



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**PGETEX – PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA TÊXTIL**

Jose Carlos Clock

**TRATAMENTO DE EFLUENTE DA INDÚSTRIA TÊXTIL UTILIZANDO**  
**SUPORTES DE BIOFILMES EM COLUNA DE LEITO FLUIDIZADO**

BLUMENAU

2024

Jose Carlos Clock

**TRATAMENTO DE EFLUENTE DA INDÚSTRIA TÊXTIL UTILIZANDO  
SUPORTES DE BIOFILMES EM COLUNA DE LEITO FLUIDIZADO**

Dissertação de Mestrado Apresentada ao Programa de Pós-Graduação Em Engenharia Têxtil do PGETEX da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito a obtenção ao título de Mestre em Engenharia Têxtil.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Augusto Ulson de Souza

Coorientadores: Prof. Dr. José Alexandre Borges Valle e Profa. Dra. Selene M. A. Guelli Ulson de Souza

Blumenau

2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.

Dados inseridos pelo autor.

Clock, Jose Carlos

Tratamento de efluente da indústria têxtil utilizando suporte de biofilmes em coluna de leito fluidizado / Jose Carlos Clock ; orientador, Antonio Augusto Ulson de Souza, coorientador, Jose Alexandre Borges Valle, coorientador, Selene Maria de Arruda Guelli Ulson de Souza, 2024.

92 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Têxtil, Blumenau, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Têxtil. 2. Industria têxtil. 3. Efluente têxtil. 4. Corantes reativos. 5. Biofilmes. I. Ulson de Souza, Antonio Augusto. II. Valle, Jose Alexandre Borges. III. Ulson de Souza, Selene Maria de Arruda Guelli IV. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação em Engenharia Têxtil. V. Título.

Jose Carlos Clock

**TRATAMENTO DE EFLUENTE DA INDÚSTRIA TÊXTIL UTILIZANDO  
SUPORTES DE BIOFILMES EM COLUNA DE LEITO FLUIDIZADO**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado em 28 de junho de 2024, para a obtenção do título de “Mestre”, através do Programa de Pós-graduação em Engenharia Têxtil.

**Membros da banca examinadora:**

Prof. Dr. Jose Alexandre Borges Valle

Universidade Federal de Santa Catarina (PGETEX)

Profa. Dra. Catia Rosana Lange de Aguiar

Universidade Federal de Santa Catarina (PGETEX)

Prof. Dr. Carlos Rafael Silva de Oliveira

Universidade Federal de Santa Catarina (membro externo)

Prof. Dr. Wagner Artifon

Universidade Federal de Santa Catarina (membro externo)

---

Profa. Dra. Fernanda Steffens

Coordenação do programa de Pós-graduação

---

Prof. Dr. Antônio Augusto Ulson de Souza

Orientador

A minha esposa Patrícia e minha  
filha Isadora, pela compreensão dos  
momentos de ausência durante a  
dedicação deste trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos Professores Antônio Augusto Ulson de Souza, Jose Alexandre Borges Valle e Selene Maria de Arruda Guelli Ulson de Souza, pela orientação do trabalho e pelos conhecimentos transmitidos.

Aos membros da banca do exame de qualificação Cátia Rosana Lange de Aguiar e Carlos Rafael Silva de Oliveira, pelas sugestões propostas no aprimoramento da dissertação.

Ao PGETEX pela oportunidade única do suporte acadêmico e conhecimentos transmitidos.

A Diretoria da Coteminas por ceder espaço no laboratório para realização dos ensaios analíticos e apoio à infraestrutura experimentais desenvolvida na empresa.

Ao Gerente de manutenção Claudenir Cruz, por permitir meu acesso irrestrito na empresa aos finais de semana para o monitoramento e levantamento dos dados experimentais.

Aos Mecânicos Gilson Brassanani e Osvaldir Inácio pelos reparos e ajustes feitos na unidade experimental antes da fase de testes.

Ao gerente de beneficiamento Rubens Ted Schulze pelo apoio no desenvolvimento do trabalho.

Por fim, as pessoas que indiretamente tiveram alguma participação neste trabalho, sinceros agradecimentos!

*Suba o primeiro degrau com fé.  
Não é necessário que você veja toda  
escada. Apenas de o primeiro passo.*

*Martin Luther King*

## RESUMO

Neste trabalho foi estudado o processo de tratamento de efluente têxtil preparado com corantes e produtos auxiliares químicos de tingimento e estamparia de tecidos, em coluna de leito fluidizado, no qual foi utilizado biofilmes derivados do lodo biológico seco processado por craqueamento térmico. A formação do biofilme ocorreu pela presença do lodo ativado em suspensão na coluna de leito fluidizado e da massa do material carbonoso utilizada como suporte, em um processo de recirculação contínua do efluente. Os experimentos foram realizados com dois efluentes distintos, compondo duas fases para cada tipo de efluente. Para o efluente A, os experimentos foram realizados com a combinação de 3 corantes reativos, R 176, R 225 e R 40. Na primeira fase, fase 1, foi o período de adaptação dos microrganismos ao sistema, no qual foram obtidos a redução da coloração de 91,8%, nitrogênio amoniacal 91,7%, fósforo total 45,7%, DQO 59,8% e DBO 75,4%. A fase 2, foi a fase de consolidação do biofilme, sendo repetida com a mesma combinação dos corantes da fase 1, com os resultados na redução da cor em 90,5%, nitrogênio amoniacal 99,4%, fósforo total 81,4%, DQO 54,9% e DBO 72,4%. O efluente B foi preparado com o corante reativo R 15 na composição, utilizando na fase 1 a oxigenação da coluna com suprimento de oxigênio puro a 99%. Nesta fase 1, a redução da cor foi de 52,8%, nitrogênio amoniacal 80,8%, fósforo total 80,0%, DQO 46,3% e DBO 67,2%. Na fase 2 o método de oxigenação do sistema foi com uso do ar atmosférico a 21% de oxigênio. Os resultados obtidos nesta fase 2 foram 44,7 % na redução da cor, nitrogênio amoniacal 95,2%, fósforo total 66,3%, DQO 20,9% e DBO 51,6%. No experimento com o efluente B, além da redução dos parâmetros de cor, DQO, DBO, nitrogênio e fósforo, foi avaliado também a quantidade de corante R 15 removido do sistema pela ação do biofilme.

**Palavras-chave:** Coluna de Leito Fluidizado, Tratamento de efluente avançado, Lodo biológico, Suporte, carbonoso, Biofilme.



## ABSTRACT

This work studied the process of treating textile effluent prepared with dyes and chemical auxiliaries from dyeing and printing fabrics, in a fluidized bed column, using biofilms derived from dry biological sludge processed by thermal cracking. The biofilm was formed by the presence of the suspended activated sludge in the fluidized bed column and the mass of carbonaceous material used as support, in a process of continuous effluent recirculation. The experiments were carried out with two different effluents, making up two phases for each type of effluent. For effluent A, the experiments were carried out with a combination of 3 reactive dyes, R 176, R 225 and R 40. The first phase, phase 1, was the period of adaptation of the microorganisms to the system, in which a reduction in color of 91.8%, ammoniacal nitrogen 91.7%, total phosphorus 45.7%, COD 59.8% and BOD 75.4% were obtained. Phase 2 was the biofilm consolidation phase and was repeated with the same combination of dyes as phase 1, with results of 90.5% color reduction, 99.4% ammoniacal nitrogen, 81.4% total phosphorus, 54.9% COD and 72.4% BOD. Effluent B was prepared with the reactive dye R 15 in the composition, using column oxygenation in phase 1 with a 99% pure oxygen supply. In this phase 1, the reduction in color was 52.8%, ammoniacal nitrogen 80.8%, total phosphorus 80.0%, COD 46.3% and BOD 67.2%. In phase 2, the system was oxygenated using atmospheric air at 21% oxygen. The results obtained in phase 2 were 44.7% reduction in color, ammonia nitrogen 95.2%, total phosphorus 66.3%, COD 20.9% and BOD 51.6%. In the experiment with effluent B, in addition to reducing the parameters of color, COD, BOD, nitrogen and phosphorus, the amount of R 15 dye removed from the system by the action of the biofilm was also evaluated.

**Keywords:** fluidized bed column, WWTP, biological sludge, carbonaceous support, Biofilm.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma geral de processo de uma indústria têxtil.....	15
Figura 2 – Fluxograma típico da ETE com tratamento físico-químico.....	16
Figura 3 – Primeiros corantes reativos derivados do cloreto cianúrico.....	19
Figura 4 – Microrganismos presentes em sistemas de lodo ativado .....	24
Figura 5 – Concentração relativa dos íons fosfatos em função do pH da solução do solo. ....	27
Figura 6 – Percentual do nitrogênio amoniacal em função do pH. ....	29
Figura 7 – Processos naturais da conversão biológica do nitrogênio.....	30
Figura 8 – Esquema de uma coluna de leito fluidizado.....	37
Figura 9 – Fluxograma das etapas do estudo.....	39
Figura 10 – Suporte carbonoso in natura sem ativação em aumento de 1x e 10x.....	41
Figura 11 – Unidade experimental .....	41
Figura 12 – Fluxograma da unidade experimental .....	43
Figura 13 – Amostra da cor do efluente sintético inicial de ajuste.....	52
Figura 14 – Arraste de sólidos em função da vazão do efluente na coluna.....	56
Figura 15 – Amostras do arraste do material suporte.....	56
Figura 16 – Microfotografias do suporte, ampliação de 100x (a), ampliação de 500x (b), ampliação de 1000x (c) e ampliação de 4000x (d).....	59
Figura 17 – Cor real do efluente A em UnPtCo para a tricromia de corantes R 40, R 176 e R 225 .....	60
Figura 18 – Amostras das cores do efluente A na fase 1 utilizando os corantes R 40, R 176 e R 225 .....	60
Figura 19 – Amostras representativas do efluente A da fase 2 com a tricromia dos corantes .	61
Figura 20 – Dados comparativos da DQO do efluente A entre as fases 1 e 2 utilizando os corantes R 40, R 176 e R 225 .....	61
Figura 21 – Redução de nitrogênio amoniacal do efluente A nas fases 1 e 2 com os corantes R 40, R 176 e R 225 .....	62
Figura 22 – Redução do fósforo total do efluente A nas fases 1 e 2 com os corantes R 40, R 176 e R 225.....	63
Figura 23 – Amostras microbiológicas durante as fases de testes realizados na coluna de leito fluidizado .....	64
Figura 24 – Amostras de degradação do corante azul turquesa R 15 utilizando O <sub>2</sub> 99% (fase 1)	65
Figura 25 – Amostras do corante R 15 utilizando ar atmosférico a 21% (fase 2).....	65
Figura 26 – Redução do corante R 15 com o efluente B utilizando aeração com O <sub>2</sub> 99% e ar 21% O <sub>2</sub> .....	66

Figura 27 – Redução da DQO com o efluente B nas fases 1 e 2 com corante R15 utilizando O <sub>2</sub> 99% e ar atmosférico na aeração microbiológica .....	67
Figura 28 – Remoção do nitrogênio amoniacal nas fases 1 e 2 com O <sub>2</sub> 99% e ar atmosférico 21% O <sub>2</sub> .....	67
Figura 29 – Redução do fósforo total com O <sub>2</sub> 99% e ar atmosférico 21%.....	68
Figura 30 – Ajuste da curva de calibração do corante R 15 .....	69
Figura 31 – Concentração do corante R 15 com O <sub>2</sub> a 99% (fase 1) e Ar 21% O <sub>2</sub> (fase 2) .....	71
Figura 32 – Redução do corante reativo R 15 entre as fases com O <sub>2</sub> 99% e ar atmosférico 21% O <sub>2</sub> .....	72
Figura 33 – Parâmetros analisados durante os experimentos na coluna de leito fluidizado ....	75
Figura 34 – Parâmetros comparativos da coluna de leito fluidizado e ETE para 68 horas .....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultado da composição química dos elementos.....	40
Tabela 2 – Dimensões do conjunto da unidade experimental .....	42
Tabela 3 – Formulação do efluente sintético (massa utilizada para um volume de 75,9 L). ...	48
Tabela 4 – Características dos parâmetros do efluente sintético inicial .....	49
Tabela 5 – Determinação do n° de Reynolds .....	50
Tabela 6 – Dados do inóculo adicionado na coluna .....	50
Tabela 7 – Composição dos materiais da coluna de leito fluidizado.....	51
Tabela 8 – Arraste de suporte na coluna.....	55
Tabela 9 – Histórico dos parâmetros, DQO, DBO e Cor do efluente de saída da ETE .....	57
Tabela 10 – Histórico dos parâmetros do fósforo total e nitrogênio amoniacal.....	57
Tabela 11 – Dados para a curva de calibração do corante R 15, no comprimento de onda $\lambda = 455$ nm. ....	69
Tabela 12 – Concentração do corante R 15 utilizando O <sub>2</sub> 99% e ar atmosférico (O <sub>2</sub> 21%).....	70
Tabela 13 – Dados de redução do corante reativo R 15, com sistema de aeração utilizando O <sub>2</sub> 99% (fase 1) e ar atmosférico 21% (fase 2).....	71
Tabela 14 – Dados experimentais de Cor e DQO dos efluentes testados na coluna .....	73
Tabela 15 – Resultados de eficiência de remoção de fósforo e nitrogênio amoniacal após os testes em coluna e o histórico da ETE.....	74
Tabela 16 – Dados previstos de DBO ajustados pela relação entre DBO/DQO .....	74
Tabela 17– Dados de vazão do efluente na entrada do reator biológico da ETE .....	76
Tabela 18 – Dados interpolados no tempo de detenção hidráulica do reator biológico de 68 h76	

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Relação de produtos e suas respectivas funções no processo de beneficiamento têxtil.....	18
Quadro 2 – Pesquisas realizadas na UFSC (LABMASSA) utilizando o lodo pirolisado de....	40
Quadro 3 – Dados informativos dos corantes utilizados na tricromia do efluente sintético A	44
Quadro 4 – Características químicas do corante R 15.....	45
Quadro 5 – Relação de produtos auxiliares utilizados na preparação do efluente sintético A e B .....	45

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLA

DQO	Demanda Química de Oxigênio
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
SST	Sólidos Suspensos Totais
pH	Potencial Hidrogeniônico
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
IVL	Índice Volumétrico de Lodo
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
LABMASSA	Laboratório de Transferência de Massa
PVC	Policloreto de Vinila
Re	Número de Reynolds
PtCo	Platina/Cobalto
MBR	Reator Biológico de Membrana
MBBR	Reator Biológico de Leito Móvel
RNA	Ácido Ribonucleico
DNA	Ácido Desoxirribonucleico
A/M	Relação Alimento Microrganismo
NPK	Nitrogênio Fósforo Potássio

## LISTA DE SÍMBOLOS

$P_{sf}$	Peso do suporte filtrado
$V_a$	Volume da amostra
$V_{te}$	Volume do tanque equalizador
$Q$	Vazão
$A$	Área
$v$	Velocidade
$V$	Volume
$\rho$	Massa específica
$\mu$	Viscosidade do fluido
$V_c$	Volume da coluna
$L_b$	Lodo biológico
$t_{dh}$	Tempo de detenção hidráulica
$s$	Segundo
$m^2$	Metro quadrado
$N$	Newton
$m/s$	Metros por segundo
$C_0$	Concentração inicial
$C_f$	Concentração final
$C_r$	Corante residual

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>10</b>
1.1. OBJETIVO GERAL.....	11
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	12
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>13</b>
2.1. DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA NO PLANETA .....	13
2.2. A INDÚSTRIA TÊXTIL.....	13
2.2.1. O consumo de água pela indústria têxtil .....	14
2.2.2. Efluentes da indústria têxtil.....	15
2.3. CORANTES REATIVOS .....	19
2.4. TRATAMENTO DE EFLUENTES POR PROCESSOS BIOLÓGICOS .....	20
2.5. COMPOSIÇÃO DO LODO BIOLÓGICO .....	21
2.5.1. Microrganismos presentes nos lodos ativados .....	22
2.6. PARÂMETROS DE CONTROLE DE UMA ETE .....	24
2.6.1. DQO e DBO .....	24
2.6.2. Fósforo .....	25
2.6.2.1. O ciclo do fósforo .....	26
2.6.2.2. Remoção de fósforo em ambientes aquáticos .....	27
2.7. NITROGÊNIO .....	27
2.7.1. Nitrificação.....	28
2.7.2. Desnitrificação .....	29
2.8. REMOÇÃO DE CONTAMINANTES EM EFLUENTES POR MATERIAIS ADSORVENTES .....	31
2.9. PIRÓLISE .....	31
2.10. BIOFILMES .....	32
2.10.1. Funcionalidade do biofilme .....	33
2.10.2. Materiais usados em biofilmes .....	34
2.11. FLUIDIZAÇÃO DE SÓLIDOS .....	34
2.11.1. Leito fixo .....	35
2.11.2. Leito móvel.....	35
2.11.3. Leito fluidizado.....	35
2.12. COLUNA DE LEITO FLUIDIZADO.....	36



<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>38</b>
3.1. CARACTERIZAÇÃO DO SUPORTE .....	39
3.2. CONSTRUÇÃO DA UNIDADE EXPERIMENTAL .....	41
3.2.1. Fluxograma da unidade experimental .....	42
3.3. SUPRIMENTO DE OXIGÊNIO.....	43
3.4. SUPRIMENTO DE AR ATMOSFÉRICO .....	43
3.5. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS EM ANÁLISE DE LABORATÓRIO .....	43
3.6. CORANTES UTILIZADOS NA PREPARAÇÃO DO EFLUENTE SINTÉTICO A ....	44
3.7. PRODUTOS QUÍMICOS AUXILIARES .....	45
3.8. MATERIAIS DE USO EM LABORATÓRIO .....	46
3.9. MÉTODOS.....	46
3.9.1. Arraste do suporte carbonoso.....	46
3.9.2. Preparação do efluente sintéticos A com os corantes reativos R40, R 176, R225 e o efluente B com os corantes reativos R15 .....	47
3.9.3. Determinação da vazão de operação .....	49
3.9.4. Introdução do inóculo na coluna de leito fluidizado.....	50
3.9.5. Coleta da amostra e realização das análises.....	51
3.9.6. Determinação do índice de coloração .....	51
3.9.7. Determinação da demanda química de oxigênio (DQO).....	52
3.9.8. Cálculo da DBO pelo fator de ajuste.....	52
3.9.9. Determinação do Fósforo total.....	53
3.9.10. Determinação do nitrogênio amoniacal .....	53
3.9.11. Procedimento de Esvaziamento da coluna .....	53
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>55</b>
4.1. OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DA ETE ENTRE 2016 A 2022 .....	56
4.2. AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO BIOFILME FORMADO .....	58
4.3. PARAMETROS DA COR, DQO, NITROGENIO E FÓSFORO DO EFLUENTE A ....	59
4.4. REDUÇÃO DOS PARÂMETROS DO EFLUENTE B COM USO DO CORANTE R 15 UTILIZANDO AERAÇÃO COM O <sub>2</sub> 99% E AR ATMOSFÉRICO O <sub>2</sub> 21% .....	64
4.4.1. Redução da cor do fluente B durante a fase 1 com uso do corante R 15 .....	64
4.4.2. Redução da cor do efluente B durante a fase 2 com uso do corante R 15 .....	65
4.4.3. Redução da DQO no efluente B com uso do corante R 15 .....	66
4.4.4. Redução do nitrogênio no efluente B com uso do corante R 15 .....	67

4.4.5.Redução do fósforo nas fases 1 e 2, com uso do corante R 15 .....	68
4.5. AJUSTE DA EQUAÇÃO DA RETA ATRAVÉS DA ABSORBÂNCIA E CONCENTRAÇÃO DO CORANTE R 15 .....	68
4.5.1.Resultado da concentração final do corante R 15 com uso do O <sub>2</sub> 99% e ar atmosférico 21% O <sub>2</sub> . 69	
4.6. QUANTIFICAÇÃO RESIDUAL DO CORANTE REATIVO R 15 COM O USO DO O <sub>2</sub> 99% (FASE 1) E AR ATMOSFÉRICO A 21% O <sub>2</sub> (FASE 2).....	71
4.7. DADOS COMPARATIVOS ENTRE OS EFLUENTES A E B COM PROCESSO DE TRATAMENTO DA ETE.....	73
4.7.1.Tempo de detenção hidráulica de operação na aeração biológica da ETE .....	75
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>78</b>
5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	79
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS.....</b>	<b>80</b>
6.1. ANEXO .....	90
PROCEDIMENTO ANALÍTICO PARA DETERMINAÇÃO DA DQO – ASTM 5220 D...	91
PROCEDIMENTO ANALÍTICO PARA DETERMINAÇÃO DO FÓSFORO TOTAL – ASTM 4500 P B .....	91
PROCEDIMENTO ANALÍTICO PARA DETERMINAÇÃO DO NITROGÊNIO AMONICAL – ASTM 4500 C .....	91
PROCEDIMENTO ANALÍTICO PARA DETERMINAÇÃO DA COR - ASTM 2120 C ....	92

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria têxtil possui um elevado consumo de água em seu processo de produção, sendo que a mesma não é incorporada no produto final, mas tem a função de servir como veículo para substâncias químicas utilizadas no processo de tingimento, acabamento e remoção de impurezas das fibras. Portanto, pode-se considerar que quase a totalidade da mesma remanesce como efluente do processo.

Na indústria têxtil, onde ocorrem os processos de desengomagem, tingimento e estamparia de tecidos, recorre-se ao elevado consumo de água para o acabamento destinado aos produtos para atender a demanda do mercado. Esse processo aplicado, pode ser contínuo ou batelada, dadas as etapas envolvidas que acabam gerando grandes volumes de efluentes com alta carga orgânica, que ao serem descartados sem o devido tratamento, causam grandes prejuízos ao ecossistema aquático (Tunussi; Sobrinho, 2015).

Os despejos líquidos de qualquer processo industrial, devem por lei, ser tratados de forma a minimizar os riscos que os resíduos contidos nos efluentes podem impactar negativamente os corpos receptores (rios lagos, estuários, etc.). Problemas ambientais vem sendo enfrentados por vários países ao redor do mundo em razão da contaminação de reservas dos aquíferos pela expansão demográfica. A elevada demanda pelo consumo de água na indústria têxtil leva à uma preocupação constante pelo gerenciamento da quantidade de compostos perigosos que são lançados ao meio ambiente (Silva, 2018).

Os corantes reativos empregados nos processos têxteis são os grandes responsáveis por contaminação em corpos hídricos. Apesar da forte ligação covalente estabelecida com as fibras celulósicas, a hidrólise ocorrida no processo de tingimento, resulta em perdas de aproximadamente 12 a 14% dos corantes, que são descartados no efluente (Wielewski *et al.*, 2020).

Os efluentes gerados no processo por corantes e aditivos químicos, são direcionados para a Estação de Tratamento de Efluentes (ETE), onde são tratados, convencionalmente, por processos biológico e o físico-químico. O tratamento biológico tem a função de reduzir a carga orgânica, avaliados globalmente pelos parâmetros DBO e DQO. O tratamento físico-químico tem como principal objetivo a remoção de cor, devido aos corantes sintéticos remanescentes do tratamento biológico, com aplicação de produtos químicos específicos, como coagulantes, descolorantes e floculantes (Queiroz *et al.*, 2011).

O uso de tecnologias que visam a redução de contaminantes em efluentes vem crescendo com alternativas que sejam viáveis economicamente, sendo uma alternativa promissora o uso de biofilmes. O uso de biofilmes permite aumentar a eficiência de remoção de corantes recalcitrantes, aumentar a eficiência de remoção de DBO e DQO e reduzir o choque de carga orgânica ao sistema, além de reduzir o volume gerado de lodo nas unidades de tratamento biológico. O uso de biofilme nesse processo permite inclusive a reutilização da biomassa e redução da área construída para atender a demanda de processo. Um trabalho apresentado por Mulinari (2018), realizado com alguns nutrientes, como nitrogênio, fósforo e potássio, foram impregnados em suporte derivado de lodo de ETE, onde apresentaram resultados muito promissores na redução de contaminantes do efluente. Tal efeito se deve a maior concentração bacteriana aderida ao suporte (Mulinari, 2018).

