 2280-2284, 1984.

TOLEDO, R. A. S., Tecnologia da Reciclagem. *Química Têxtil*, p.8-14, mar. 2004.

TOPTAS, A. et al. Spent mushroom compost as biosorbent for dye biosorption. *Clean - Soil, Air, Water*, v. 42, p. 1–8, 2014.

UNIDO - UNITED NATIONS INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION. *INDSTAT 2 2020, ISIC Revision 3 (Demo): Textiles*, 2018. Disponível em: <<https://stat.unido.org/>>. Acesso em: 27 dez. 2022.

UPADHYAY R. AND PRZYSTAŚ W. Decolorization of Two Dyes Using White Rot Fungus *P. ostreatus* (BWPH) Strain and Evaluation of Zootoxicity of Post Process Samples. *Architecture, Civil Engineering, Environment*, Vol.15 (Issue 3), pp. 87-94, 2022. <https://doi.org/10.2478/acee-2022-0033>.

VALH, J. V. et al. Water in the textile industry. In: WILDERER, P. (Ed.). *Treatise on Water Science*. 1. ed. Oxford: Elsevier, 2011. p. 685–703.

VAUGHAN, T. et al. Removal of selected metal ions from aqueous solution using modified corncobs. *Bioresource Technology*, v. 78, p. 133-139. 2001

VÁZQUEZ-ORTEGA, F.; LAGUNES, I.; TRIGOS, A. Cosmetic dyes as potential photosensitizers of singlet oxygen generation. *Dyes And Pigments*, [s. l.], v. 176, p. 108248, maio 2020.

VICENTINI, F. C. et al. Planejamento fatorial e superfície de resposta: otimização de um método voltamétrico para a determinação de $Ag(I)$ empregando um eletrodo de pasta de nanotubos de carbono. *Química Nova*, São Paulo, v. 34, n. 5, p. 825-830, mar. 2011.

WANG, D.; BOLTON, J. R.; ANDREWS, S. A.; HOFMAN, R. UV/chlorine control of drinking water taste and odour at pilot and full-scale. *Chemosphere*, v. 136, p. 239-244, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere>.

WARIISHI, H., VALLI, K. & GOLD, M. Manganese (II) oxidation by manganese peroxidase from the basidiomycete *Phanerochaete chrysosporium*. Kinetic mechanism and role of chelators. *J. Biol. Chem.* Volume 267, p. 23688–23695, 1992.

WESENBERG, D.; KYRIAKIDES, I.; AGATHOS, S. N. White-rot fungi and their enzymes for the treatment of industrial dye effluents. *Biotechnology Advances*, v. 22, p. 161–187, 2003.

WORLD WILDLIFE FUND (2021).Disponível em:

<<https://www.worldwildlife.org/initiatives/climate>> Acesso em: 13 de out 2022.

XIANG, M. et al. High-level expression and characterization of a novel phospholipase C from *Thielavia terrestris* suitable for oil degumming. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 156, p. 740–748, 1 ago. 2020.

YAN, Tingguo; WANG, Lijuan. Adsorptive Removal of Methylene Blue from Aqueous Solution by Spent Mushroom Substrate: equilibrium, kinetics, and thermodynamics. *Bioresources*, [S.L.], v. 8, n. 3, p. 4722-4734, 30 jul. 2013. *BioResources*. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.8.3.4722-4734>.

YESILADA, O.; ASMA, D.; CING, S. Decolorization of textile dyes by fungal pellets. *Process Biochemistry*, [s. l], v. 38, n. 6, p. 933-938, jan. 2003.

ZANONI, M. V. B.; CARNEIRO, P. A. O descarte dos corantes têxteis. *Ciência Hoje*, v. 29, n. 174, p. 61-64, out. 2001.

ZANONI, M.V.B., YAMANAKA, H., *Corantes - Caracterização química, toxicológicas, métodos de detecção e tratamento*, 1 ed., São Paulo, SP, Revista UNESP, 2016.

ZHANG, H. et al. Characterization of a manganese peroxidase from white-rot fungus *Trametes* sp.48424 with strong ability of degrading different types of dyes and polycyclic aromatic hydrocarbons. *Journal of Hazardous Materials*, v. 320, p. 265–277, 2016.

ZHENG, F. et al. A novel laccase from White rot fungus *Trametes orientalis*: Purification, Characterization and application. *International Journal of Biological Macromolecules*. [S.L.], v. 102, p. 758-770, set. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.04.089>.

ZOLLINGER, H. *Color chemistry: syntheses, properties and application of organic dyes and pigments*. 2.ed. New York: V.C.H, 1991.