Neste trabalho é realizado o tratamento de efluentes têxteis via aplicação de biofilmes suportados em material carbonoso, em coluna de leito fluidizado.

### 1.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar a qualidade do efluente têxtil tratado via aplicação de biofilmes suportados em material carbonoso, resultante de craqueamento térmico do lodo seco da ETE, utilizando coluna de leito fluidizado.

## 1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construir uma unidade piloto baseada em uma coluna de leito fluidizado para tratamento de efluentes utilizando suporte de biofilmes;
- Avaliar através do uso de biofilmes, a redução do índice de cor, DQO, DBO, nitrogênio amoniacal e fósforo total, preparado com a tricromia dos corantes R 176, R 225 e R 40 (efluente A);
- Avaliar através do uso de biofilme a redução da cor, DQO, DBO, nitrogênio amoniacal e fósforo total do efluente sintético, preparado com o corante R 15 (efluente B);
- Comparar a redução do corante R 15 do efluente B, utilizando na fase 1 a aeração com oxigênio a 99% e na fase 2, com ar atmosférico 21%;
- Comparar os resultados obtidos com o efluente A e B, com os resultados da ETE da empresa Coteminas unidade Blumenau, entre 2016 a 2022.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão da literatura, com embasamento teórico sobre os efluentes gerados pela indústria têxtil e o seu impacto no meio ambiente. São abordados alguns materiais utilizados na adsorção para descontaminação de águas e efluentes. É apresentada uma breve descrição sobre o processo de pirólise de lodo da estação de tratamento de efluentes de uma indústria têxtil, resultando na obtenção do material suporte, caracterizado como um material carbonoso. É feita uma descrição dos métodos de tratamento biológico utilizados para os efluentes gerados na indústria têxtil, bem como os tipos de microrganismos que fazem parte do sistema de uma ETE. É abordada a questão dos corantes reativos utilizados na indústria têxtil e seus respectivos desafios no controle do efluente descartado ao meio ambiente. Também é feita uma breve explanação sobre a DQO, DBO e os nutrientes fósforo e nitrogênio, alvo de controle nos parâmetros analisados.

### 2.1. DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA NO PLANETA

A Demanda de água para consumo no planeta é distribuída de forma desigual, colocando a população num cenário muito preocupante. Nos países que sofrem com escassez de água, a crise por ela deve crescer exponencialmente, ameaçando o abastecimento de água potável para a população urbana e produção de alimentos. Neste contexto, o uso racional da água é uma questão mandatória para viabilizar o suprimento exigido para o crescimento da humanidade (Augusto *et al.*, 2012).

Estima-se que, de 2,5% de água doce no mundo, 68,9 % deste volume estão nas geleiras e cobertura permanente de neve, 29,9% estão em águas subterrâneas, 0,90% constituem a umidade do solo e composição de pântanos, restando apenas 0,3% para o consumo humano (Cisneiros, 2018).

### 2.2. A INDÚSTRIA TÊXTIL

A indústria têxtil brasileira ocupa o 5º lugar neste segmento no mercado mundial, e a 4º maior em vestuário, com uma produção média na ordem de 1,3 milhões de toneladas de artigos têxteis e 6,71 milhões de vestuário. O Brasil é autossuficiente na produção de algodão, produzindo desde a fibra até o varejo, entretanto a sua participação no mercado têxtil mundial representa baixa competitividade, correspondendo a apenas 0,3% em volume de negócios.

(Cavalcanti, 2022).

A indústria têxtil tem atuação em nível mundial, a fim de atender os mais diversos segmentos do mercado, seja vestuário, decoração, hospitalar, militar, dentre outros. Também exerce grande influência na questão sócio econômica de um país, influenciando os costumes e tendências do modo de vida em diferentes épocas (Fujita; Jorente, 2015).

A indústria têxtil utiliza em seu processo produtivo o algodão como sendo uma das principais matérias primas usadas para este fim, trazendo em sua cadeia de produção fortes impactos ambientais, indo desde à adubação no plantio e a utilização de agrotóxicos como os pesticidas, inseticidas e herbicidas (Toniollo; Zancan; Wüst, 2015).

### 2.2.1. O consumo de água pela indústria têxtil

De acordo com Lange (2004), a indústria têxtil apresenta um cenário preocupante com as fontes renováveis no quesito do uso da água, ou até mesmo com o reuso e a redução da contaminação ambiental, o que força a procura por novos processos de beneficiamento de tecidos, que resulte em um processo mais sustentável. Há também a preocupação com novas tecnologias na otimização de processos, almejando a redução de desperdícios e a mitigação do impacto ambiental. A presença de corantes residuais e uma ampla gama de compostos diluídos nos efluente líquidos, podem ser danosos ao meio ambiente.

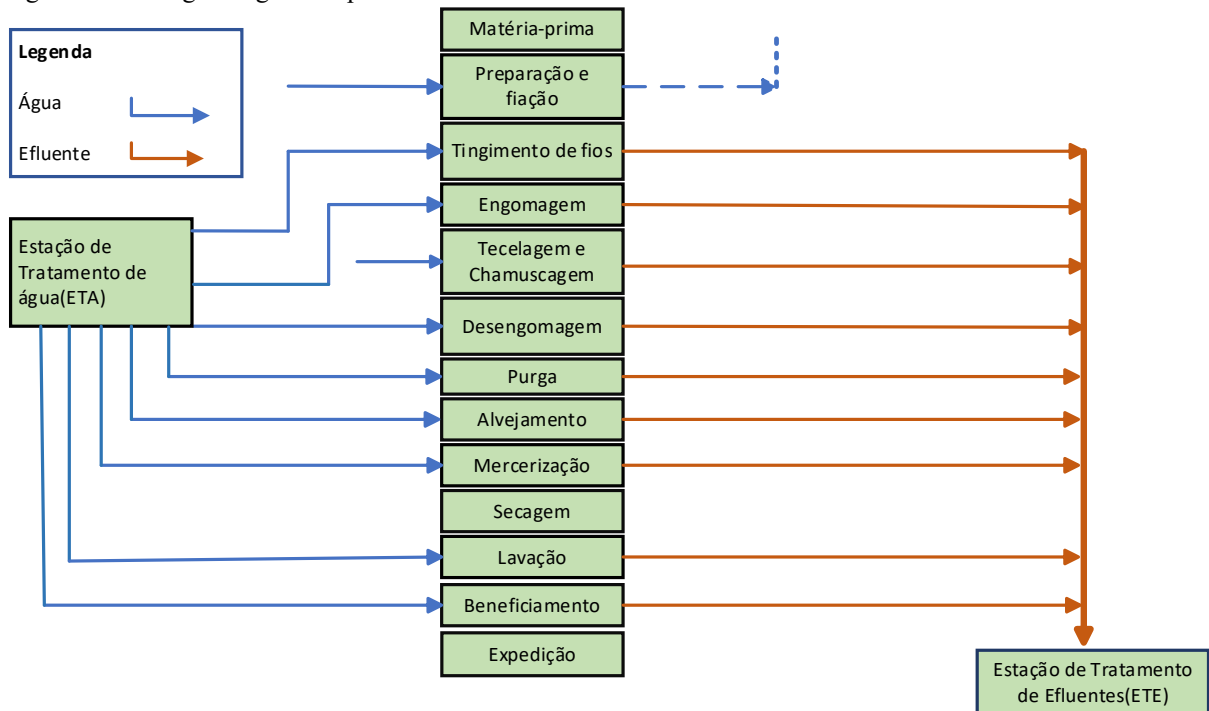
De acordo com Silva Filho *et al.* (2021), as indústrias têxteis possuem uma série de operações que envolve um grande consumo de água, destinado a remoção dos produtos utilizados no processo de beneficiamento, reduzindo através do enxague a concentração destes produtos.

O elevado consumo de água na indústria têxtil, está relacionado as condições precárias na manutenção dos equipamentos, apresentando defeito em acessórios, como válvulas, causando vazamentos de água fluindo com máquina parada, ou até mesmo maquinário operando em ciclo excessivamente longo causando dificuldade no reuso (Rocha *et al.*, 2021).

Conforme Macedo (2022), há uma questão relacionada ao desperdício de água referente a relação de banho no processo, onde é relacionado o volume utilizado de água em litros, pelo peso em kg do tecido processado. Também considera que haja um planejamento no beneficiamento, levando em conta os produtos químicos utilizados, equipamentos, processo, e as variáveis tempo, temperatura e pH. Com isso, evita-se excessos durante o banho, o que resultaria em elevados volumes de efluentes líquidos. A Figura 1 exibe um

fluxograma típico de uma indústria têxtil.

Figura 1 – Fluxograma geral de processo de uma indústria têxtil



Fonte: Adaptado de Mulinari (2018)

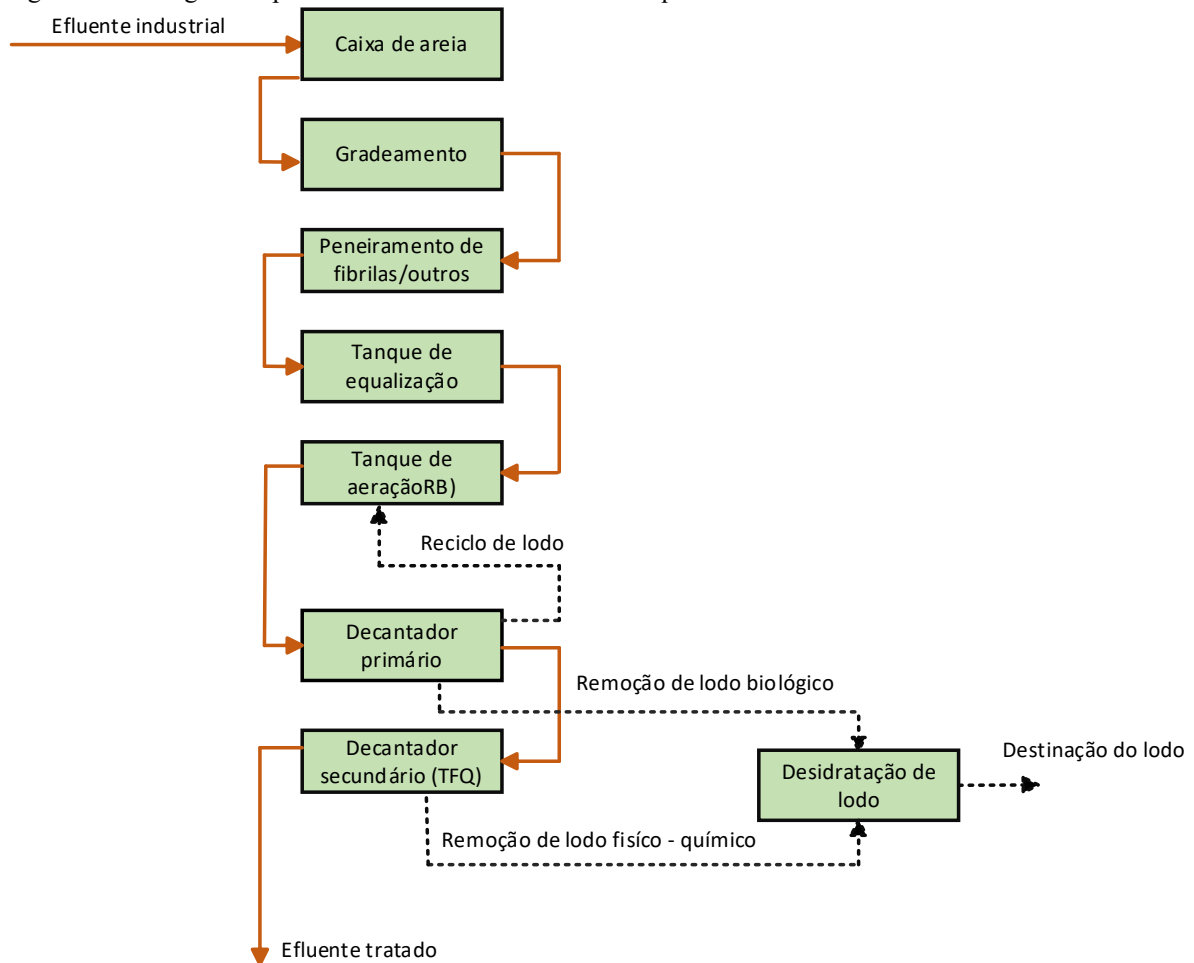
### 2.2.2. Efluentes da indústria têxtil

A indústria têxtil tem a responsabilidade ambiental, que impõe discussões acerca de tratativas que visam reduzir o impacto causado pelo processo de fabricação de seus mais diversos produtos. Ressalta-se que há poluição como a liberação de material particulado e compostos como óxido de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ ) e óxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), bem como os compostos orgânicos voláteis lançados na atmosfera. Destaca-se também a contaminação de mananciais por efluentes contendo compostos não biodegradáveis tratados de forma incorreta (Marquez, 2022). Nos processos de beneficiamento têxtil, além dos corantes utilizados no processo de produção, inclui também uma grande quantidade de produtos químicos, aditivos, que auxiliam na performance do produto acabado. Dentre os produtos podem ser citados, o peróxido de hidrogênio, álcalis, ácidos, sais, tensoativos, amaciantes, sequestrantes, fixadores dentre outros (Vasquez, 2008).

A Figura 2 exibe um esquema do tratamento de efluentes, com utilização de processo físico-químico, para a remoção de materiais recalcitrantes.



Figura 2 – Fluxograma típico da ETE com tratamento físico-químico



Fonte: Adaptado de Kunz *et al.*, (2002).

Segundo Gili (2015), “basicamente a carga poluidora do efluente têxtil é de natureza orgânica, podendo ocorrer carga inorgânica caso haja processo de estamparia, devido ao uso de pigmentos provenientes deste processo. Estudos realizados na Alemanha entre as indústrias têxteis de Baden Wurttemberg, encontraram como média do efluente, DQO de 1.700 mg O<sub>2</sub>/L e DBO de 550 mg O<sub>2</sub>/L (valor três vezes superior ao proveniente de águas residuárias comuns). A principal fonte desta carga contaminante dos efluentes têxteis provém do pré-tratamento, mais precisamente das operações de desengomagem e purga. Para tecidos planos de algodão, cerca de 50% da carga contaminante expressa em DQO é produzida pela eliminação de gomas; 40% são impurezas naturais, eliminadas pelos processos de purga e alvejamento, sendo os restantes, 10%, provêm dos produtos químicos usados nas diferentes etapas e eliminados com as lavagens. De modo geral, pode-se identificar os principais contaminantes como sendo agentes de engomagem e os tensoativos, presentes em

praticamente todas as etapas do processamento têxtil. Quanto aos detergentes, os mais usados são compostos contendo moléculas de alquil benzeno sulfonatos, formados por ligações químicas do tipo sulfônico, em que o enxofre se liga diretamente a um carbono da cadeia orgânica, sendo altamente resistente à ação química ou até mesmo biológica, acarretando problemas em sistemas de tratamento de efluentes” (Gili, 2015, p. 35).

O Quadro 1 relaciona alguns dos produtos químicos utilizados nos processos de tingimento e estamparia de tecidos, com suas respectivas funções, baseados na sua composição química.

Quadro 1 – Relação de produtos e suas respectivas funções no processo de beneficiamento têxtil

<b>Produto</b>	<b>Função</b>	<b>Base química mais usada</b>
Umectante	Homogeneiza e acelera a hidrofiliidade do tecido evitando diferentes tempos de contato de regiões de fibras com a solução de corante, o que provocaria manchas	Nonilfenol etoxilado; Ácidos graxos etoxilados
Antiespumante	Evita o transbordamento do banho pela formação de espuma em máquinas de alta agitação	Emulsões de silicone; Hidrocarbonetos alifáticos
Umectante de baixa espuma	Evita a formação de espuma sem necessidade de antiespumante	Álcool graxo etoxilado e propoxilado
Sequestrante	Evita que altos teores de metais na água precipitem os corantes ou manchem os tecidos	Acrilatos; Ácido cítrico
Ajustadores de pH	Condiciona a solução ao pH ideal para que ocorra a reação fibra/corante	Carbonato de sódio
Eletrólito	Induz o processo de reação do corante com a fibra aumentando a força iônica do meio, reduzindo a quantidade de corante perdido na solução após o tingimento	Cloreto de sódio; sulfato de sódio
Retardante de montagem ou igualizante	Evita o tingimento muito rápido nas partes mais expostas do tecido, uniformizando todas as regiões do tecido evitando possíveis manchas	Éteres poliglicólicos; Naftaleno sulfonato de sódio
Dispersante	Usado para dispersar corantes não solúveis em água	Tensoativos em geral

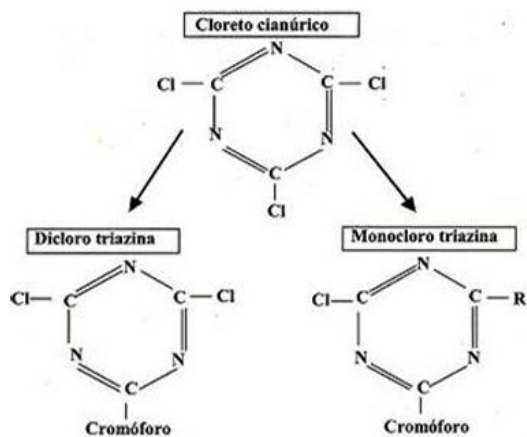
Fonte: Adaptado de Alcântara; Daltin (1995).

### 2.3. CORANTES REATIVOS

Os corantes de uma forma geral são compostos orgânicos. Possuem na estrutura um grupo cromóforo responsável pela cor atribuída a ele e um outro grupo funcional, responsável por fazer a ligação com a fibra. Na indústria têxtil, os corantes sintéticos são responsáveis pelo maior volume utilizado no processo de tingimento (Soler, 2013).

Muitos trabalhos realizados por vários anos em tingimento com maior solidez pela reação do corante com a celulose, levou a ICI (Imperial Chemical Industries) em 1956 a desenvolver os primeiros corantes reativos para celulose, sendo obtida a partir do cloreto cianúrico (Figura 3), tendo como grupos reativos a monoclorotriazina e diclorotriazina (Silva, 2008).

Figura 3 – Primeiros corantes reativos derivados do cloreto cianúrico



Fonte: Silva (2008).

Um corante reativo bastante utilizado na indústria têxtil que tingem por processo de esgotamento a 80 °C é o azul turquesa tendo como grupo funcional a monoclorotriazina (Sudiana *et al.*, 2021).

Segundo Leite *et al.* (2017), o corante reativo não reage somente com o algodão, mas também com a água, e uma quantidade igual a 0,6 g/L é o suficiente para ser detectado no efluente. Os corantes reativos são solúveis em água e são capazes de reagir com a fibras têxteis da celulose formando ligações do tipo covalente com grupo hidroxila (Vilela, 2018).

Os corantes reativos não fixados nas fibras são hidrolisados pela reação com a água, e quando lançado num curso d'água sem um tratamento preliminar, altera as condições ambientais do

meio, impedindo a passagem de luz solar, e por persistir no meio acaba comprometendo toda a cadeia alimentar, por atingir níveis consideráveis tóxicos (Ninad, 2021).

Conforme citado por Marquez (2022), a maior parcela de corantes sintéticos fabricados no mundo é destinada às indústrias têxteis, sendo que somente 50 a 70% dessa quantidade é fixada na fibra dos tecidos, representando um sério problema de poluição e desperdício.

De acordo com Queiroz *et al.* (2019), os corantes reativos da família dos azocorantes, devido a sua recalcitrância, geram aminas aromáticas através da clivagem reductiva das ligações por azobactérias. Um corante é considerado recalcitrante devido a sua estrutura química possuir complexas ramificações, com múltiplos anéis aromáticos e compostos heterocíclicos (Mulinari, 2018).

Os corantes azóicos com ligação  $-N=N-$  (Figura 4), com forte aplicação no segmento têxtil, tem no efluente de tingimento como característica a elevada toxicidade em ambientes naturais, devido ao efeito recalcitrante ao meio em que se encontra. Esse tipo de corante tem baixa degradação microbiológica, requerendo a necessidade de tratamento físico ou químico (Amorim *et al.*, 2009).

Há uma variedade de bactérias, fungos e leveduras que possuem a capacidade de degradar alguns corantes de cadeia complexa do tipo azo e antraquinona, muito utilizados em tingimento têxtil, além de outras substâncias recalcitrantes (Machado, 2006).

#### 2.4. TRATAMENTO DE EFLUENTES POR PROCESSOS BIOLÓGICOS

Nas indústrias têxteis o processo mais utilizado no tratamento de efluentes é o de lodo ativado. Neste processo, o reator biológico opera com o fornecimento de oxigênio para a população de bactérias aeróbias promoverem a oxidação da matéria orgânica presente no efluente. O reator necessita manter uma quantidade de biomassa de maneira relativamente estável, através da recirculação contínua de lodo, evitando o arraste de sólidos imposta pela vazão de alimentação. A partir de um segundo tanque que auxilia a sedimentação, o lodo na fase endógena retorna para o reator biológico como forma de reativação da massa bacteriana, para que a eficiência do tratamento seja mantida (Sperling, 2002).

Outros tipos de reatores que podem ser utilizados no tratamento biológico são os de membranas (MBR) e os reatores de leito móvel (MBBR). Estes tipos de reatores requerem uma área menor para a operação, com espaço significativamente reduzido, oferecendo uma grande vantagem operacional. O custo de reator MBR, entretanto, requer grande investimento na

aquisição, devido ao alto custo das membranas utilizadas na retenção da biomassa. O custo operacional também é bastante elevado, devido à saturação das membranas, exigindo a limpeza periódica e rotinas complexas de substituição das mesmas. Sem manutenção, o tratamento poderá ficar comprometido, devido à deficiência na transferência de oxigênio no sistema, podendo causar mortandade da massa biológica. O reator MBBR requer um investimento imediato, porém dispõe de maior vida útil e baixa manutenção, em função da alta resistência do material suporte, fabricados em polietileno, denominados de bio-mídia (Santos *et al.*, 2017).

Outros processos vêm sendo aplicados com bastante êxito no tratamento de efluentes, são os reatores de batelada sequencial. Nestes reatores, ocorre a formação de grânulos de microrganismos, com grande vantagem de sedimentação mais rápida, quando comparado com sistemas de tratamento convencional, permitindo a exclusão dos decantadores para sedimentação do lodo. Isso traz uma outra vantagem na implementação do projeto, fazendo com que a área de construção seja reduzida em torno de 25%. Há também um benefício operacional a ser considerado, pois poderá ser mantido concentrações de biomassa mais elevadas dentro do reator (Mata; Pinheiro; Lourenço, 2017).

## 2.5. COMPOSIÇÃO DO LODO BIOLÓGICO

A composição dos lodos no tratamento de efluentes tem valores muito aproximados, sendo a maioria de compostos orgânicos de origem biológica, em base seca de aproximadamente 60%. Elementos químicos como o nitrogênio, fósforo, cálcio, enxofre e compostos contendo silicatos e aluminatos, também fazem parte desta composição, incluindo ainda, metais pesados como zinco, chumbo, cobre, cromo, níquel, cádmio e mercúrio. A água no lodo varia em porcentagem, podendo chegar a 95% (Rulkens, 2008).

O lodo biológico é formado pelo crescimento bacteriano no próprio reator e posteriormente sedimentado no fundo de um decantador, onde retorna uma fração deste lodo através de reciclo novamente para o reator, promovendo a ativação. A outra parte do lodo é removido do decantador em razão do volume gerado pelo crescimento dos microrganismos. O efluente clarificado proveniente do decantador, com carga orgânica significativamente reduzida, necessita da remoção da coloração pela presença residual de corantes, muitas vezes recalcitrantes, que não foram degradados biologicamente no reator. Neste caso, necessitam de uma fase subsequente do tratamento, requerendo adição dos produtos químicos específicos para promover a coagulação, descoloração e floculação. Como resultado, o lodo gerado nessa fase do

tratamento, sedimenta no fundo de um decantador, devido à maior densidade que possui em relação à fase líquida. O lodo físico-químico, sedimentado neste tanque, segue para ser descartado junto com o excesso de lodo biológico, tendo como destino um aterro industrial (Sonai, 2012).

#### 2.5.1. Microrganismos presentes nos lodos ativados

Os microrganismos dos lodos ativados necessitam de energia para suas funções vitais. Diferente dos organismos autótrofos, onde estes produzem o seu próprio alimento através da energia da luz solar ou energia química, por outro lado, os organismos heterótrofos necessitam de uma fonte externa de alimentos, sendo estas, oriundas de fonte de carbono orgânico para a sua sobrevivência. Durante esta fase de sobrevivência, ocorre a síntese de novas células, passando pela fase de crescimento, estabilização e decaimento. No processo de degradação da matéria orgânica, para que ocorra a oxidação, o carbono orgânico participa na reação como doador de elétrons no seio do sistema, tendo o oxigênio como acceptor desses elétrons. O resultado deste processo é a redução significativa da DBO no tratamento de efluentes industriais ou mesmo em águas residuárias municipais (Benetti, 2013).

Os microrganismos tem sempre uma maior afinidade por compostos de cadeia linear onde torna mais simples a degradação do substrato para a obtenção de energia necessária para a reprodução celular. Em efluentes com alta carga orgânica, normalmente se aplica uma etapa que antecede o sistema aeróbio, fazendo desta forma a oxidação e descoloração através de microrganismos anaeróbios, condicionando alguns compostos indesejáveis a serem oxidados numa etapa subsequente, com microrganismos aeróbios. Há determinados tipos de corantes de difícil remoção em sistemas de tratamentos convencionais, impondo desta forma, o uso necessário do tratamento físico-químico, pois nesta etapa são adicionados os produtos que atuam na remoção de cor (Peixoto, 2013).

O sistema de lodo ativado consiste em uma complexa associação de microrganismos que tem em sua composição, bactérias, algas, protozoários e metazoários. Estes seres vivem em um ambiente condicionado à sobrevivência, em função da disponibilidade de alimentos na forma de DBO. Quando estão na presença de oxigênio livre são classificados como aeróbios, e quando não há oxigênio livre disponível classificam-se como anaeróbios. Com a oxidação da matéria orgânica, o efluente resultante possui a carga orgânica significativamente reduzida. Dependendo da operação do sistema, mudanças bruscas como a alteração do pH, DBO e temperatura de

entrada no reator biológico, podem levar o sistema ao colapso, resultando na perda ou alteração de determinados microrganismos, acarretando em arrastes de lodo no decantador e impactando no corpo receptor, caso não haja um tratamento posterior para reter este material no sistema (Oliveira *et al.*, 2009).

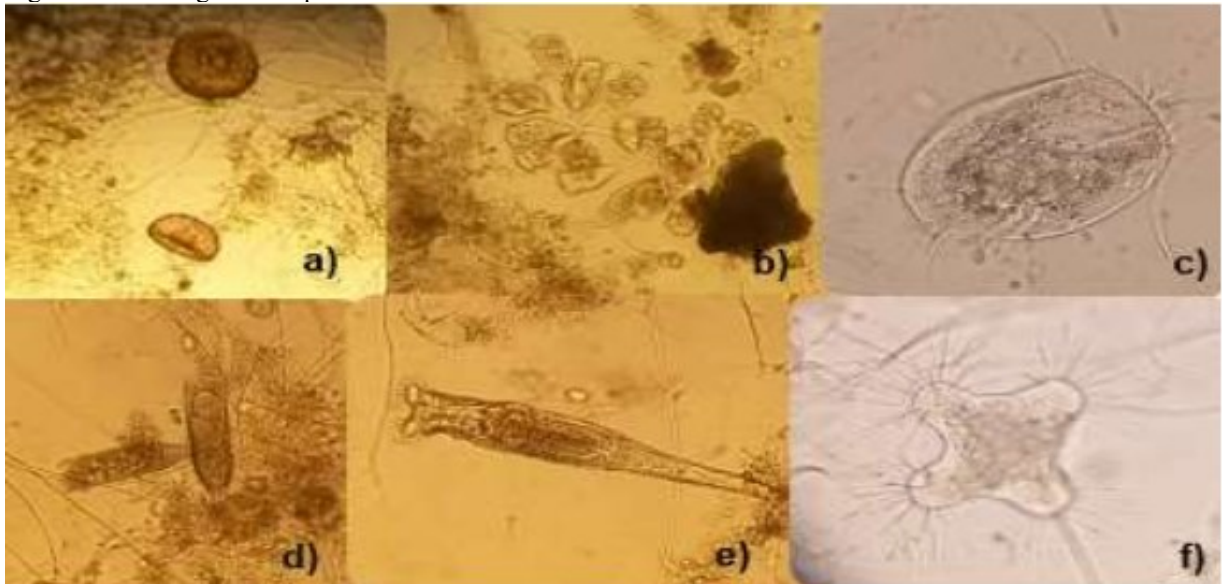
As bactérias, sendo mais abundante no sistema, são divididas em formadoras de floco, onde são responsáveis pela aglomeração de flocos densos e remoção da matéria orgânica, nitrogênio, fósforo e enxofre. Outro tipo de bactéria que tem grande influência no desempenho no sistema são as filamentosas, cuja a função principal é sustentação do floco, assegurando a estrutura e firmeza, resultando num efluente clarificado (Rocha, *et al.*, 2016). A predominância de bactérias filamentosas, principalmente do tipo *Thiothrix I*, exige controle para conter sua proliferação da espécie, para evitar que não ocorra o intumescimento do lodo. Esse descontrole promoverá a má sedimentação do lodo e elevados índices volumétricos de lodo (IVL). Devido ao seu tamanho alongado, com grande área de abrangência, há uma resistência para que ocorra o agrupamento entre os flocos do lodo, causando então, o arraste da biomassa pelo vertedor do tanque de sedimentação (Yano; Gomes, 2013).

Os protozoários incluídos na microfauna dos lodos ativados, são divididos em 4 subgrupos. No caso das amebas, elas estão presentes com alta relação A/M disponíveis no sistema. A tecameba coexiste num ambiente de carga orgânica reduzida, alta idade do lodo e boas condições de nitrificação. Os flagelados, característicos de fase inicial de processo de tratamento, estão associados a elevada carga orgânica e baixa aeração. Os ciliados livres, que possuem locomoção, estando associados a alta concentração de bactérias livres e boa redução de matéria orgânica. Os ciliados fixos, possuem características de se aderirem ao floco biológico, em razão do pedúnculo que possuem e sua predominância se deve a alta carga orgânica. Os micrometazoários são seres mais complexos encontrados em lodo ativado, sendo que sua presença está relacionada a elevada idade de lodo e a baixa toxicidade, devido a sua fragilidade e a intolerância de mudança brusca do meio (Rocha *et al.*, 2016).

A Figura 4 destaca os principais microrganismos presentes em efluentes, como alguns protozoários e metazoários, caracterizando o lodo biológico.



Figura 4 – Microrganismos presentes em sistemas de lodo ativado



(a) Tecameba. (b) Ciliado Fixo, *Vorticella*. (c) Protozoário ciliado livre, *Euplotes sp.* (d) Ciliado fixo, *Vagnicola*. (e) Micrometazoário, Rotífero. (f) Protozoário ciliado fixo, *Acineta*.  
Fonte: (Rocha *et al.*, 2016).

## 2.6. PARÂMETROS DE CONTROLE DE UMA ETE

Os principais parâmetros que são controlados no lançamento de efluentes pela indústria têxtil está relacionado ao índice de coloração, sendo este devido ao uso de corantes utilizados no processo de tingimento. A DBO e DQO são oriundas principalmente da desengomagem dos fios e também dos produtos auxiliares usados no beneficiamento. O nitrogênio, na forma amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ), e o fósforo na forma de fosfatos, ortofosfatos e poli fosfatos, estão presentes em alguns produtos químicos auxiliares, como uréia, surfactantes, ou até mesmo adicionados intencionalmente para equilibrar a relação entre a carga orgânica adentrado no tratamento biológico na ETE, objetivando a manutenção celular dos microrganismos, sendo essencial a presença destes elementos, porém com controle rigoroso para evitar crescimento desenfreado, que possa prejudicar a vida aquática (Gerhardt; Reisdorfer; Cardoso, 2018).

### 2.6.1. DQO e DBO

A Demanda Química de Oxigênio (DQO) é um parâmetro físico-químico que mede o consumo de oxigênio ( $\text{O}_2$ ) em uma certa amostra de esgoto industrial ou doméstico. O Oxigênio é necessário para oxidar e estabilizar os compostos biodegradáveis e não biodegradáveis

presentes no meio líquido, sem que haja intervenção de microrganismos. Na oxidação, há maior facilidade de os compostos serem oxidados quimicamente do que biologicamente, levando a DQO sempre maior em relação a DBO (Demanda Biológica de Oxigênio). Em situações em que a DQO é igual ou menor que o dobro da DBO, significa que na maior parte o material é biodegradável, podendo nesse caso receber tratamento biológico. No caso onde a DQO for maior que o dobro da DBO, a maior parte do material a ser tratado, provavelmente não é biodegradável, sendo recomendável o uso de tratamento físico-químico (coagulação, floculação, decantação) (Beltrame, 2000).

Segundo Gili (2015), estudos realizados entre algumas indústrias têxteis na Alemanha, apresentaram uma DQO com média de 1.700 mg O<sub>2</sub>/L e DBO de 500 mg O<sub>2</sub>/L, considerado três vezes superiores em relação as águas residuárias comuns. Ainda de acordo com Gili (2015), os contaminantes principais dos efluentes têxteis tem origem no pré-tratamento, precisamente em operações de desengomagem e purga.

De acordo com Ramos *et al.* (2020), a análise de DQO, em função do menor custo da análise de laboratório, é o método mais utilizado para a determinação do teor de matéria orgânica em uma dada amostra. Tanto a DQO quanto a DBO possuem rigorosa exigência por parte dos órgãos ambientais.

Conforme citado por Junior *et al.* (2018), a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) é a quantidade de O<sub>2</sub> requerido pelos microrganismos para a degradação ou oxidação da matéria orgânica, presentes tanto em esgotos domésticos quanto industrial. O nível de poluição está diretamente ligado a quantidade de O<sub>2</sub> disponível no meio líquido, para que os microrganismos aeróbios catalisem através desse gás, as reações de oxidação dos compostos orgânicos em subprodutos.

De acordo com Santos *et al.* (2015), é importante manter uma quantidade de nutriente na proporção 100:5:1(DBO:N:P), ou seja, para cada 100 partes de DBO deverá conter 5 partes de nitrogênio e uma parte de fósforo.

#### 2.6.2. Fósforo

O fósforo é um elemento químico essencial para os seres vivos. Como um constituinte da membrana celular, ele participa de inúmeros processos metabólicos, atuando no armazenamento e processamento de informações genéticas, fazendo parte do RNA e DNA. Em razão disso, o fósforo é um elemento que propicia elevada DBO, exigindo controle

ambiental, o que torna limitante o descarte na natureza (Maroneze *et al.*, 2019).

De acordo com Baccarin *et al.* (2013), o fósforo por estar presente em efluentes sanitários e indústrias, principalmente na forma iônica (ânion fosfato), é responsável por uma das principais causas da eutrofização em ambientes aquáticos. O fósforo também poderá advir do ácido fosfórico e seus derivados (Nascimento, 2018).

Os detergentes utilizados em processos têxteis, mesmo que sejam biodegradáveis, não se isentam de fósforo em sua composição, o que favorece o processo de eutrofização em mananciais, se não forem removidos por algum método de tratamento (Gili, 2015).

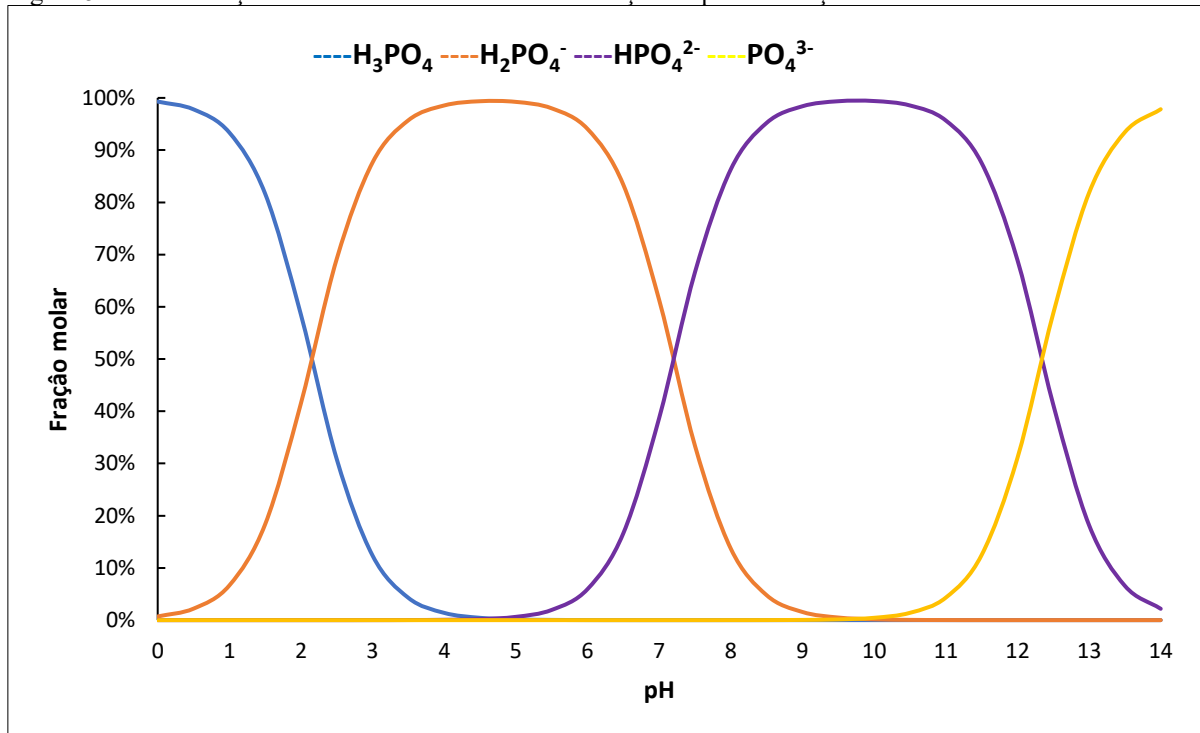
#### 2.6.2.1. O ciclo do fósforo

O ciclo do fósforo se dá pelo processo que envolve absorção pelas plantas, a reciclagem pelos resíduos de plantas e animais e a reciclagem por processos de mineralização-imobilização (Klein, 2012).

Segundo González (2021), o fósforo é encontrado principalmente em sedimentos no solo, causado pela desintegração do leito rochoso continental. Podem ser agrupadas na forma orgânica e inorgânica. O fósforo orgânico é obtido biologicamente da atividade microbiana e das raízes das plantas tornando biodisponíveis, como fosfato de inositol, fosfolipídios e ácidos nucleicos. O fósforo inorgânico procede de materiais primários que derivam diretamente de materiais degradados e materiais secundários, que se forma através da precipitação do P com Al, Fe e Ca. Há um equilíbrio dinâmico entre o P orgânico e inorgânico com o P solúvel na solução do solo, principalmente como ortofosfatos primários  $\text{PO}_4^{3-}$  ou secundários  $\text{HPO}_4^{2-}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ . A forma varia de acordo com o pH do solo, sendo que em meio ácido predomina as formas  $\text{H}_3\text{PO}_4$  e  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , enquanto que em pH superior a 7,2 predomina a forma  $\text{HPO}_4^{2-}$ .

Na Figura 5 está relacionado o comportamento do ortofosfato no solo em função da alteração o pH.

Figura 5 – Concentração relativa dos íons fosfatos em função do pH da solução do solo.



Fonte: Brady & Weil; (Adaptado de Gonzalez 2021).

#### 2.6.2.2. Remoção de fósforo em ambientes aquáticos

De acordo com Nascimento (2018), um dos métodos de remoção do fósforo em efluentes se dá pelo uso de plantas aquáticas (macrófitas), tendo como mecanismo a capacidade pelo qual algumas espécies possuem em absorver poluentes e nutrientes do meio, inclusive pelo biofilme que se estabelece no sistema radicular.

Conforme citação de Maronese *et al.* (2014), o fósforo pode ser removido do meio líquido pelo processo de adsorção, a exemplo de alguns materiais de resíduos agrícola, como cascas de arroz, amendoim, café e coco, obtendo uma eficiência na ordem de 90% de remoção.

### 2.7. NITROGÊNIO

O nitrogênio é um elemento essencial para os seres vivos, compondo as estruturas das proteínas e dos ácidos nucleicos. Existe de várias formas em efluentes, tanto molecular N<sub>2</sub>, amoníaco (NH<sub>3</sub>), íon amônio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), nitrito (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) e nitrogênio orgânico (Neto, 2011).

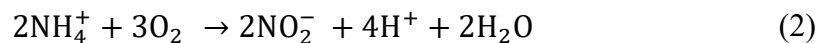
A participação do nitrogênio no ambiente é conhecida como o ciclo do nitrogênio, garantindo a disponibilidade para os seres vivos e liberando-o novamente para o meio. Nesse ciclo ocorrem cinco processos principais: fixação, amonificação, assimilação, nitrificação e desnitrificação (Cao, 2018).

### 2.7.1. Nitrificação

A temperatura tem influência direta na atividade biológica, sendo diretamente proporcional à reação de nitrificação e desnitrificação, onde a faixa de temperatura ideal está entre 30 e 36 °C (Mezzomo, 2019).

As bactérias responsáveis pelo processo de nitrificação são pertencentes ao gênero *Nitrosomonas*, na grande maioria, onde convertem o nitrogênio amoniacal em nitrito utilizando o oxigênio como receptor de elétrons. A segunda etapa da nitrificação ocorre pela presença de bactérias predominantemente do gênero *Nitrobacter*, oxidando o nitrito em nitrato. São bactérias autotróficas que utilizam o CO<sub>2</sub> como fonte de carbono (Santos, 2019).

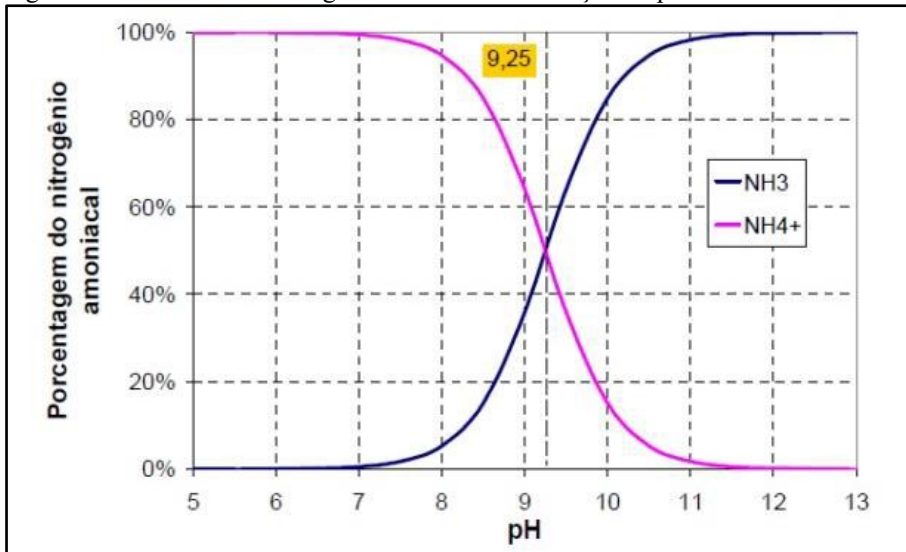
Através das equações (2) e (3) ocorrem respectivamente etapas da oxidação do nitrogênio amoniacal a nitrito e nitrato (Perry, 2020).



Conforme citado por Silva (2018), o nitrogênio amoniacal na forma livre é a mais tóxica para a vida aquática. Em elevada concentração, pode levar a mortandade de peixes e outros seres, devido a sua maior toxicidade quando comparada com a forma ionizada. A distribuição da forma de nitrogênio varia com o pH, sendo que valores situados entre 6 e 8, praticamente todo o nitrogênio amoniacal está na forma de íon amônio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>). Entretanto para valores de pH mais alcalinos, o equilíbrio muda de direção, predominando na forma de amônia livre (NH<sub>3</sub>).

A Figura 6 exibe o comportamento do nitrogênio amoniacal quando o pH do meio é alterado.

Figura 6 – Percentual do nitrogênio amoniacal em função do pH.



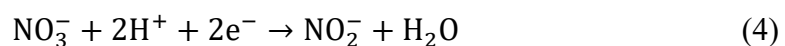
Fonte: Silva, 2018 (Adaptado de Metcalf & Eddy, 2014).

### 2.7.2. Desnitrificação

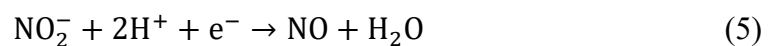
A desnitrificação é um processo biológico que envolve a respiração anóxica. É realizado por bactérias heterotróficas, onde o nitrato sofre redução, passando a óxido nítrico (NO), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) e nitrogênio gasoso ( $\text{N}_2$ ) (Zoppas, 2016).

No processo de desnitrificação todas as reações são catalisadas por uma enzima específica. As enzimas associadas neste processo são redutases, no qual são sintetizadas diante de condições ambientais anóxicas (Guimarães, 2017). As reações que envolvem o processo de desnitrificação (4) a (7) estão dispostas nas seguintes etapas a seguir:

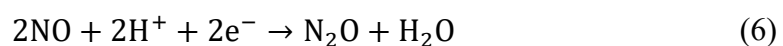
Redução do nitrato a nitrito



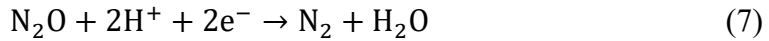
Redução do nitrito a óxido nítrico



Redução do óxido nítrico a óxido nitroso



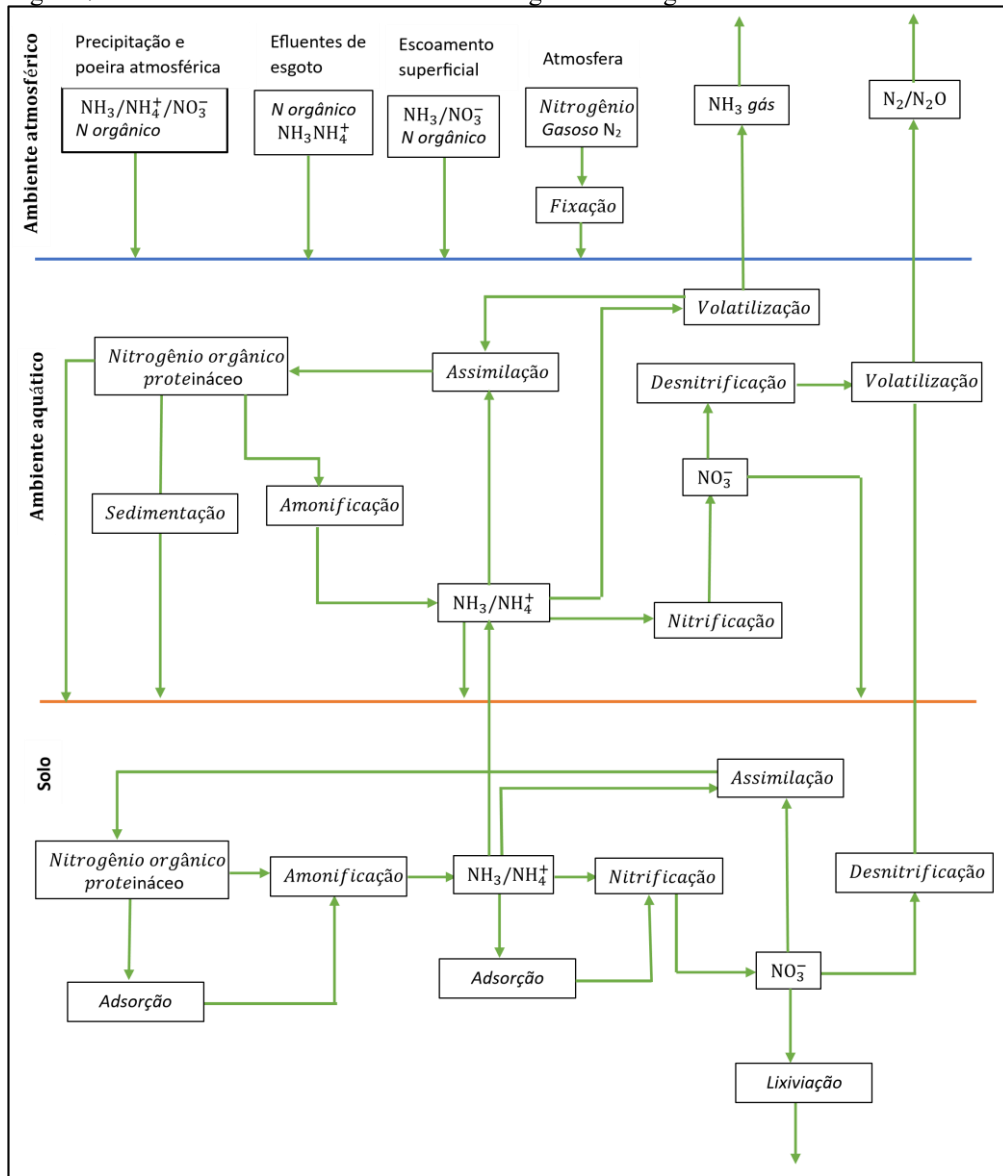
Redução do óxido nitroso a nitrogênio gasoso



Em concentrações de oxigênio(O<sub>2</sub>) superiores a 0,5 mg/L, podem ocorrer a inibição da desnitrificação, devido a disponibilidade de O<sub>2</sub>, fazendo com que as bactérias desnitrificantes respirem aerobicamente mudando o aceptor de elétrons do NO<sub>3</sub><sup>-</sup> para O<sub>2</sub> (Silva, 2018).

O fluxograma da Figura 7 exhibe o ciclo do nitrogênio nas suas mais variadas formas na natureza.

Figura 7 – Processos naturais da conversão biológica do nitrogênio.



Fonte: Adaptado de Metcalf & Eddy (2016).

## 2.8. REMOÇÃO DE CONTAMINANTES EM EFLUENTES POR MATERIAIS ADSORVENTES

Estudos com aplicação de minerais como a zeólita e bentonita comprovaram experimentalmente resultados altamente satisfatórios como uso de adsorventes. Para metais como cobre, cromo, cádmio e magnésio, estes adsorventes apresentaram-se como uma eficiente rota na recuperação de água residuária. Devido ao baixo custo de obtenção, e por possuírem altas áreas de superfície, fazem destes materiais uma grande alternativa de sucesso em trabalhos científicos (Alseno *et al.*, 2019).

O uso da casca de abacaxi é um exemplo que também pode ser utilizado como matéria prima para uso na produção de carvão, através do processo de pirólise, devido as suas características estruturais compostas por aproximadamente 68% de fibras celulósicas e sílica, tendo um efeito relevante na aplicação em tratamento de efluentes contaminados, removendo metais pesados e corantes sintéticos (Antunes *et al.*, 2018).

Cascas secas de bananas trituradas, também são uma opção de uso para adsorção de metais pesados de origem das indústrias metalúrgicas nos processos de galvanização. Açúcares e vitaminas presentes na casca da banana interagem com os íons metálicos dos efluentes proporcionando a adsorção destes elementos (Santana; Santos; Resende, 2020).

A utilização de materiais adsorventes para a remoção de corantes sintéticos e outras substâncias tóxicas, impõe uma grande vantagem no emprego de certos materiais, como carvão, zeólitas, argilas e hidrogéis a base de polissacarídeos, pois apresentam o benefício da falta de interação com substâncias tóxicas na produção destes materiais. Apesar da grande capacidade de adsorção que estes materiais possuem, há limitação pelo alto custo de operação e geração de resíduos contaminados após a adsorção (Jena *et al.*, 2019).

## 2.9. PIRÓLISE

A pirólise é um dos processos de grande importância na obtenção de compostos químicos. Neste processo, a biomassa sofre uma degradação térmica, em razão das altas temperaturas empregadas, na ausência de oxigênio. O processo pirolítico, resulta na obtenção de basicamente 3 produtos; sendo uma fração de fase sólida de material carbonoso; uma fração volátil composta por gases e substâncias orgânicas de baixo peso molecular, e por fim, uma fração líquida de água condensada e fase orgânica semivolátil, conhecida como bio-óleo



(Migliorine *et al.*, 2013).

Segundo Teixeira (2014) a pirólise é um dos processos mais vantajosos empregado na eliminação de compostos orgânicos industriais e urbanos. Este processo foi melhor compreendido na década de 80, onde houve estudos através de pesquisas científicas, cujo método era o uso de temperatura entre 380 – 450 °C em atmosfera inerte.

O processo de pirólise pode ser uma alternativa de extrema importância para minimização do volume de resíduos destinados aos aterros sanitários, onde no processo pirolítico, materiais como plásticos, papelão, tecidos, borrachas sintéticas, podem ser utilizados como combustível para geração e recuperação de energia, gerando subprodutos com várias aplicações (Weiss *et al.*, 2021).

## 2.10. BIOFILMES

É um fenômeno que ocorre espontaneamente na natureza envolvendo a aderência de microrganismos em superfícies sólidas tidas como suporte, sempre que houver a presença de água como veículo. A fração de água é a mais representativa, podendo variar de 70 a 95% da massa total do biofilme (Souza *et al.*, 2011).

No processo biológico de tratamento de efluentes, a ação de microrganismos é imprescindível na operação e funcionamento de um reator biológico. A atividade microbiana no interior do líquido utiliza diversos substratos orgânicos como alimento para suas funções vitais, obtendo a energia necessária para reprodução celular. A biomassa quando aderida a uma superfície tende a apresentar uma maior eficiência no tratamento devido à grande área de atuação dos microrganismos aderidas a ela, tornado na maioria das vezes, reatores mais eficientes e compactos, destinado a tratar efluentes líquidos com menor redução de espaço físico (Jacobs, 2015).

Os estudos sobre a formação de biofilmes tinham como objetivo evitar seu desenvolvimento. O fato se deve em razão de problemas causados por restrição à transferência de massa em membranas filtrantes, corrosão de materiais em tubulações e equipamentos, comprometimento da qualidade de água em abastecimento, dentre outros (Mulinari, 2018).

Para o início da formação do biofilme, uma determinada superfície sólida deve apresentar uma superfície de contato com porosidade irregular, de maneira a favorecer as condições para que os microrganismos fiquem aderidos e interajam com a superfície, dando

início ao crescimento celular. Essa multiplicação das células forma grandes colônias, tornando ainda maiores ao ponto de agregarem resíduos, nutrientes e outros microrganismos, resultando desta maneira na formação do biofilme (Santos, 2009).

Através de estudos foi comprovado que microrganismos aderidos em uma determinada superfície (suporte), sofrem menos interferência do que aqueles suspensos, devido as suscetíveis alterações ambientais, como temperatura, pH, concentração de nutrientes, produtos metabólicos e substâncias tóxicas (Souza *et al.*, 2011).

As fases de formação do biofilme são divididas em três mecanismos (Silva, 2026).

- Adesão na superfície do suporte por bactérias metabolicamente ativas;
- Agregação do biofilme em superfícies que é controlada pela quantidade de nutrientes disponíveis para a replicação celular e para a produção de exopolissacarídeos;
- Formação de biofilmes devido aos nutrientes orgânicos aderidos na superfície, sendo que geralmente bactérias não aderem às superfícies em situação de deficiências de nutrientes.

#### 2.10.1. Funcionalidade do biofilme

As bactérias que vivem em colônias aderidas ao suporte nas camadas mais profundas tem pouca disponibilidade de alimentos em relação aquelas que estão na camada mais externas, que por sua vez tem mais acesso aos alimentos. A competitividade por alimento ocorre de maneira estressante, induzindo na queda de reprodução celular e tendo como consequência a queda na taxa de geração de lodo (Souza *et al.*, 2011).

Segundo Mulinari (2018), o tamanho da partícula do suporte influencia na transferência de massa, pois partículas de densidade maior que a do fluido precipitam, e as de menor densidade flutuam, implicando em maior velocidade de fluidização. O biofilme promove interação com microrganismos de mesma espécie, ou até mesmo de espécies diferentes, o que permite realizar processos metabólicos mais diversificados e eficientes.

Os reatores que operam com uso de biofilme, oferecem maior estabilidade de biomassa, garantindo uma idade de lodo mais elevada, quando comparado a reatores com microrganismos dispersos. Esses reatores operam com alta velocidade terminal das partículas de sedimentação, promovendo maior clarificação no efluente. Geralmente este tipo de reator exige uma área pequena de instalação, em função do alto desempenho. O uso de suporte biofilme em reatores

que operam em plantas de tratamento de efluentes, apresenta a exclusiva vantagem de tratar xenobióticos, ou seja, compostos químicos reconhecidos como danosos ao corpo humano (Boessmann *et al.*, 2006).

#### 2.10.2. Materiais usados em biofilmes

Uma imensa variedade de materiais oferece condições como meio de suporte para o desenvolvimento de culturas bacterianas, como cascalho, plásticos, borracha, espumas, carvão ativado, dentre outros, desde que possuam área superficial, alta rugosidade e hidrofobicidade como características favoráveis a fixação (Mulinari, 2018). Ainda de acordo com Mulinari (2018), a rugosidade e a porosidade são os fatores que mais afetam a formação de biofilmes, pois, são os que oferecem a maior área superficial, contribuindo para a fixação de microrganismos.

O uso do carvão em pó ativado a partir da casca de coco, parece ser uma alternativa interessante, pois é um rejeito que pode ser aproveitado como suporte para essa aplicação (Ketinny; Xavier, 2020).

Outra aplicação que vem sendo muito utilizada para formação de biofilme, é a cinza da casca de arroz, pois a demanda por esse cereal cresce ano após ano e grande quantidade desse rejeito é aproveitado como uma fonte de energia em geradores de vapor. As cinzas oferecem um problema quanto a destinação, pois acaba sendo um passivo ambiental. Nesse caso, uma das alternativas é a utilização desse material como suporte em tratamento de efluente biológico. Resultados obtidos através de estudos em efluentes, se mostraram favoráveis ao uso da aplicação realizadas com cinzas da casca de arroz, especificamente na redução da turbidez, cor, fósforo e nitrogênio, atestando que pode estar aliado a questão adsortiva da cinza (Schimitt *et al.*, 2016).

### 2.11. FLUIDIZAÇÃO DE SÓLIDOS

Técnicas utilizadas em revestimento de partículas podem estar presente no regime de fluidização, onde o processo pode se dar num leito de partículas envolvendo duas ou mais fases. Há uma transição nesse processo envolvendo o leito fixo e fluidizado, ocorrendo no momento em que a fluidização é delineada pela velocidade mínima de fluidização, que é a menor velocidade na qual todas as partículas do leito estão suspensas pelo fluido. A queda de pressão no leito diminui com o aumento da velocidade superficial contínua do fluido de entrada,

transcorrido o tempo em que o fluido está fixo (Oliveira, 2015).

De acordo com Wanderley (2022), a fluidização está entre as melhores técnicas para promover o contato entre sólidos e fluidos em reatores químicos, devido a melhor eficiência em relação aos outros métodos empregados. Este processo pode ser por 3 técnicas elementares: leito fixo, leito móvel e leito fluidizado.

#### 2.11.1. Leito fixo

Funciona como um empacotamento de determinado sólido dentro do reator, com variação granulométrica distribuída entre 2 mm e 100 mm. Neste processo o fluido é circulado através dos vazios do leito, debaixo para cima ou vice versa. O método, sem a renovação dos sólidos promove caminhos preferenciais do fluido e problemas de obstrução, causando problemas de baixo rendimento, como menor taxa de transferência de calor e de massa no sistema.

#### 2.11.2. Leito móvel

É uma técnica que supera o leito fixo, onde as partículas sólidas são alimentadas pelo topo do leito e removidos pela base, sendo que o fluido pode descer ou subir pelo leito. Oferece melhor contato sólido-fluido, mas ainda assim apresenta os mesmos problemas do leito fixo, embora em menor proporção.

#### 2.11.3. Leito fluidizado

Nessa técnica, a interação se dá em melhores condições devido a interação entre as fases sólido-fluido, quando comparada ao leito fixo e leito móvel. O processo ocorre pela suspensão de partículas finamente divididas em uma corrente de fluido ascendente, suficiente para promover a suspensão e movimentação destas partículas no meio reacional. Esse método, em razão do melhor contato entre as fases reagentes, facilita a elevação dos coeficientes de transferência de calor e de massa, tornando o meio reacional com características pseudo-homogêneas (Wanderley, 2022).

Conforme citado por Costa *et al.* (2015), a imobilização de microrganismos em biofilmes em suporte no meio fluidizado condiciona operações com maiores concentrações bacterianas, podendo ser eliminados o reciclo do lodo concentrado. Este processo oferece melhor estabilidade, principalmente em picos de alta carga orgânica, melhorando a eficiência na

remoção de DQO e produção de lodo, possibilitando concentrar a biomassa em seu interior, melhorando o contato entre suporte e substrato.

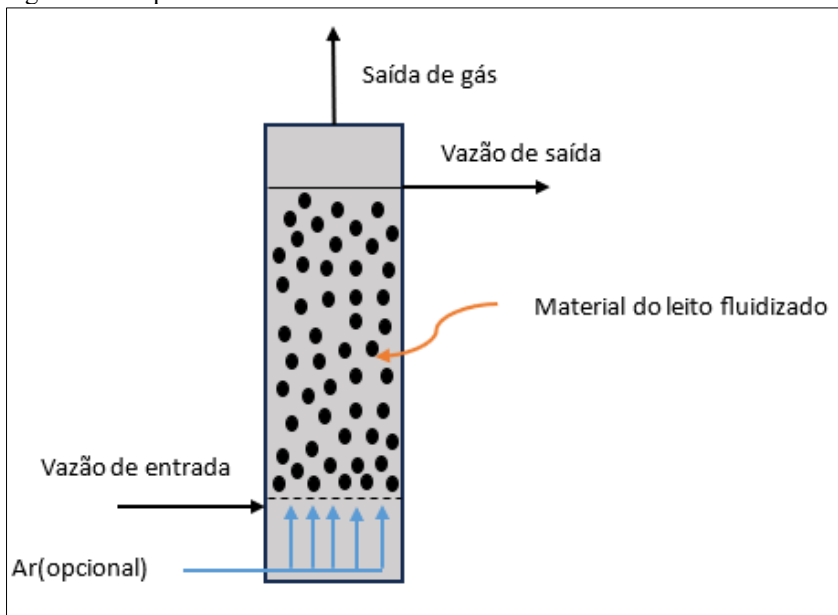
## 2.12. COLUNA DE LEITO FLUIDIZADO

A coluna de leito fluidizado é um equipamento destinado ao processo de fluidização, envolvendo várias operações entre as mais diversas aplicações na indústria. Tem a vantagem de promover uma boa interação entre os materiais no seio do leito, desprovido de zona “morta” no interior da coluna. A técnica de fluidização utilizada na indústria inclui os processos de craqueamento catalítico, torrefação de grãos, catálise de reações químicas, secagem e adsorção. O processo se dá pelo movimento ascendente de um fluido, gás ou líquido, através de um leito de partículas, geralmente esta última sendo a fase mais densa. O movimento do fluido na coluna adquire velocidades suficientes para suportar o peso das partículas, sem que elas sejam arrastadas. Os diversos materiais que constituem a fase densa devem ser levados em consideração, pois é importante para o dimensionamento da coluna de forma a proporcionar melhor interação entre as fases líquido-partícula e partícula-partícula (Santos; Walesiuk; D’Amélio, 2019).

Segundo Martins (2015), quando a vazão do fluido no interior da coluna for suficiente alta para atingir o regime de fluidização, parte do material particulado é arrastado para fora e retornado pela base, configurando o processo como leito fluidizado circulante.

O reator de leito fluidizado é similar ao de leito fixo sob vários aspectos, mas é diferenciado pelo movimento do fluido (líquido ou gasoso) ascendente no leito, fazendo com que o material de enchimento se mantenha em suspensão (Metcalf & Eddy, 2016). A Figura 8 apresenta um esquema de processo de uma coluna de leito fluidizado.

Figura 8 – Esquema de uma coluna de leito fluidizado

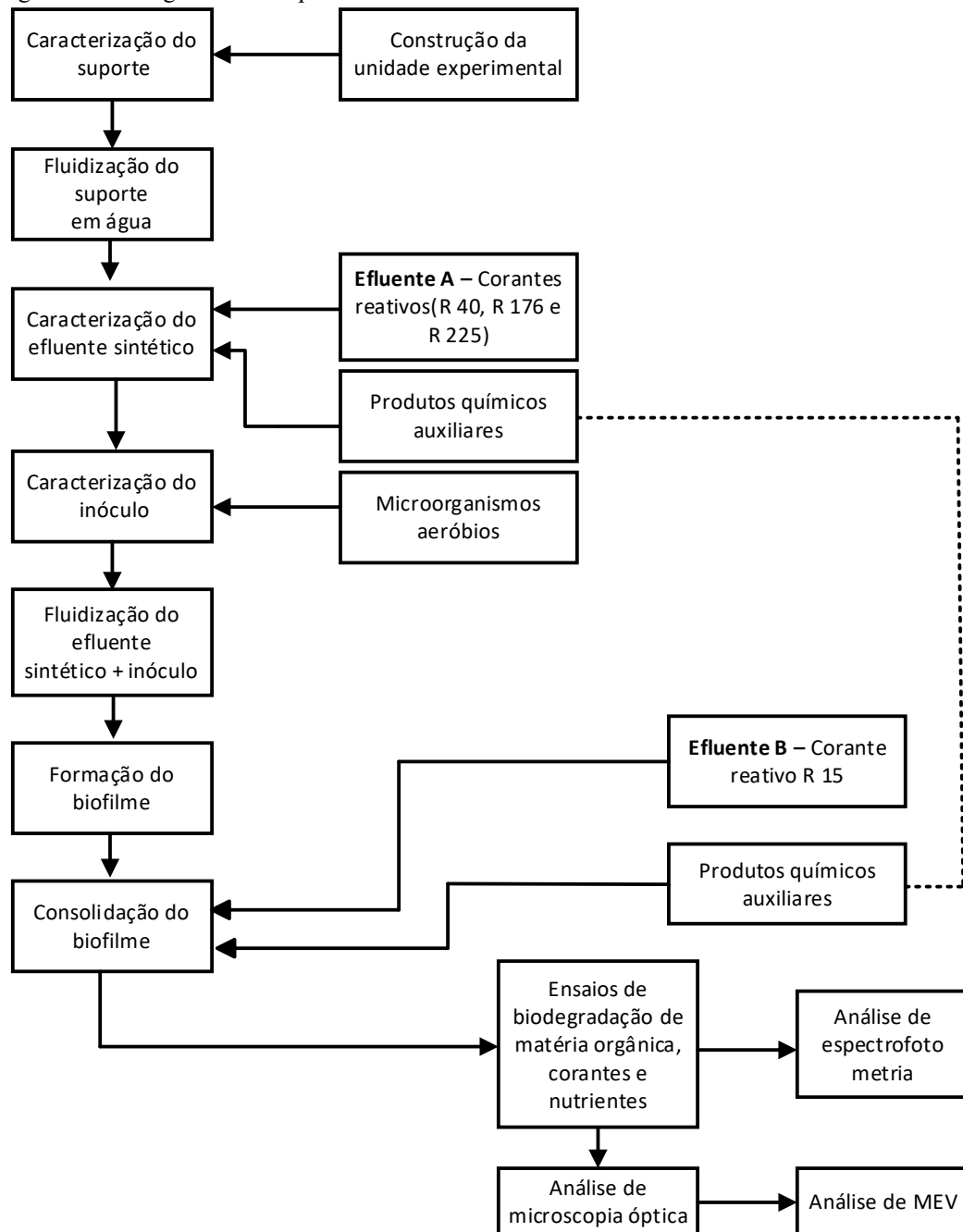


Fonte: (Adaptado de Metcalf & Eddy, 2016).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão descritos os procedimentos utilizados na realização das etapas experimentais da coluna de leito fluidizado, via aplicação de biofilmes suportados em material carbonoso, visando a redução da Cor, DQO, DBO, nitrogênio e fósforo. Descreve-se os materiais necessários para a realização dos ensaios. Destaca-se o método de preparação do efluente sintético, com a combinação dos produtos químicos auxiliares e os corantes reativos empregados neste estudo. É apresentado o método de funcionamento do conjunto experimental através de fluxograma, bem como o procedimento de alimentação da coluna durante as etapas analisadas. A sequência da execução do estudo está apresentada na Figura 9. Os materiais destinados a utilização do experimento estão descritos nesse capítulo.

Figura 9 – Fluxograma das etapas do estudo



### 3.1. CARACTERIZAÇÃO DO SUPORTE

No intuito de usar o lodo pirolisado para remover corantes e demais poluentes em efluentes têxteis, alguns pesquisadores realizaram algumas pesquisas científicas, conforme o Quadro 2. O suporte foi obtido pelo processo de pirólise do lodo da Estação de Tratamento de Efluentes da Empresa Coteminas, Blumenau SC, sob a patente INPI PI0703182-3 A2.

Segundo Mulinari (2018), este material apresenta uma densidade de  $2,2792 \text{ g/cm}^3$ , área



superficial de 135,4 m<sup>2</sup>/g diâmetro médio de 150,89 µm, volume total de poros de 0,26 cm<sup>3</sup>/g e ponto de carga zero no pH 7,5.

Quadro 2 – Pesquisas realizadas na UFSC (LABMASSA) utilizando o lodo pirolisado de efluentes da indústria têxtil para remover contaminantes no efluente final

<b>Contaminante principal</b>	<b>Processo</b>	<b>Referência</b>
Corantes têxteis	Adsorção	VASQUEZ (2008)
Cor de efluente têxtil	Biofilme	VASQUEZ (2012)
Corante Reactive Red 2	Adsorção	SONAI (2012)
Corantes têxteis	Adsorção	LEAL (2014)
Corante RR 141	Biofilme	SILVA (2016)
Cor e matéria orgânica de efluente têxtil	Biofilme	MULINARI (2018)

Fonte: Adaptado de Mulinari (2018)

A Tabela 1, descreve o percentual da composição química dos elementos, referente ao material carbonoso, obtido pelo craqueamento térmico do lodo.

Tabela 1 – Resultado da composição química dos elementos

<b>Elemento</b>	<b>% atômica</b>
Oxigênio	43,175
Carbono	37,724
Nitrogênio	12,667
Alumínio	2,427
Fósforo	1,849
Silício	1,597
Cálcio	0,466
Potássio	0,096

Fonte: Mulinari (2018).

A amostra utilizada para a realização do procedimento experimental foi produzida em fevereiro de 2022. Este material é *in natura* (não ativado) e foi mantido lacrado em tambor de 200 L, para manter sua integridade.

A Figura 10 representa o suporte carbonoso empregado no experimento.

Figura 10 – Suporte carbonoso in natura sem ativação em aumento de 1x e 10x



### 3.2. CONSTRUÇÃO DA UNIDADE EXPERIMENTAL

A montagem da unidade experimental foi nas dependências da empresa Coteminas, unidade Blumenau e instalada para a realização do trabalho, ao entorno do reator biológico da ETE. A Figura 11 representa a unidade experimental utilizada durante o processo.

Figura 11 – Unidade experimental



Os equipamentos da unidade experimental são compostos por bomba centrífuga de 0,3 cv; inversor de frequência tanque cilíndrico/cônico de acrílico; coluna em material de PVC; rotâmetro para gases capacidade 10 L/min; válvulas de controle de vazão em PVC; tubos de PVC e mangueiras em polipropileno trançada. As dimensões estão disponíveis na Tabela 2.

Tabela 2 – Dimensões do conjunto da unidade experimental

<b>Componentes</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>Diâmetro (cm)</b>	<b>Volume (L)</b>
Coluna de leito fluidizado	143	19,8	44
Tanque do efluente sintético	36	39	31,9

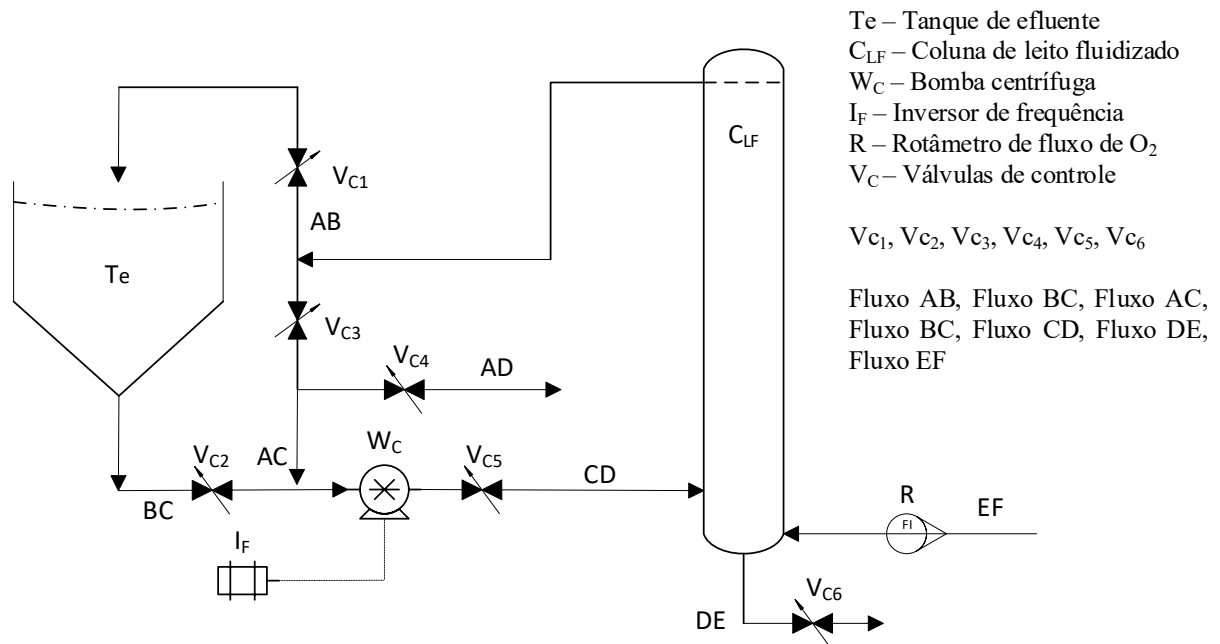
### 3.2.1. Fluxograma da unidade experimental

O processo inicia com a operação de uma bomba centrífuga alimentando o efluente do fundo do tanque equalizador até a base da coluna, em fluxo ascendente, vertendo pelo topo em regime contínuo. No topo, o efluente sai da coluna por ação da gravidade e se desloca até o tanque de preparação onde o ciclo é reiniciado.

Na corrente AB, a bomba desloca o efluente sintético da coluna até o tanque de preparação do efluente sintético. A corrente BC transfere o efluente sintético do tanque para a coluna, com a abertura das válvulas  $V_{c2}$  e  $V_{c5}$ . Através do controle por válvulas, é possível direcionar a corrente AC para recircular o efluente sem passar pelo tanque, com bloqueio da válvula  $V_{c1}$ ,  $V_{c2}$ ,  $V_{c4}$  e abertura das Válvulas  $V_{c3}$  e  $V_{c5}$ . A corrente AD permite a medição de vazão do sistema, com abertura da válvula  $V_{c4}$ . A corrente DE permite o descarregamento do material da coluna, com o bloqueio da válvula  $V_{c5}$ , para evitar o refluxo do fluido da coluna para o tanque, com a abertura da válvula  $V_{c6}$  para liberar o material na corrente DE. A corrente EF é do oxigênio, introduzido pela base da coluna, onde é misturado com o efluente do tanque.

No esquema ilustrativo apresentado na Figura 12, é apresentado o fluxo entre o tanque de efluente sintético e a coluna de leito fluidizado.

Figura 12 – Fluxograma da unidade experimental



### 3.3. SUPRIMENTO DE OXIGÊNIO

O oxigênio utilizado na aeração microbiológica da coluna de leito fluidizado é proveniente de um tanque criogênico (O<sub>2</sub> liquefeito) o qual alimenta o reator biológico da ETE. O produto é fornecido pela Linde® e possui grau de pureza de 99%. A alimentação no sistema é por despressurização na saída do tanque criogênico e após passar por um evaporador atinge a temperatura ambiente. O oxigênio foi alimentado pela base da coluna, concorrente com a vazão de alimentação do efluente, em fluxo ascendente a uma vazão de 2,0 L/min.

### 3.4. SUPRIMENTO DE AR ATMOSFÉRICO

O ar atmosférico utilizado é proveniente de um compressor industrial do tipo lobular marca Wayne®, localizado na ETE e distribuído por uma rede de ar comprimido com pressão de 7,0 kg/cm<sup>2</sup>, com regulador de vazão na entrada da coluna.

### 3.5. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS EM ANÁLISE DE LABORATÓRIO

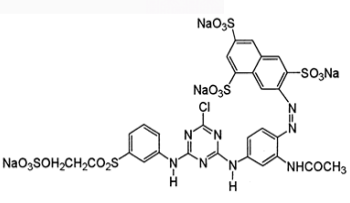
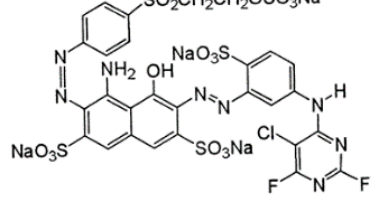
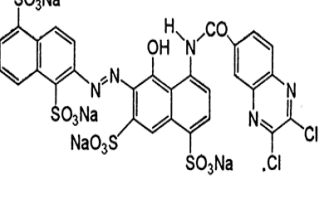
Bomba de vácuo, Funil de Buchner, kitassato, papel filtro quantitativo, Bécher de 1.000 e 500 mL, balde em polietileno graduado de 20 L, cubetas de vidro de 25 mL, cone Imhoff, pipeta

graduada de 10 mL, espátulas, espectrofotômetro HACH® modelo DR3900, reator DQO HACH®, microscópio óptico, estufa, dessecador, balança de precisão, centrífuga.

### 3.6. CORANTES UTILIZADOS NA PREPARAÇÃO DO EFLUENTE SINTÉTICO A

O Quadro 3 apresenta as propriedades química dos corantes reativos que foram utilizados na preparação do efluente A. Os corantes foram empregados para avaliação dos resultados na fase 1, de adaptação do biofilme, quanto na fase 2, de consolidação do biofilme.

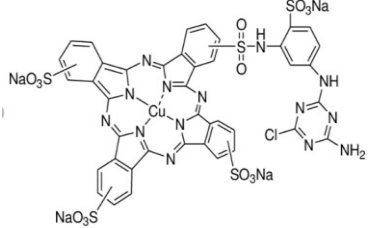
Quadro 3 – Dados informativos dos corantes utilizados na tricromia do efluente sintético A

Corante	Reactive Yellow 176 C.I.132465	Reactive Navy Blue 225 C.I.205069	Reactive Red 40 C.I.18204
Grupo reativo	Aminonaftaleno	Diaminobenzenosulfônico	Aminonaftaleno
Grupo cromóforo	Monoazo	Diazo	Monoazo
Peso molecular	1025,26 (g/gmol)	1047,22(g/gmol)	946,56(g/gmol)
Fórmula química	$C_{29}H_{21}ClN_8Na_4O_{16}S_5$	$C_{28}H_{17}ClF_2N_8Na_4O_{16}S_5$	$C_{29}H_{13}Cl_2N_5Na_4O_{14}S_4$
Estrutura química			

Fonte: World dye variety (2012)

Para a realização dos ensaios realizados com o efluente B, as informações referentes ao corante R 15 estão descritas no Quadro 4.

Quadro 4 – Características químicas do corante R 15 utilizado no efluente B

Grupo reativo	Estrutura molecular	Fórmula química	Estrutura química
Ftalocianina	Monoclorotriazina	$C_{45}H_{35}ClCuN_{14}Na_4O_{14}S_5$	

Fonte: World dye Variety (2012)

### 3.7. PRODUTOS QUÍMICOS AUXILIARES

A relação dos produtos utilizados na preparação do efluente sintético seguem descritos no Quadro 5.

Quadro 5 – Relação de produtos auxiliares utilizados na preparação do efluente sintético A e B

Produto	Função	Fabricante
Amarelo drimaren CL2R	Corante reativo	Clariant
Azul marinho EBNA gran	Corante reativo	Dystar
Vermelho levafix E-4B	Corante reativo	Dystar
Azul turquesa GF	Corante reativo	Dystar
Sera quest C-SEA	Sequestrante de cálcio e magnésio	Dystar
Levafix IND PLDR50	Estabilizador de pH	Dystar
DT 389	Emulgador não iônico	Ekonova
Sidertex U51	Surfactante aniônico	Siderquímica
Soft 4041	Amaciante catiônico graxo	Hanier
Goldmul BV	Umectante	Golden Química
Uréia	Agente higroscópico	Proquigel Química
Carbonato de sódio	Fixador de tingimento/esgotamento	BSC Química
Cloreto de sódio	Fixador de tingimento/impregnação	Refisa
VM SIZE KZ	Agente de engomagem	VMZ Química
Hidróxido de sódio	Alcalinizante	Buschle & Lepper
Fertilizante NPK	Nutrientes fósforo, nitrogênio e potássio	Bertoncelo

### 3.8. REAGENTES DE USO EM LABORATÓRIO

Reagente de Nessler, reagente molibdovanadato de amônio, estabilizador mineral, Álcool polivinílico, persulfato de amônio, ácido sulfúrico 5,25 N, fenolftaleína, hidróxido de sódio 6,0 N.

### 3.9. MÉTODOS

A unidade experimental foi construída de acordo com as condições hidrodinâmicas do processo, afim de minimizar o arraste dos sólidos na coluna e adequar ao procedimento experimental.

Inicialmente foram realizados os testes hidrodinâmicos no sistema experimental, compreendendo a coluna e o tanque, utilizando somente água e as partículas de suporte. Foi acrescentado a quantidade de 2.200 g do suporte na coluna, afim de avaliar o comportamento do material frente a vazão de operação. Em função do arraste ocorrido, a redução da vazão foi necessária, para maximizar o material na coluna e condicionar o processo. As amostras foram coletadas a cada 48 horas e quantificado a massa de suporte arrastada para cada vazão medida.

#### 3.9.1. Arraste do suporte carbonoso

A cada alteração da vazão no regime de escoamento da coluna, foi substituída a água do tanque do efluente sintético. O cálculo do arraste do suporte para cada ciclo, foi obtido pela divisão da massa do suporte retido no filtro, sendo dividido pelo volume de amostragem de 0,2 L da amostra filtrada, multiplicado pelo volume do tanque de preparação do efluente. O arraste foi calculado com base na equação (8).

$$Arraste/ciclo = \frac{P_{sf}}{V_a} * V_t \quad (8)$$

Onde,  $P_{sf}$  é o peso do suporte (g),  $V_a$  é o volume da amostra (L) e  $V_t$  é o volume do tanque do efluente sintético (L). O percentual de arraste foi calculado pela equação (9).

$$\% Arraste = \frac{Arraste/ciclo}{Arraste total} * 100 \quad (9)$$

### 3.9.2. Preparação do efluente sintético A com os corantes reativos R40, R 176, R225 e o efluente B com os corantes reativos R15

Para a preparação dos efluentes A e B, a concentração inicial dos corantes foi pesada e adicionada somente no início de cada fase. Durante toda a fase experimental a concentração do corante foi sendo reduzida em função do tempo. Por outro lado, os produtos químicos foram pesados de acordo com a Tabela 3, sendo adicionados no tanque equalizador na mesma quantidade a cada intervalo de tempo analisado, após cada coleta.

No efluente A (fase 1), após a adição do suporte, produtos auxiliares e corantes na coluna, deu-se início a adaptação da biota para à formação do biofilme no suporte, sendo mantida durante 18 dias.

No efluente B (fase 2), o início foi após 20 dias do término da fase 1. Com o biofilme já consolidado, a concentração conhecida de corantes foi adicionada no efluente e a dosagem dos auxiliares químicos, adicionados após a retirada de cada amostra para obtenção dos resultados. Para ambas as fases, a coleta das amostras foi realizada a cada 48 horas.

Na Tabela 3 estão apresentados os produtos com as respectivas quantidades utilizadas nas formulações. Os dados foram baseados no volume útil da unidade piloto. Os produtos utilizados são auxiliares de tingimento em tecidos de algodão, viscose e mistura poliéster-algodão. A formulação foi ajustada de modo a representar os parâmetros de processo da ETE ocorridas entre 2016 e 2022, conduzindo a operação da unidade experimental o mais próximo da operação da ETE no período mencionado. A preparação do efluente sintético B para analisar o corante R 15, foi realizado após o esgotamento do volume de 44 L, por sifonagem no topo da coluna, afim de eliminar traços dos corantes utilizados no efluente A. Os mesmos produtos químicos auxiliares foram mantidos com a mesma dosagem e mesma quantidade.



Tabela 3 – Formulação do efluente sintético (massa utilizada para um volume de 75,9 L).

<b>Produto</b>	<b>Efluente A fase 1 (mg/L)</b>	<b>Efluente A fase 2 (mg/L)</b>	<b>Efluente B fases 1 e 2(mg/L)</b>
Corante amarelo R 40	3,43	5,27	-
Corante marinho R 176	13,18	20,42	-
Corante vermelho R 225	24,77	38,34	-
Corante turquesa R 15	-	-	47,43
Sera quest C-SEA	32,94	32,94	32,94
Levafix IND PLDR50	17,39	17,39	17,39
DT 389	20,42	20,42	20,42
Sidertex U51	24,24	24,24	24,24
Soft 4041	11,86	11,86	11,86
Goldmul BV	24,77	24,77	24,77
WT	17,52	17,52	17,52
Uréia	23,72	23,72	23,72
Carbonato de sódio	5,27	5,27	5,27
Cloreto de sódio	10,54	10,54	10,54
VM SIZE KZ	197,63	197,63	197,63
Hidróxido de sódio	65,88	65,88	65,88
Ácido fórmico	46,11	46,11	46,11
Fertilizante NPK	65,88	131,75	39,53

Os ensaios com o corante R 15 realizados com o efluente B, foram testados separadamente dos testes com o efluente A, onde foi utilizado os corantes da tricromia (R 176, R 225 e R 40) descritos na Tabela 3. Com o efluente B, o único corante utilizado na preparação do efluente sintético foi o R 15, sendo mantidos somente os produtos químicos auxiliares na mesma concentração do efluente A.

Para os ensaios com efluente B, para quantificar o corante R 15 removido no processo, procurou-se construir uma curva de calibração utilizando 10 amostras com concentrações variando entre 0,01 e 0,10 g/L, para obter a respectiva absorvância de cada concentração.

Foi utilizado o método de aeração biológica com uso do oxigênio concentrado a 99 % e com ar atmosférico para avaliar a redução do corante R15 nas fases 1 e 2. Os dois métodos empregados permitiram avaliar inclusive, a redução da DQO, da DBO, do nitrogênio e do fósforo.

Após a adição dos corantes e os produtos químicos auxiliares no tanque, foi obtido o resultado dos parâmetros do efluente sintético de entrada no processo. Estes estão apresentados

na Tabela 4. Para o cálculo da DBO foi utilizado o fator 0,38, como sendo a relação entre a média da DBO/DQO do processo da ETE.

Tabela 4 – Características dos parâmetros do efluente sintético inicial

<b>Parâmetro</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>
Temperatura	24,00	°C
pH	10,30	
Cor	1.870	PtCo
DQO	557,00	mg/L
DBO	212,60	mg/L
Fósforo total	5,60	mg/L
Nitrogênio total	3,10	mg/L

### 3.9.3. Determinação da vazão de operação

A vazão de processo foi regulada, com ajuste no inversor de frequência (rpm), para adequar a vazão da bomba e realizar a medição. Para o procedimento da medição, foi utilizado um cone Imhoff graduado de 1,0 L e monitorado o tempo de enchimento até o volume total. A melhor condição operacional da bomba, considerando os dados obtidos de arraste do suporte, foi com a vazão de 0,13 L/s, a qual foi adotada em todos os experimentos.

O cálculo da velocidade de escoamento pode ser representado através da equação (10).

$$v = \frac{Q}{A} \quad (10)$$

Onde Q é a vazão (L), v a velocidade de escoamento do fluido (m/s) e A é a área da seção transversal da coluna (m).

O número de Reynolds, Re, foi calculado através da equação (11).

$$Re = \frac{\rho * v * D}{\mu} \quad (11)$$

Os dados a seguir foram utilizados para cálculo do número de Reynolds: massa específica, diâmetro da coluna, viscosidade da água e área da seção transversal da coluna.

$$\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3; D = 0,196 \text{ m}; \mu = 0,001 \text{ Kg/ms}; A = 0,0079 \text{ m}^2$$

Com as vazões obtidas na Tabela 5, foram determinados as velocidades e o número de Reynolds para cada um dos 9 ensaios. Foram feitas variações no inversor de frequência para alterar a rotação da bomba e determinar a vazão de processo adequada. Com isso, foi possível acompanhar o comportamento dos sólidos, para minimizar o arraste do suporte pela coluna.

Tabela 5 – Determinação do n° de Reynolds

<b>Rotação(rpm)</b>	<b>Tempo(s)</b>	<b>Vazão(L/s)</b>	<b>Velocidade(m/s)</b>	<b>Reynolds</b>
27	2,40	0,417	0,014	<b>2707</b>
25	2,80	0,357	0,012	<b>2320</b>
23	3,40	0,294	0,010	<b>1911</b>
21	4,10	0,244	0,008	<b>1584</b>
19	4,80	0,208	0,007	<b>1353</b>
17	5,50	0,182	0,006	<b>1181</b>
15	6,90	0,145	0,005	<b>941</b>
13	7,70	0,130	0,004	<b>844</b>
11	8,20	0,122	0,004	<b>792</b>

#### 3.9.4. Introdução do inóculo na coluna de leito fluidizado

Para iniciar a formação do biofilme, foi colocado 4% em v/v de lodo ativado (cepas de microrganismos) na coluna, representando 2.730 mg/L de Sólidos Suspensos Totais (SST). Para cada fase testada para os efluentes A e B, foram coletadas amostras em determinado período de tempo durante os ensaios, para averiguar as características referente a evolução do biofilme formado a cada fase finalizada.

A Tabela 6 exhibe os dados referentes ao lodo ativado adicionado na coluna.

Tabela 6 – Dados do inóculo adicionado na coluna

<b>m<sub>p</sub></b>	<b>m<sub>p</sub>+m<sub>lu</sub></b>	<b>m<sub>p</sub>+m<sub>LS</sub></b>	<b>Sólido(g)</b>	<b>Líquido(g)</b>	<b>Umidade (%)</b>	<b>SST (mg/L)</b>
1,46	3,188	1,733	0,273	1,455	84,20%	2.730

Onde, m<sub>p</sub> é a massa do papel filtro quantitativo, m<sub>LU</sub> é a massa de lodo úmido e m<sub>LS</sub> é a massa do lodo seco.

O lodo biológico foi coletado do reator biológico da empresa Coteminas, utilizando cone Imhoff de 1,0 L e deixado para decantar por 30 minutos, sendo em seguida descartado o volume sobrenadante (fração líquida). Foi determinada a massa do lodo sedimentado em béquer de 0,5 L e realizado a filtração com papel quantitativo em funil de Buchner para a obtenção da

massa necessária a ser adicionado na coluna. A massa de lodo biológico (inóculo) foi obtida, conforme a equação (12).

$$L_b = \frac{SST * Vc}{1000} * \%umidade \quad (12)$$

$$L_b = 221,30 \text{ g}$$

Onde, SST (mg/L), Vc é o volume da coluna de leito fluidizado 44 L. A quantidade correspondente de cada material encontra-se na Tabela 7.

Tabela 7 – Composição dos materiais da coluna de leito fluidizado

<b>Material</b>	<b>g</b>	<b>%</b>
Lodo biológico	221,30	0,5
Suporte	1.108	2,5
Água	42.672	97,0
<b>Total</b>	<b>44.000</b>	<b>100</b>

### 3.9.5. Coleta da amostra e realização das análises

A amostra utilizada para os ensaios de todos os parâmetros foi coletada com bécher de 0,1 L no próprio tanque de efluente sintético. Os resultados foram obtidos por espectrofotometria óptica no laboratório da empresa Coteminas.

### 3.9.6. Determinação do índice de coloração

A coloração da amostra do tanque foi preparada e ajustada de modo a alcançar o valor mais próximo da média do histórico de processo da ETE entre 2016 a 2022. As análises de coloração das amostras do efluente A, com os corantes R 40, R 176 e R 225, foram analisadas por espectrofotometria óptica em unidade de platina/cobalto (PtCo) a cada 72 horas. A coloração está apresentada na figura 13.

Figura 13 – Amostra da cor do efluente sintético A



### 3.9.7. Determinação da demanda química de oxigênio (DQO)

Foram coletadas 10 amostras no intervalo de 72 horas e conduzidas ao laboratório para avaliação. As alíquotas utilizadas foram de 2 mL, sendo aquecidas em reator a 150°C e os resultados obtidos foram por espectrofotometria óptica.

### 3.9.8. Cálculo da DBO pelo fator de ajuste

A DBO não foi analisada através de metodologia analítica em razão da dificuldade de encontrar os reagentes necessários para o ensaio. Porém, foi encontrado um valor aproximado, através da divisão da DBO pela DQO, durante a operação da ETE entre 2016 a 2022. A Tabela 19 apresenta os resultados da DBO obtidos através dessa relação de operação. Os valores foram calculados através da equação (13).

$$DBO_{exp} = \frac{DBO_{op}}{DQO_{op}} * DQO_{exp} \quad (13)$$

Onde,

$DBO_{exp}$  é a DBO experimental, calculada para cada ensaio;

$DBO_{op}$  é a DBO obtida nos ensaios operacionais da ETE;

$DQO_{op}$  é a DQO obtida nos ensaios operacionais da ETE;

$DQO_{exp}$  é a DQO experimental, obtida para cada ensaio.

Com essa relação entre  $DBO_{op}/DQO_{op}$  obteve-se um fator de 0,38 para a entrada do efluente no processo e 0,27 para a saída. Com essa relação, multiplicou-se o valor por cada ensaio de DQO realizado.

### 3.9.9. Determinação do Fósforo total

Nos ensaios referentes ao fósforo, procedeu-se com a coleta no mesmo intervalo de tempo, de 72 h. As amostras foram filtradas antes da digestão ácida em chapa aquecedora. Após a amostra resfriada, adicionou-se os reagentes analíticos para obtenção dos valores no espectrofotômetro.

### 3.9.10. Determinação do nitrogênio amoniacal

A coleta para a análise do nitrogênio seguiu como os demais parâmetros, sendo retiradas da unidade experimental a cada 72 horas, filtrando a amostra em filtro de papel quantitativo para remoção de pequenas partículas que pudessem interferir nos resultados.

### 3.9.11. Procedimento de Esvaziamento da coluna

Para obter os resultados do lodo gerado, foi realizado a purga da coluna e do tanque de equalização. O material foi coletado pela base da coluna em baldes de 20 L cada. Foi feito a rinsagem com água limpa, para garantir a extração de todo o material contido no sistema. O volume completo foi deixado em repouso durante 24 h para a sedimentação dos sólidos e o descarte da fração líquida. Em seguida com o líquido já descartado, o material sólido foi transferido para um béquer de 0,5 L. Em seguida foi realizado a filtragem do material em

filtro de papel quantitativo, com auxílio de uma bomba a vácuo e funil de Buchner. Após a retenção da fração sólida, o filtro com o sólido foi secado em estufa à 100 °C por 2 h. Após este tempo, foi retirado para resfriar a temperatura ambiente, sendo na sequência determinado a massa em balança de precisão.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 8 mostra a perda de sólidos para cada vazão testada, com redução de arraste à medida que a vazão foi sendo reduzida.

Tabela 8 – Arraste de suporte na coluna

<b>Vazão(L/s)</b>	<b>Suporte(g)</b>	<b>Conc.(g/L)</b>	<b>Arraste(g)</b>	<b>Retenção(g)</b>	<b>% redução</b>
0,42	3,21	16,1	512,0	2.200	23,3
0,36	1,03	5,2	164,9	1.688	9,8
0,29	0,67	3,3	106,2	1.523	7,0
0,24	0,63	3,2	100,6	1.417	7,1
0,21	0,44	2,2	70,3	1.316	5,3
0,18	0,33	1,7	53,1	1.246	4,3
0,15	0,24	1,2	38,9	1.193	3,3
0,13	0,19	0,9	29,7	1.154	2,6
0,12	0,10	0,5	16,3	1.124	1,4
<b>Total</b>			<b>1.092</b>	<b>1.108</b>	

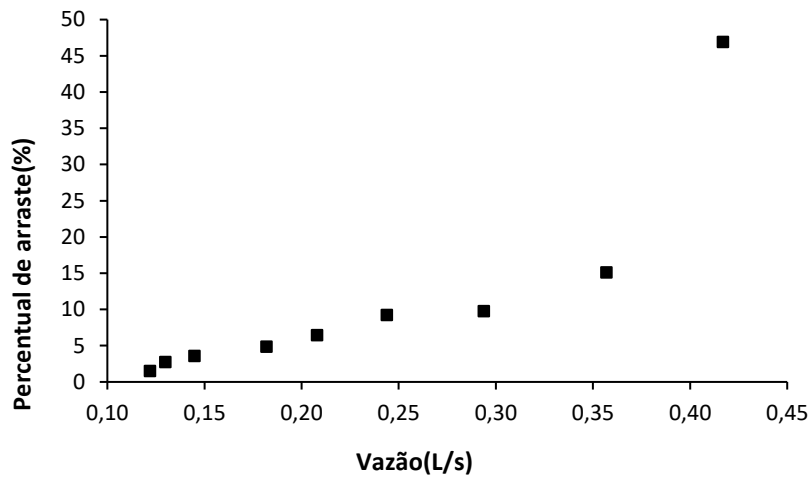
Na Figura 14 é apresentado o resultado do arraste do suporte, ocorrido em diferentes condições de vazão de fluido na coluna, obtido pela amostragem de nove amostras, coletadas na saída da coluna.

As vazões acima de 0,182 L/s causaram elevada turbulência na coluna, sendo o suficiente para promover grande quantidade de arraste do suporte. Foram observados menores arrastes do suporte abaixo de 0,145 L/s. Para a continuidade do experimento foi adotado a vazão número de 0,130 L/s, onde o n° Reynolds foi de 844. Nesta condição de processo, o arraste de sólidos foi menor, não comprometendo o desempenho do processo nem por arraste e nem por sedimentação do suporte na coluna.

A quantidade de suporte que restou no interior da coluna foi 1.108 g. Desse modo, essa foi a quantidade mantida para dar início ao procedimento experimental.

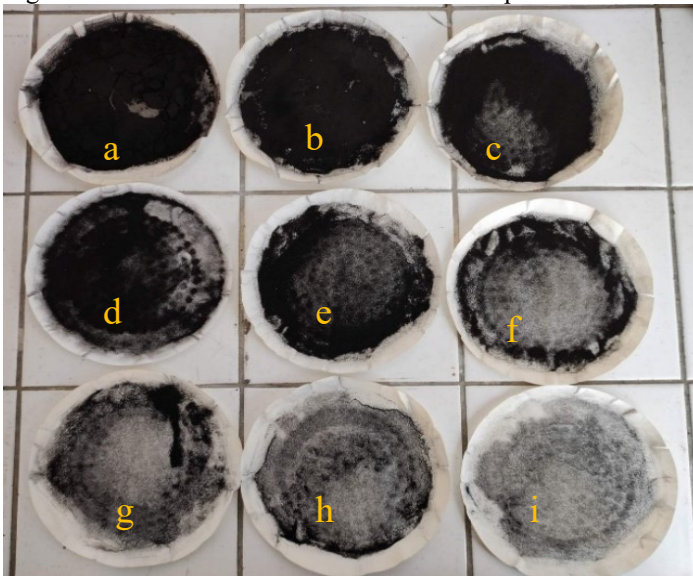


Figura 14 – Arraste de sólidos em função da vazão do efluente na coluna



Para cada ensaio realizado, foi coletada uma amostra de 0,2 L no tanque do efluente sintético e filtrado em papel filtro quantitativo, com o auxílio de uma bomba a vácuo e um funil de Büchner. Na sequência, a amostra foi seca em estufa a 100 °C por 2 h e colocada em dessecador, até a temperatura ambiente e pesada em uma balança com precisão de 0,01 g. A Figura 15 apresenta 9 amostras obtidas em vazões diferentes para quantificação do arraste.

Figura 15 – Amostras do arraste do material suporte



(a)3,21 g; (b)1,03 g; (c)0,67 g;(d)0,63 g;(e)0,44 g;(f)0,33 g;(g)0,24 g;(h)0,19 g;(i) 0,10 g

#### 4.1. OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DA ETE ENTRE 2016 A 2022

As Tabelas 9 e 10 fazem referência as médias dos parâmetros de operação da ETE do

efluente bruto e a saída após o reator biológico por 7 anos, entre 2016 a 2022. Os dados de DQO, DBO, coloração, fósforo total e nitrogênio amoniacal fazem parte dos parâmetros que serão avaliados no estudo. Estes números servem como base para serem comparados com os resultados obtidos na unidade experimental.

Tabela 9 – Histórico dos parâmetros, DQO, DBO e Cor do efluente de saída da ETE

Ano	DQO			DBO			COR		
	Entrada	Saída	(%)Rem.	Entrada	Saída	(%)Rem.	Entrada	Saída	(%)Rem.
<b>2016</b>	557,42	85,91	<b>84,59</b>	244,42	25,26	<b>89,67</b>	2021	241	<b>88,08</b>
<b>2017</b>	586,92	96,60	<b>83,54</b>	262,33	29,64	<b>88,70</b>	2247	222	<b>90,12</b>
<b>2018</b>	483,08	58,23	<b>87,95</b>	174,33	9,31	<b>94,66</b>	1793	264	<b>85,28</b>
<b>2019</b>	398,97	52,65	<b>86,80</b>	186,90	8,53	<b>95,44</b>	1585	247	<b>84,42</b>
<b>2020</b>	380,00	52,95	<b>86,07</b>	95,99	11,88	<b>87,62</b>	1932	355	<b>81,63</b>
<b>2021</b>	576,88	62,50	<b>89,17</b>	182,21	19,72	<b>89,18</b>	2284	369	<b>83,84</b>
<b>2022</b>	488,12	107,22	<b>78,03</b>	178,62	34,80	<b>80,52</b>	1260	416	<b>66,98</b>
<b>Média</b>	<b>495,91</b>	<b>73,72</b>	<b>85,16</b>	<b>189,26</b>	<b>19,88</b>	<b>89,40</b>	<b>1875</b>	<b>302</b>	<b>82,91</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>77,16</b>	<b>20,82</b>	<b>340</b>	<b>49,96</b>	<b>9,65</b>	<b>4,58</b>	<b>337,91</b>	<b>70,59</b>	<b>7,00</b>

Fonte: Coteminas Unidade Blumenau

A suplementação de fósforo e nitrogênio no reator biológico da ETE, somente é acrescentado em caso de desequilíbrio da relação 100DBO:5N:1P.

Tabela 10 – Histórico dos parâmetros do fósforo total e nitrogênio amoniacal do efluente de saída da ETE

Ano	Fósforo total			Nitrogênio amoniacal		
	Entrada	Saída	(%)Rem.	Entrada	Saída	(%)Rem.
<b>2016</b>	8,16	6,32	<b>22,55</b>	8,98	2,34	<b>73,94</b>
<b>2017</b>	10,30	7,46	<b>27,57</b>	10,27	2,52	<b>75,46</b>
<b>2018</b>	12,66	9,12	<b>27,96</b>	8,42	1,74	<b>79,33</b>
<b>2019</b>	10,35	8,16	<b>21,16</b>	6,75	1,66	<b>75,41</b>
<b>2020</b>	11,23	7,64	<b>31,97</b>	8,06	1,71	<b>78,78</b>
<b>2021</b>	15,04	13,26	<b>11,83</b>	10,38	1,91	<b>81,57</b>
<b>2022</b>	6,06	3,37	<b>44,36</b>	5,44	1,42	<b>73,83</b>
<b>Média</b>	<b>10,54</b>	<b>7,90</b>	<b>26,77</b>	<b>8,33</b>	<b>1,90</b>	<b>76,90</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>2,70</b>	<b>2,77</b>	<b>9,34</b>	<b>1,66</b>	<b>0,36</b>	<b>2,77</b>

Fonte: Coteminas Unidade Blumenau

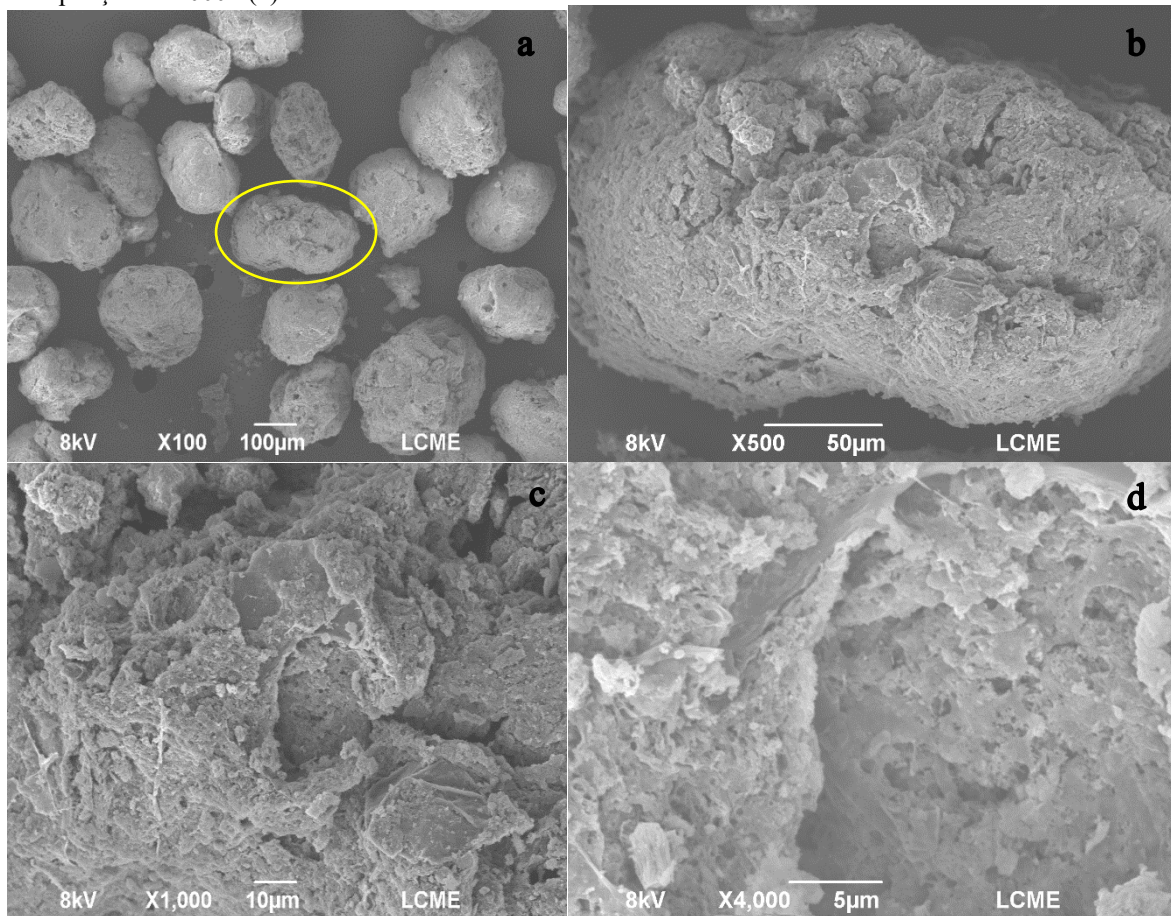
#### 4.2. AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO BIOFILME FORMADO

A Figura 16 apresenta as microfotografias do suporte utilizado neste estudo para a formação do biofilme. O suporte destacado na Figura 16 (a) é ampliado para cada uma delas em análise mais profunda. A ampliação das imagens mostra a irregularidade na superfície do suporte com cavidades variadas, que propiciam a adesão e o desenvolvimento do biofilme, visivelmente na imagem (d).

Imagens através de MEV já foram demonstradas em pesquisas anteriores, sugerindo que o suporte carbonoso corrobora com o desenvolvimento de biofilme, ou até mesmo em processo de adsorção de nutrientes (Mulinari, 2018).

De acordo Souza *et al.* (2011), uma pesquisa realizada sobre aplicação de biofilmes, com carvão ativado, as imagens realizadas através do MEV demonstraram que a imobilização dos microrganismos na superfície do suporte forma um fino biofilme com morfologia bacteriana semelhante, na superfície externa dessas partículas. Observou-se que a distribuição dos microrganismos na superfície externa das partículas não foi homogênea, havendo em algumas regiões grandes aglomerados de bactérias e outras com baixa concentração de microrganismos.

Figura 16 – Microfotografias do suporte, ampliação de 100x (a), ampliação de 500x (b), ampliação de 1000x (c) e ampliação de 4000x (d).

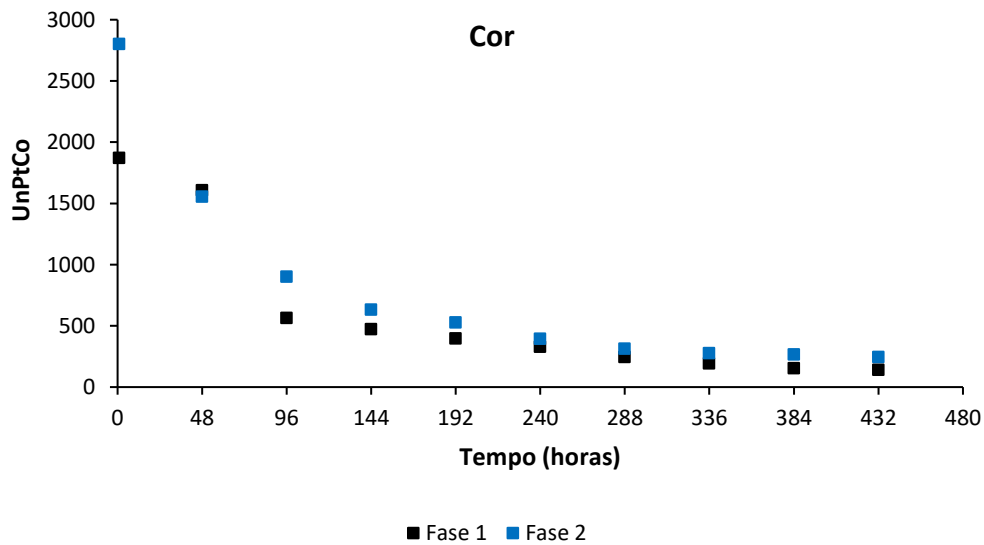


Fonte: Labmassa (UFSC).

#### 4.3. PARAMETROS DA COR, DQO, NITROGENIO E FÓSFORO DO EFLUENTE A

Percebeu-se que houve maior eficiência no processo de remoção na fase 1 nas primeiras 96 horas, seguido de um equilíbrio na redução ao longo do período. A Figura 17 apresenta ligeira queda do índice de cor em 432 horas de operação.

Figura 17 – Cor real do efluente A em UnPtCo para a tricromia de corantes R 40, R 176 e R 225 nas fases 1 e 2



A Figura 18 exibe 8 amostras retiradas para a realização de cada ensaio. Nas 3 primeiras amostras o resultado na redução da cor é mais relevante. A coloração na primeira amostra traduz maior intensidade da cor, em razão dos 3 corantes utilizados. Na segunda amostra, o corante vermelho R 40 perde significativamente a aparência, predominando mais o corante azul R 225. A partir da 3ª amostra, percebe-se a predominância do corante amarelo com tendência de queda mais significativa na coloração das amostras, apresentado baixo residual do corante amarelo R 176 na última amostra.

Figura 18 – Amostras das cores do efluente A na fase 1 utilizando os corantes R 40, R 176 e R 225



A Figura 19 exibe as amostras da fase 2, retiradas no intervalo de tempo pré-determinados para realização dos ensaios. Observa-se que para cada amostra coletada, a coloração reduziu significativamente. A intensidade de cada corante tem um efeito visual perceptível a partir da 3ª amostra, da esquerda para a direita. Na 3ª amostra da esquerda para

a direita, nota-se que grande parte do corante azul (R 225) foi removido, restando a fração dos corantes vermelho (R 40) e amarelo (R 176), sendo reduzidos a cada amostra coletada. A maior intensidade na coloração das amostras nesta fase, é devido ao aumento da concentração inicial dos corantes utilizados na preparação do efluente para esta 2ª fase do teste.

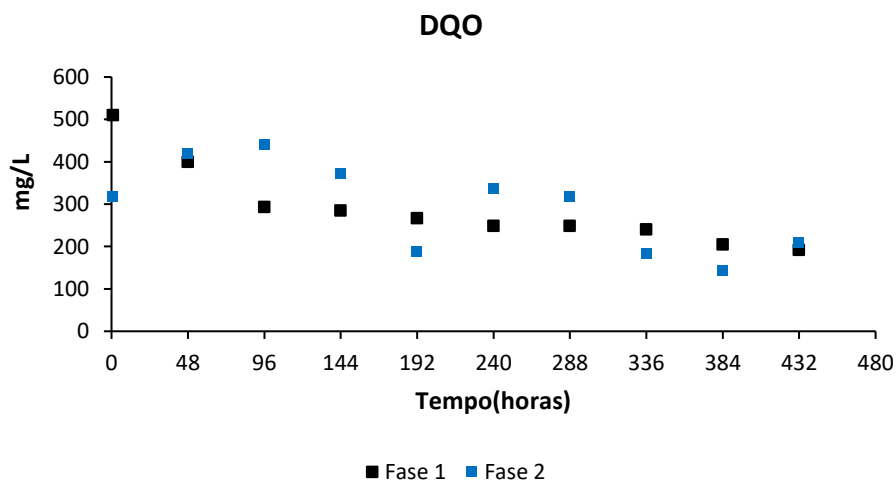
Figura 19 – Amostras representativas do efluente A da fase 2 com a tricromia dos corantes R 40, R 176 e R 225



A Figura 20, exibe os resultados da DQO, sendo que a queda na concentração foi gradativa no período de 432 horas para a fase 1, sem sofrer grandes oscilações. Como não foram adicionados substratos durante esta fase, a atividade microbológica no sistema ficou reduzida, com baixa relação alimento/microrganismo (A/M), direcionando a eficiência nesta fase do processo para a biomassa dispersa.

Diferentemente da fase 1, a adição dos produtos químicos auxiliares no efluente foi necessário para fornecer energia e manter a plena atividade microbológica. Nessa fase, a DQO sofreu oscilações durante os intervalos de 48 horas, devido a esse incremento de substratos.

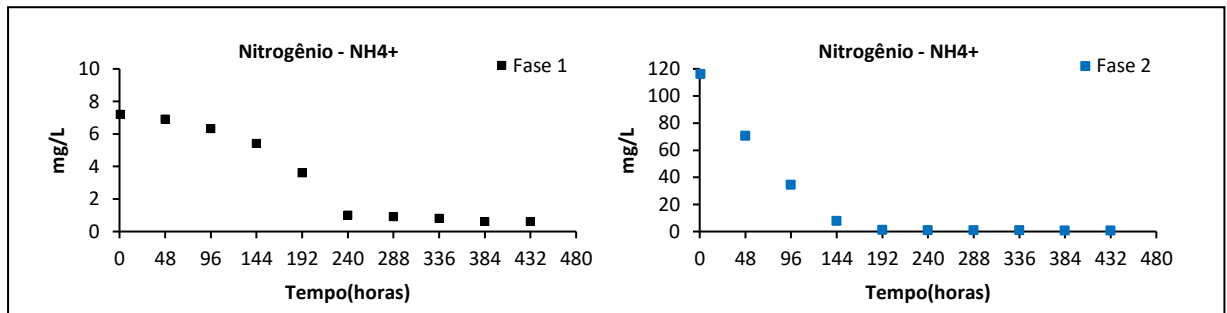
Figura 20 – Dados comparativos da DQO do efluente A entre as fases 1 e 2 utilizando os corantes R 40, R 176 e R 225



A Figura 21 mostra a redução da concentração do nitrogênio amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ), durante as fases 1 e 2. Observa-se que nas 144 horas a redução foi significativa na fase 2, seguida de forma mais regular até o restante do processo. Nessa fase, foi adicionado no primeiro dia 10 g do composto NPK (combinação de nitrogênio, fósforo e potássio), o que explica o alto teor de nitrogênio no início do ensaio. O nutriente NPK, fornece alto teor de fósforo e nitrogênio, auxiliando na manutenção da estrutura celular dos microrganismos.

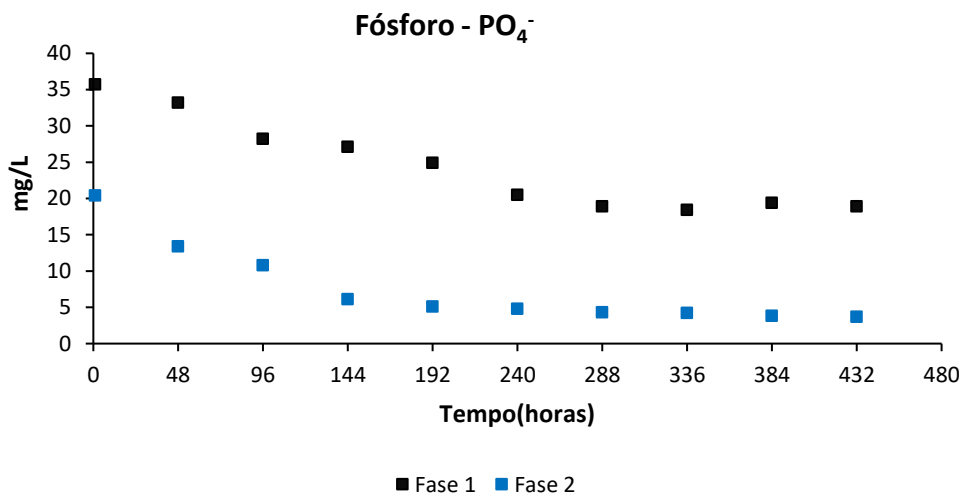
Para a fase 1, a concentração do nitrogênio foi somente em função dos produtos químicos adicionados no efluente sintético. Independe da concentração inicial entre as fases testadas, o resultado após a quinta amostra foi satisfatório para ambas as fases.

Figura 21 – Redução de nitrogênio amoniacal do efluente A nas fases 1 e 2 com os corantes R 40, R 176 e R 225



A Figura 22 exibe a redução do fósforo de forma cinética muito semelhante entre as fases, apresentando a redução mais significativa até 240 horas, tanto para a fase 1 quanto para a fase 2. Após esse período a concentração se manteve constante, não havendo mais efeito na redução ao longo do tempo. Embora tenha permanecido com poucas oscilações após 24 horas, o resultado para as duas fases testadas foi maior quando comparada com o método convencional, apresentando redução de 45,7% na fase 1; 81,4% fase 2 e apenas 25% utilizando o processo convencional.

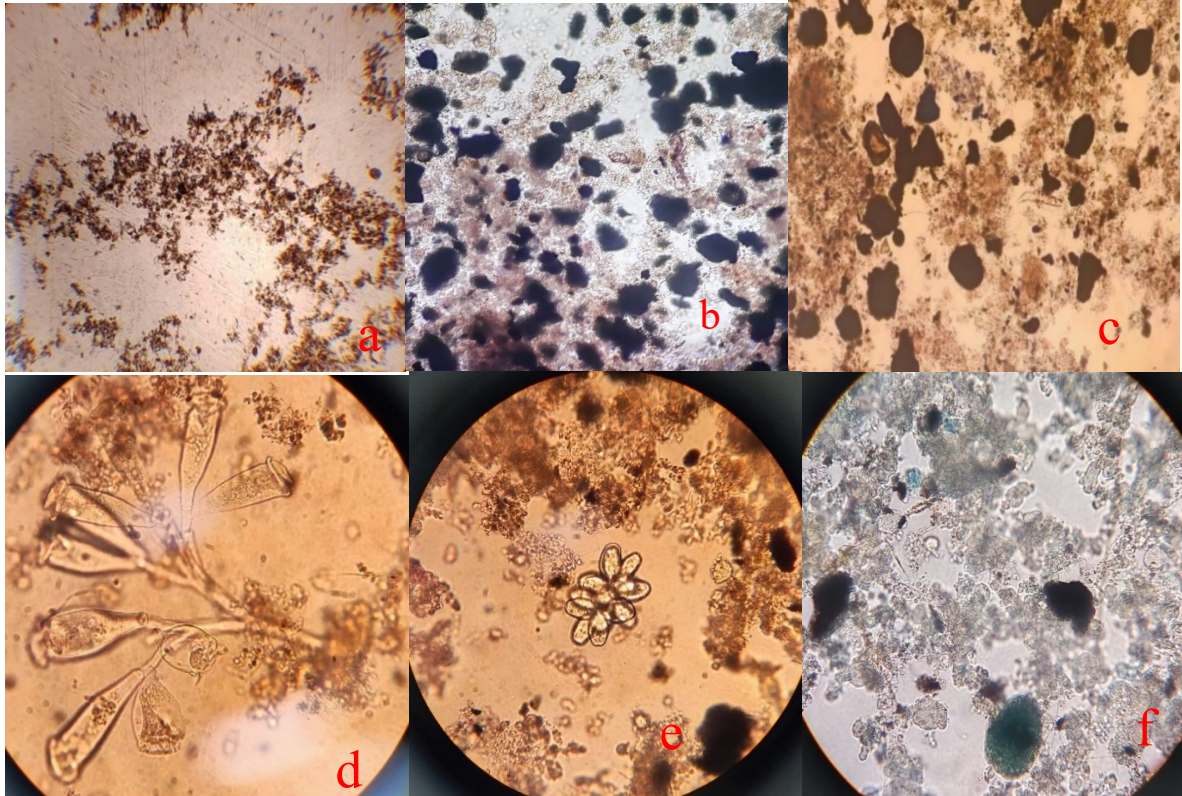
Figura 22 – Redução do fósforo total do efluente A nas fases 1 e 2 com os corantes R 40, R 176 e R 225



A Figura 23 apresenta o desenvolvimento biológico no interior da coluna com o uso do biofilme. As imagens d, e, f, representam as amostras coletadas a 20 cm do topo da coluna, não sendo observado quantidade de suporte nas imagens. A imagem(a) apresenta a amostragem de lodo biológico puro colocado no início do processo sem a adição do suporte. A imagem(b) refere-se ao efluente A 10 dias após a adição do suporte na coluna. A imagem(c) está relacionada a formação do biofilme no suporte, coletado para esta representação 12 dias após o teste da fase 1. A imagem(d) faz referência a fase 2 testada com o efluente A, exibindo uma colônia de ciliado fixo. A imagem(e) refere-se ao efluente B com a fase 1, com boa formação flocular constatando a presença de protozoários na amostra. A imagem(f) pertence ao efluente B na fase 2 com boa formação de flocos biológicos e biofilmes na amostra.



Figura 23 – Amostras microbiológicas durante as fases de testes realizados na coluna de leito fluidizado



(a) Lodo biológico puro. (b) lodo biológico com suporte no efluente A na fase de adaptação. (c) efluente A na fase de formação do biofilme. (d) efluente A na fase de consolidação do biofilme. (e) estrutura compactada das células no efluente B. (f) fases de avaliação do corante turquesa no efluente B.

#### 4.4. REDUÇÃO DOS PARÂMETROS DO EFLUENTE B COM USO DO CORANTE R 15 UTILIZANDO AERAÇÃO COM O<sub>2</sub> 99% E AR ATMOSFÉRICO O<sub>2</sub> 21%

No experimento com o efluente B, os ensaios também foram divididos em duas fases na aeração microbiológicas, sendo uma delas com oxigênio a 99% e ar atmosférico a 21%. Além da cor, DQO, DBO, fósforo e nitrogênio, também foi avaliado a concentração final do corante em cada uma das fases analisadas. O corante foi adicionado somente no início de cada uma das fases dos testes e os produtos auxiliares foram dosados em intervalos de 24 h, após a realização de cada coleta.

##### 4.4.1. Redução da cor do fluente B durante a fase 1 com uso do corante R 15

A Figura 24 faz referência as amostras coletadas na fase 1 do experimento, ou seja, utilizando O<sub>2</sub> 99% na aeração do sistema. Neste ensaio, nota-se que a partir da 6<sup>o</sup> amostra, a tonalidade da cor se torna menos intensa, mostrando queda sensível na redução da coloração.

Figura 24 – Amostras de degradação do corante azul turquesa R 15 utilizando O<sub>2</sub> 99% (fase 1)



#### 4.4.2. Redução da cor do efluente B durante a fase 2 com uso do corante R 15

A Figura 25 apresenta as amostras obtidas na fase 2 com a intensidade do corante reduzindo significativamente a partir da 7<sup>o</sup> amostra. A partir da 8<sup>o</sup> amostra não houve alteração significativa na tonalidade da cor, ainda que possuindo residual de corante na amostra.

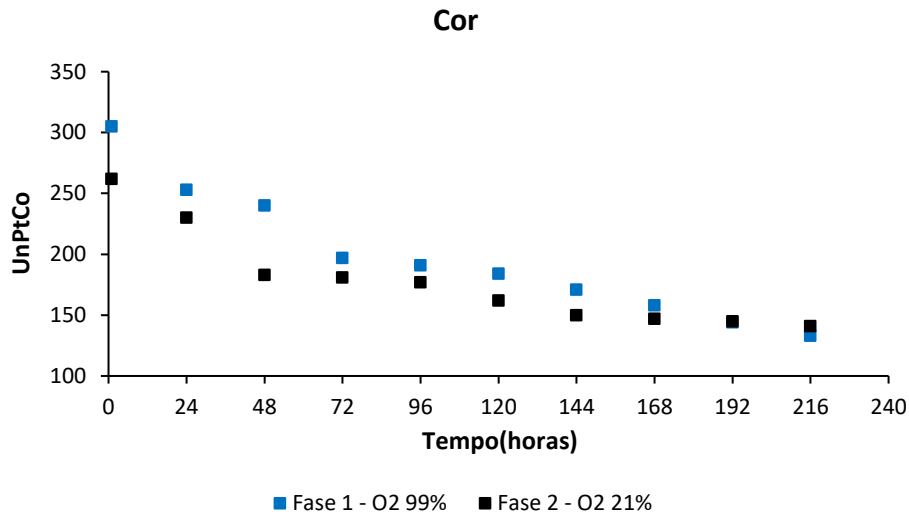
Figura 25 – Amostras do corante R 15 utilizando ar atmosférico a 21% (fase 2)



Pela Figura 26, pode ser observado que mesmo com o índice de cor mais elevado no teste com oxigênio 99% (fase 1), o resultado apresentou melhor desempenho, principalmente ao final do processo, quando comparado com ar atmosférico a 21% de O<sub>2</sub> (fase 2). O gráfico

mostra uma tendencia de queda após 216 horas.

Figura 26 – Redução do corante R 15 com o efluente B utilizando aeração com O<sub>2</sub> 99% e ar 21% O<sub>2</sub>



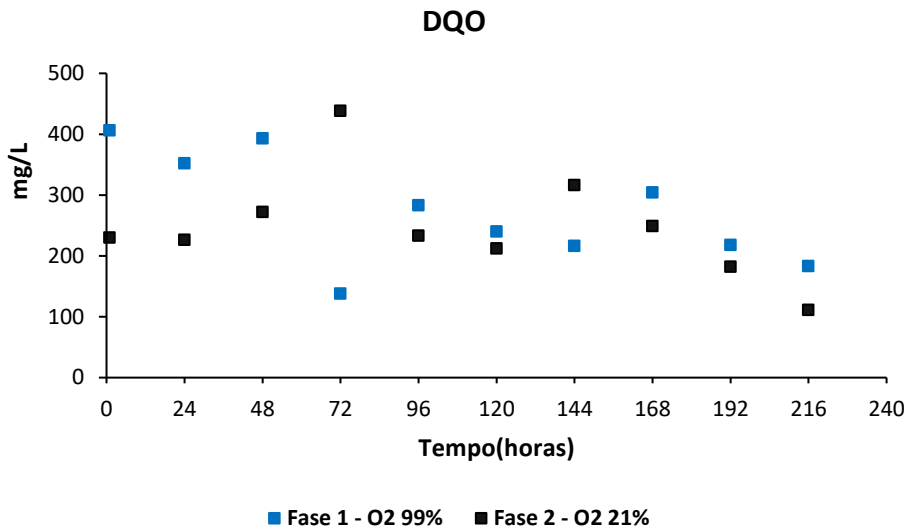
#### 4.4.3. Redução da DQO no efluente B com uso do corante R 15

Os dados de DQO apresentados na Figura 27, mostram que houve várias oscilações de queda nos índices, tendo como a principal causa a composição dos produtos adicionados ao efluente sintético. Devido a concentração dos produtos auxiliares incrementados na dosagem, houve a necessidade de um intervalo de tempo para que a biota pudesse assimilar esses produtos e iniciar o processo de degradação da matéria orgânica. Nota-se que, mesmo com as oscilações ocorridas durante o período analisado, houve uma redução de DQO do início para o final do experimento da ordem de 46,3 % na fase 1 e 20,9 % na fase 2. Com relação a este parâmetro, o uso do biofilme não apresentou redução suficiente para atender a legislação.

Um trabalho realizado por Arcanjo *et al.* (2018), com efluente real da indústria têxtil, utilizando carvão ativado numa concentração de até 20 g/L, tem demonstrado remoção da DQO em 60% e coloração em 93%.

Tal aplicação demonstrou uma forma promissora na redução dos parâmetros, por se tratar de um material ativado. Neste trabalho o suporte utilizado foi *in natura*, que mesmo sendo utilizado a concentração maior (25 g/L), apresentou menor eficiência. Sem ativação do suporte, a área superficial é reduzida, tornando a formação de biofilme mais limitada, pois é conhecido que há redução significativa de sítios ativos.

Figura 27 – Redução da DQO com o efluente B nas fases 1 e 2 com corante R15 utilizando O<sub>2</sub> 99% e ar atmosférico na aeração microbológica



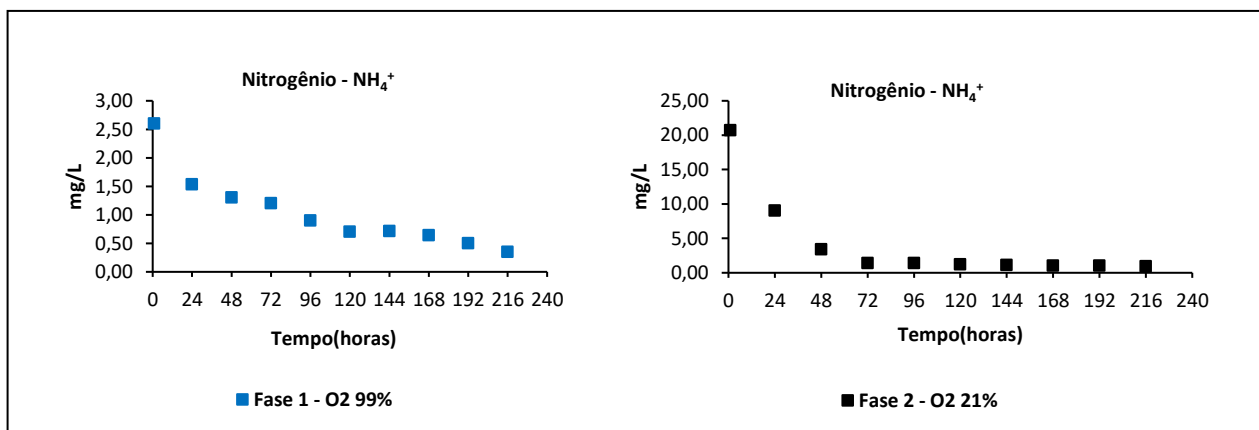
#### 4.4.4. Redução do nitrogênio no efluente B com uso do corante R 15

A Figura 28 exibe os dados da remoção do nitrogênio na aeração microbológica. Observa-se que após 72 horas a concentração de nitrogênio amoniacal na fase 2 permaneceu constante, demonstrando maior redução em comparação com a fase 1.

A alta concentração inicial do nitrogênio amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ) nesta 2ª fase foi resultado da adição de 3,0 g do nutriente NPK, o que não aconteceu na 1ª fase, onde nesta fase o teor de nitrogênio foi somente em função dos produtos químicos auxiliares adicionados no efluente.

Uma pequena redução do nitrogênio é observada após o período de 96 horas com a aplicação de O<sub>2</sub> 99 % na fase 1.

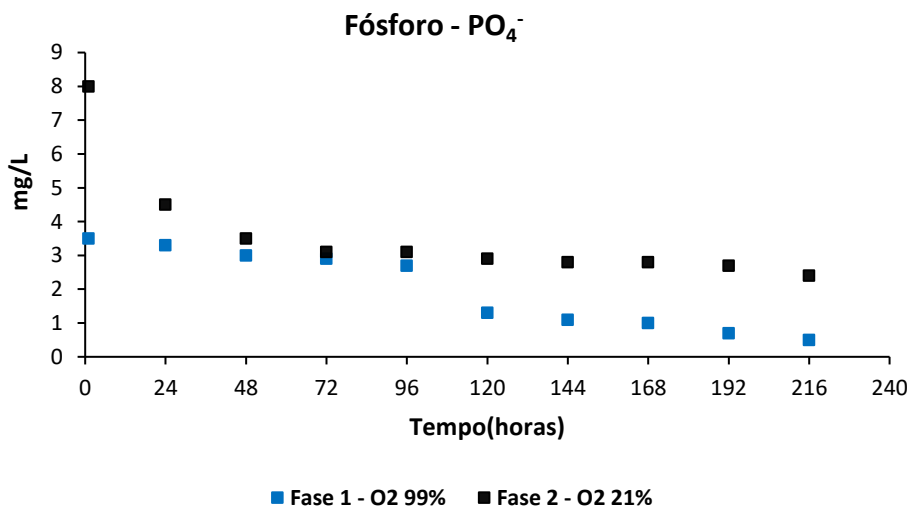
Figura 28 – Remoção do nitrogênio amoniacal nas fases 1 e 2 com O<sub>2</sub> 99% e ar atmosférico 21% O<sub>2</sub>



#### 4.4.5. Redução do fósforo nas fases 1 e 2, com uso do corante R 15

Quanto a redução do fósforo, uma situação semelhante ao comportamento do nitrogênio pode ser observada. Após 96 horas, o teste com O<sub>2</sub> 99% apresentou melhor resultado, com redução de 80%. Enquanto o teste na fase 2 com ar atmosférico 21 % O<sub>2</sub> permaneceu de forma mais constante a partir de 48 horas de monitoramento, apresentando redução de 66,3%. Com relação a este parâmetro, o processo convencional de tratamento da ETE foi menos eficiente comparativamente, reduzindo apenas 25%. Os dados estão apresentados na Figura 29.

Figura 29 – Redução do fósforo total com O<sub>2</sub> 99% e ar atmosférico 21%



#### 4.5. AJUSTE DA EQUAÇÃO DA RETA ATRAVÉS DA ABSORBÂNCIA E CONCENTRAÇÃO DO CORANTE R 15

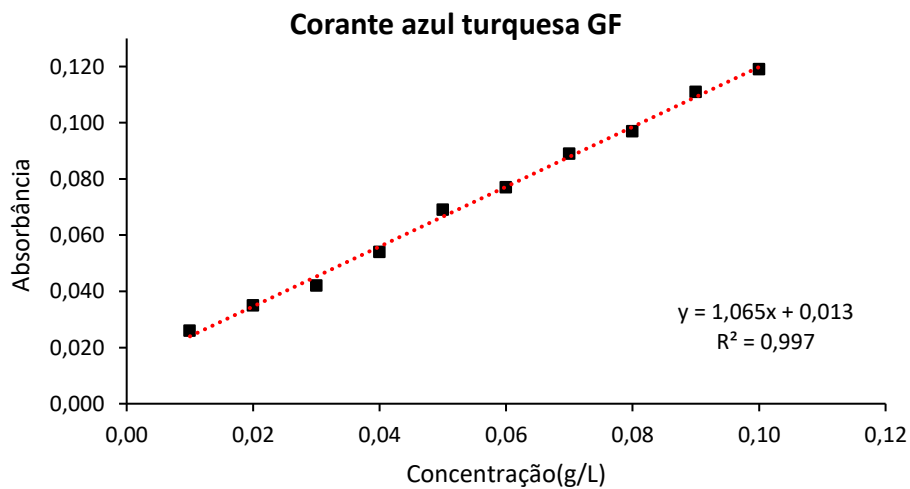
A Tabela 11 relaciona as medidas da absorvância em função da concentração preparada com o corante R 15. As medições foram preparadas com 10 amostras em concentrações entre 0,01 a 0,10 g/L.

Tabela 11 – Dados para a curva de calibração do corante R 15, no comprimento de onda  $\lambda = 455$  nm.

Concentração(g/L)	Absorbância
0,01	0,026
0,02	0,035
0,03	0,042
0,04	0,054
0,05	0,069
0,06	0,077
0,07	0,089
0,08	0,097
0,09	0,111
0,10	0,119

Conhecida a absorbância correspondente a cada concentração conhecida preparada com o corante R 15, a Figura 30 apresenta o gráfico construído a partir dos dados da absorbância encontrado pela concentração do corante preparada com o corante R 15 na fase 1.

Figura 30 – Ajuste da curva de calibração do corante R 15



4.5.1. Resultado da concentração final do corante R 15 com uso do O<sub>2</sub> 99% e ar atmosférico 21% O<sub>2</sub>.

A concentração de corante pode ser calculada através da equação (14).

$$x = \frac{y}{1,065} - 0,013 \quad (14)$$

Onde:

$x$  é a concentração do corante em cada etapa do processo,  
 $y$  é respectivamente a absorvância do corante.

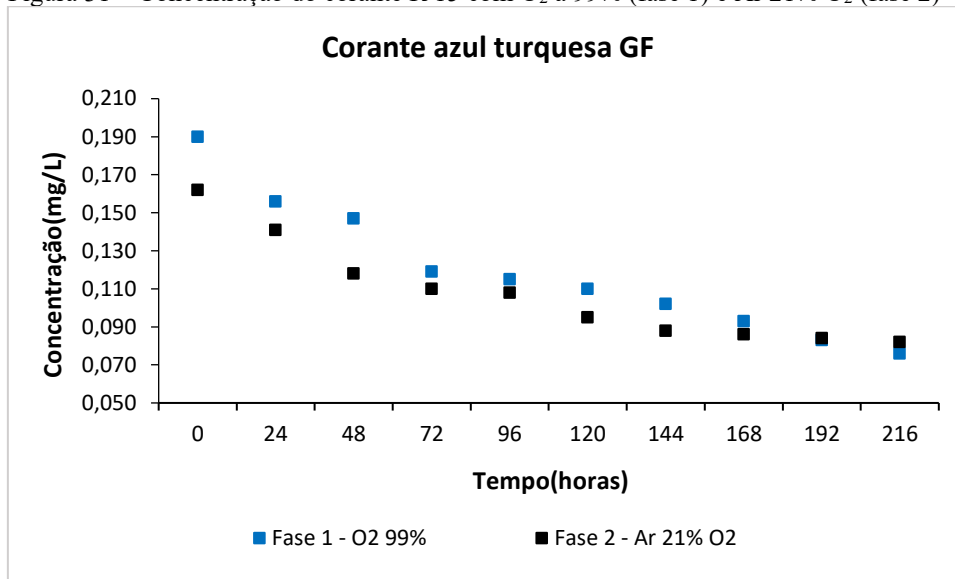
A Tabela 12 apresenta os dados obtidos de concentração do corante R 15 através das análises de absorvância calculada pela equação 14.

Tabela 12 – Concentração do corante R 15 utilizando O<sub>2</sub> 99% e ar atmosférico (O<sub>2</sub> 21%)

Fase 1 - O <sub>2</sub> 99%		Fase 2 - O <sub>2</sub> 21%	
Concentração(g/L)	Absorvância	Concentração (g/L)	Absorvância
0,190	0,202	0,162	0,174
0,156	0,168	0,141	0,153
0,147	0,159	0,118	0,130
0,119	0,131	0,110	0,122
0,115	0,127	0,108	0,120
0,110	0,122	0,095	0,107
0,102	0,114	0,088	0,100
0,093	0,105	0,086	0,098
0,083	0,095	0,084	0,096
0,076	0,088	0,082	0,094

A Figura 31, apresenta a redução da concentração do corante ao longo de 216 horas de testes. A fase 2 (O<sub>2</sub> 21%) do teste mostrou que houve uma tendência na concentração do corante em se manter constante após o período de 144 horas. Observa-se através do gráfico que a queda na concentração do corante com uso do oxigênio 99% na aeração biológica, foi menor somente após 192 horas do período testado. Percebeu-se que a redução máxima do corante R 15 seria atingida em menos tempo operando com O<sub>2</sub> a 99%. De qualquer forma, houve tendência na redução do corante R 15 tanto para a fase 1 quanto para a fase 2. A oscilação na redução da concentração é inerente ao processo microbiológico do biofilme e a biota dispersa.



Figura 31 – Concentração do corante R 15 com O<sub>2</sub> a 99% (fase 1) e Ar 21% O<sub>2</sub> (fase 2)

#### 4.6. QUANTIFICAÇÃO RESIDUAL DO CORANTE REATIVO R 15 COM O USO DO O<sub>2</sub> 99% (FASE 1) E AR ATMOSFÉRICO A 21% O<sub>2</sub> (FASE 2)

A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos durante as fases 1 e 2 com emprego do corante R 15. Foi utilizado a concentração de 0,05 g/L de corante para cada uma das fases, preparados no tanque equalizador de efluentes.

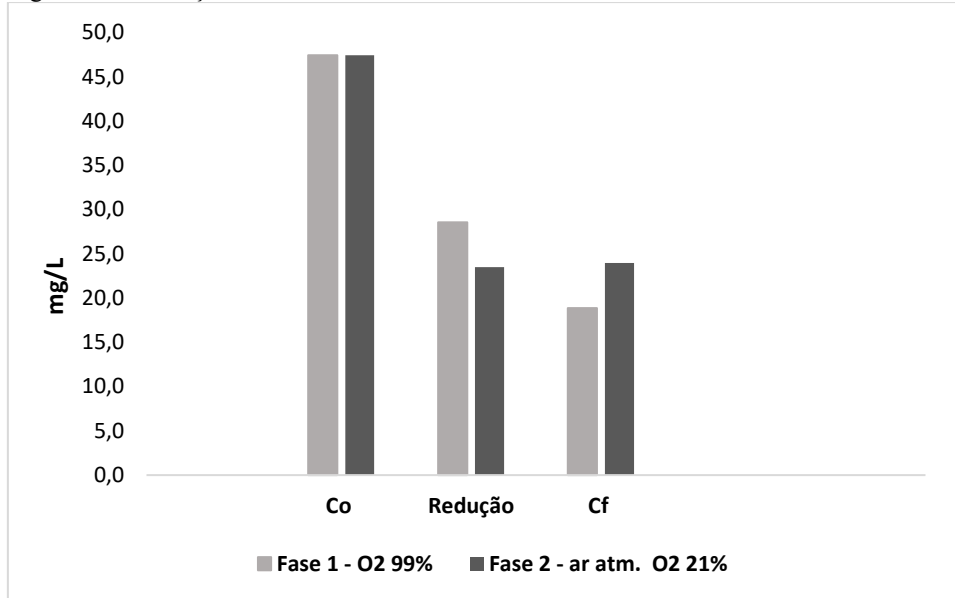
Tabela 13 – Dados de redução do corante reativo R 15, com sistema de aeração utilizando O<sub>2</sub> 99% (fase 1) e ar atmosférico 21% (fase 2)

Fases experimentais	C <sub>0</sub> (mg/L)	Redução(mg/L)	Redução (%)	C <sub>f</sub> (mg/L)
Aeração - O <sub>2</sub> 99%	47	29	60,2	18,9
Aeração - ar atm. 21%	47	23	49,5	23,9



A Figura 32 exibe os dados de redução do corante para ambas as fases. Os dados demonstram que a redução foi mais expressiva com uso de O<sub>2</sub> 99%. A concentração final C<sub>f</sub>, mostrou que restou mais corante na fase 2 com uso do ar atmosférico O<sub>2</sub> 21%.

Figura 32 – Redução do corante reativo R 15 entre as fases com O<sub>2</sub> 99% e ar atmosférico 21% O<sub>2</sub>



#### 4.7. DADOS COMPARATIVOS ENTRE OS EFLUENTES A E B COM PROCESSO DE TRATAMENTO DA ETE

A Tabela 14 apresenta os resultados da DQO e Cor, obtidos entre o início e final de cada processo. Pode-se afirmar que a remoção da cor teve o melhor desempenho no efluente A da fase 1 (adaptação). O principal efeito ocorrido foi ação conjunta da biota em suspensão em conjunto com o biofilme formado. Entre os dois efluentes A e B testados, a DQO também apresentou o melhor resultado no efluente A (fase 1), em razão de ter sido adicionado o substrato somente no início do experimento. A respeito da DQO, pode-se dizer que o processo da ETE, foi melhor em função do alto tempo de residência celular e a taxa de reciclo do lodo, mesmo operando com microrganismos dispersos. Quanto a remoção do nitrogênio e fósforo, o processo com uso de biofilme foi superior ao processo convencional da ETE.

Tabela 14 – Dados experimentais de Cor e DQO dos efluentes testados na coluna de leito fluidizado comparados ao estudo de caso da ETE Coteminas

Etapas do experimento	COR (UnPtCo)			DQO (mg/L)		
	Entrada	Saída	Redução (%)	Entrada	Saída	Redução (%)
<b>Efluente A</b>						
<b>Fase 1 - (R 40, R 176, R 225)</b>	1870	153	<b>91,8</b>	510	205	<b>59,8</b>
<b>Fase 2 - (R40, R176, R225)</b>	2800	266	<b>90,5</b>	317	143	<b>54,9</b>
<b>Efluente B</b>						
<b>Fase 1- R 15_O<sub>2</sub> 99%</b>	305	144	<b>52,8</b>	406	218	<b>46,3</b>
<b>Fase 2 – R 15_ar_O<sub>2</sub> 21%</b>	262	145	<b>44,7</b>	230	182	<b>20,9</b>
<b>Histórico ETE - 2016 - 2022</b>	1875	302	<b>83,9</b>	496	73	<b>85,2</b>

Para os dados do processo com uso de biofilme, a eficiência foi superior ao processo de tratamento convencional tanto na redução do fósforo quanto do nitrogênio. Em qualquer um dos experimentos com os efluentes testados A e B, para ambos os nutrientes, os resultados da Tabela 15 mostram que foram melhores quando comparados com a ETE, principalmente em relação ao fósforo. As maiores quedas de redução do fósforo, ocorreram com o biofilme já estabelecido.

Tabela 15 – Resultados de eficiência de remoção de fósforo e nitrogênio amoniacal após os testes em coluna e o histórico da ETE.

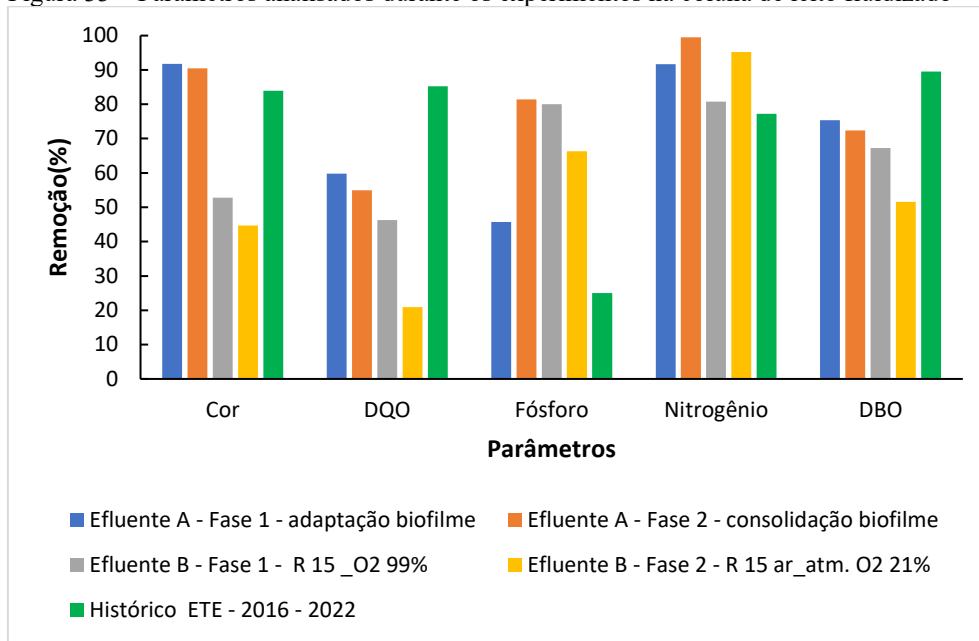
Etapas do experimento	Fósforo ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) mg/L			Nitrogênio ( $\text{NH}_4^+$ ) mg/L		
	Entrada	Saída	(%)	Entrada	Saída	(%)
<b>Efluente A</b>						
<b>Fase 1 (R40, R176, R225)</b>	35,70	19,4	<b>45,7</b>	7,20	0,6	<b>91,7</b>
<b>Fase 2 (R40, R176, R225)</b>	20,40	3,8	<b>81,4</b>	116,00	0,6	<b>99,5</b>
<b>Efluente B</b>						
<b>Fase 1- R15_ O<sub>2</sub> 99%</b>	3,50	0,7	<b>80,0</b>	2,60	0,5	<b>80,8</b>
<b>Fase 2 - R15_ar_ O<sub>2</sub> 21%</b>	8,00	2,7	<b>66,2</b>	20,70	1,0	<b>95,2</b>
<b>Histórico ETE - 2016 - 2022</b>	10,54	7,9	<b>25,0</b>	8,33	1,9	<b>77,2</b>

Tabela 16 – Dados previstos de DBO ajustados pela relação entre DBO/DQO com base nos resultados da ETE de 2016 a 2022.

Etapas do experimento	DBO (mg/L)		
	Entrada	Saída	Redução (%)
<b>Efluente A</b>			
<b>Fase 1- (R40, R176, R225)</b>	195	48	<b>75,4</b>
<b>Fase 2 - (R40, R176, R225)</b>	121	33	<b>72,4</b>
<b>Efluente B</b>			
<b>Fase 1 - R15_ O<sub>2</sub> 99%</b>	155	51	<b>67,2</b>
<b>Fase 2 - R15_ar_ O<sub>2</sub> 21%</b>	88	26	<b>51,6</b>
<b>Histórico ETE - 2016 - 2022</b>	189	20	<b>89,5</b>

A Figura 33 apresenta todos os parâmetros analisados durante o experimento. Pode-se concluir que os resultados experimentais suplantaram o rendimento obtido pela média do período histórico de operação da ETE considerado. Somente os dados de DQO e DBO com tratamento biológico em lodo ativado disperso, foram melhores durante a operação da ETE no período compreendido entre 2016 e 2022.

Figura 33 – Parâmetros analisados durante os experimentos na coluna de leito fluidizado



#### 4.7.1. Tempo de detenção hidráulica de operação na aeração biológica da ETE

O tempo de detenção hidráulica do efluente no reator biológico é representado pela equação 15.

$$t_{dh} = \frac{V}{Q} \quad (15)$$

Onde,

$t_{dh}$  é o tempo de detenção hidráulica do efluente (h),  $V$  é o volume útil do reator ( $m^3$ ) e  $Q$  é a vazão de operação ( $m^3/h$ ).

Os dados de vazão mensal e horária estão dispostos na Tabela 17, adicionado ao tempo total de detenção hidráulica do efluente no reator biológico. O número de horas mensais consideradas na operação da ETE foi de 512 h. O volume do reator biológico é de  $3.950 m^3$ .

$$t_{dh} = 68 \text{ h}$$

Tabela 17– Dados de vazão do efluente na entrada do reator biológico da ETE

Vazão	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	média
(m <sup>3</sup> /mês)	25.878	33.635	27.517	25.400	41.760	43.857	10.560	<b>29.801</b>
(m <sup>3</sup> /h)	50,5	65,7	53,7	49,6	81,6	85,7	20,6	<b>58,2</b>

A Tabela 18 apresenta os valores de cada parâmetro analisado na coluna, sendo correlacionado com o tempo de detenção hidráulica em regime de operação do reator biológico da ETE, correspondente a 68 h.

Os valores foram obtidos por interpolação linear, sendo que para o efluente A, em ambas as fases, o intervalo de tempo foi de 48 e 96 h. Para o efluente B o intervalo foi de 48 e 72 h.

Tabela 18 – Dados interpolados no tempo de detenção hidráulica do reator biológico de 68 h

Etapas	COR (PtCo)		DQO (mg/L)		NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)		PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (mg/L)		DBO (mg/L)	
	início	68 h	início	68 h	início	68 h	início	68 h	início	68 h
<b>Efluente A</b>										
<b>Fase 1</b>	1870	1170	510	357	7,2	6,7	35,7	31,4	195	136
<b>Fase 2</b>	2800	1285	317	380	116	55,5	20,4	12,3	121	144
<b>Efluente B</b>										
<b>Fase 1</b>	305	242	406	386	2,6	1,34	3,5	3,1	155	147
<b>Fase 2</b>	262	191	230	264	20,7	4,56	8,0	3,7	88	100
<b>ETE - 2016 - 2022</b>	1875	302	496	73	8,33	1,9	10,54	7,9	189	20

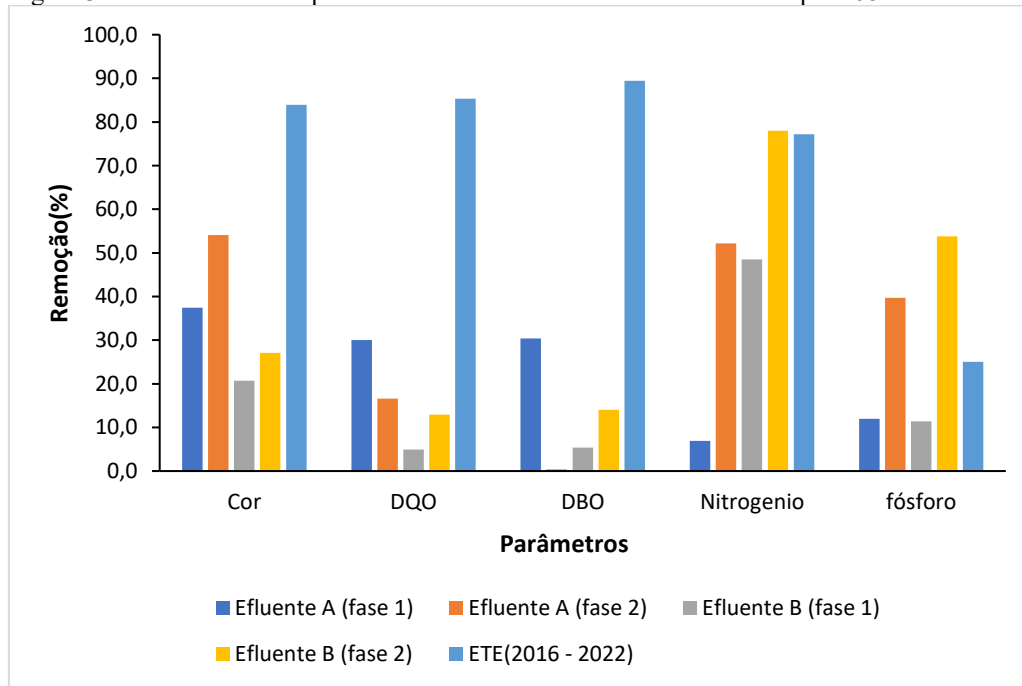
O percentual de redução dos parâmetros da Tabela 18, estão apresentados no gráfico da Figura 34. Observou-se que o tempo de residência do efluente na coluna em 68 horas não foi suficiente para atingir resultados com a mesma performance da ETE, exceto para o fósforo, com o efluente A e B na fase 2.

Os ensaios experimentais na coluna realizados durante 432 horas para o efluente A e 216 horas para o efluente B, levaram a resultados promissores em termos de remoção dos parâmetros analisados, permitindo atingir resultados bem significativos. Porém, quando comparado ao tempo de detenção hidráulica do reator biológico, os números mostraram através da interpolação linear que a cor, DQO e DBO ficaram bem aquém da eficiência da operação da ETE. Mulinari (2018), demonstrou a superioridade de remoção de nutrientes através de impregnação com uso de biofilmes, provando que é uma rota muito promissora em

termos de redução desses nutrientes, quando comparado a biomassa dispersa. A alta eficiência na remoção de DQO, DBO e cor no sistema operado com oxigênio com 99% de pureza na ETE, é favorecida pelo alto poder de mistura, proporcionando maior eficiência na transferência de oxigênio, com maior contato superficial entre as bolhas do gás com o meio líquido. Outros fatores que contribui para o alto desempenho, é a operação com alto reciclo de biomassa do decantador para o reator e a condição operacional que permite operar com alta quantidade de SSTA.

No caso experimental realizado na coluna, a dissolução do oxigênio foi realizada mediante um bico regulador de ar, instalado na base da coluna no ponto de junção com o líquido em fluxo ascendente, sem agitação mecânica, resultando em bolhas de tamanho maior, tornando a transferência do gás menos eficiente.

Figura 34 – Parâmetros comparativos da coluna de leito fluidizado e ETE para 68 horas



## 5. CONCLUSÃO

O processo de tratamento de efluentes com uso de biofilmes em coluna de leito fluidizado, apresentou resultados com maior eficiência na redução de cor e principalmente na redução dos nutrientes fósforo e nitrogênio, quando comparada com a eficiência de remoção da média histórica da ETE da empresa no período de 7 anos. O efeito sobre a redução da cor com o efluente A, nas fases de adaptação e formação do biofilme, apresentou resultado mais significativo, devido a presença da fase mista, com o lodo disperso e o biofilme suportado atuando em conjunto.

Durante os testes realizados neste trabalho, observou-se que o tratamento pelo processo convencional da ETE, a redução da DQO e DBO apresentou os melhores resultados comparados aos dois efluentes testados. Referentes ao índice de cor, apresentou melhores resultados que o efluente B, inclusive nas fases 1 e 2. A redução da concentração do corante azul turquesa no efluente B, com oxigênio puro (fase 1) e com ar atmosférico (fase 2), apresentaram bons resultados, porém, pode-se concluir que a utilização do oxigênio puro é mais eficiente na aeração microbológica, embora não vantajoso economicamente, como foi demonstrado no experimento a superioridade com sua aplicação.

As imagens feitas em MEV não mostraram adequadas para o acompanhamento do crescimento do biofilme. É esperado de que tenha ocorrido uma sinergia entre o biofilme e os microrganismos dispersos, onde alguns estudos anteriores já demonstraram que o uso do biofilme juntamente com biomassa em suspensão, fase mista, gerou resultados muitos superiores, frente à utilização em processo somente com biomassa suspensa.

O tempo de contato do efluente na coluna através de vários ciclos de passagem pode ser comparado ao tempo em que o efluente fica retido no reator biológico da ETE mediante à recirculação de lodo, resultando em maior eficácia apresentada no processo. O uso do suporte aplicado na formação de biofilme é uma rota promissora de elevado interesse ambiental e econômico. Sugere-se uma análise econômica do processo, por não estar compreendida dentro do escopo deste trabalho. O lodo gerado pelo tratamento convencional poderá ser reciclado internamente, secado e pirolisado, e com a menor geração de lodo na planta, possibilitando o aumento na vida útil de um aterro.

A redução de nitrogênio e fósforo em estações de tratamento de efluentes, tanto em efluente urbano quanto o industrial, vem sendo um grande desafio para atender os parâmetros diante da legislação, quanto ao índice permitido no lançamento em corpos hídricos. A

aplicação de biofilmes comprovou ser eficiente na redução destes compostos, viabilizando operações em ETE de forma mais segura.

O efeito comparativo entre o processo convencional da ETE da Empresa Coteminas S.A, unidade Blumenau SC e o método experimental realizado com aplicação de biofilme, traduz a grande vantagem do uso desta técnica, podendo levar ao interesse de pequenas, médias ou até mesmo de grandes ETEs.

A queda expressiva na redução da cor após o tratamento biológico com uso de biofilmes, significa uma redução significativa no uso de coagulantes, descolorantes e floculantes no tratamento físico-químico, reduzindo o custo desses produtos na ETE.

Pelos resultados finais do experimento, o uso de biofilmes para o tratamento de efluentes pode ser uma excelente alternativa, em razão do melhor desempenho apresentado na remoção de cor e mais significativamente em relação ao fósforo e nitrogênio. Uma maior quantidade de carga de material suporte na coluna, poderia aumentar o desempenho do processo com resultados ainda mais expressivos, resultando em maior quantidade da biota aderida na forma de biofilmes.

#### 5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Utilizar uma coluna em material transparente para visualização da fluidização dos sólidos;

Dimensionar a potência da bomba de acordo com as dimensões da coluna;

Utilizar controle de temperatura no tanque equalizador de efluentes para manter a temperatura em torno de 32 °C para melhor atividade bacteriana.

Instalar *in loco*; eletrodo de pH, oxímetro e termômetro para monitoramento constante.



## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

ALCÂNTARA, M. R.; DALTIM, D. A química do processamento têxtil. Instituto de química – Universidade de São Paulo. São Paulo/SP.1995. p.327.

AMORIM, C.C; LEÃO, M.M.D; MOREIRA, R.F.P.M. Comparação entre diferentes processos oxidativos avançados para degradação de corante azo. Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). **Eng Sanit Ambient.** v.14 n.4. out/dez 2009. 543-550.

ANTUNES, E.C.E.S.; PEREIRA, J.E.S.; FERREIRA, R.L.S.; MEDEIROS, M.F.D.; BARROS NETO, E.L. Remoção de corante Têxtil utilizando a casca do abacaxi como adsorvente natural. Departamento de engenharia química – Programa de pós graduação em engenharia química e engenharia civil – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. **HOLOS**, Ano 34, Vol.03 DOI: 10.15628/holos.2018.5334- agosto/2018.

ARCANJO, G. S.; ODA, T. Y. R; LOPES, A. C. P.; MOUNTEER, A. H.; SILVA, N. C.; MALTA, J. F. Remoção de cor ADMI de efluente têxtil após o tratamento biológico utilizando carvão ativado em pó. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFV, Viçosa, MG, Brasil. Seminário: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina, v. 39, n. 1, p. 03-10, jan./jul.2018.

AUGUSTO, L.G.S; GURGEL, I.G.D; NETO, H.F.C; MELO, C.H; COSTA, A.M. O contexto global e nacional frente aos desafios do acesso adequado à água para consumo humano. Departamento Centro de Pesquisas Aggeu Magalhães, Fiocruz (PE) Av. Moraes Rego s/n, Cidade Universitária. 50.670-420 Recife PE. [giraldo@cpqam.fiocruz.br](mailto:giraldo@cpqam.fiocruz.br) .2 Superintendência Estadual de Minas Gerais, Funasa, Ministério da Saúde. *Ciência & Saúde Coletiva*, 17(6):1511-1522, 2012.

BACCARIN, L.I.P.; HEMKEMEIER, M.; MENEGAZ, R.C.; BACCARIN, S.D. pós-tratamento físico-químico de efluente sanitário para remoção de fósforo com sais inorgânicos. *Revista de biologia e ciências da terra - Volume 13 - Número 2 - 2º Semestre 2013.*

BELTRAME, L. T. C.; Caracterização de Efluente Têxtil e Proposta de Tratamento. Dissertação de mestrado. Natal/RN, março – 2000.

BENETTI, A. D. A influência do tempo de detenção celular e decaimento endógeno na estequiometria de reações em processos biológicos de tratamento de águas residuárias. Doutor em Engenharia Ambiental pela Cornell University. Professor Associado do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – Porto Alegre (RS), Brasil. Artigo técnico Eng Sanit Ambient | v.18 n.1 | jan/mar 2013 | 47-54.

BOESSMANN, M. et al. Investigation and Modeling of Growth, Structure and Oxygen Penetration in Particle Supported Biofilms. **Chem. Eng. Technol.** 26 (2006) 2, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.

CAO, S.M.S. Nitrificação e desnitrificação em situações críticas de substrato. COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Instituto Alberto Luis de Coimbra. Pós graduação de pesquisa e engenharia. Maio/2018.

CAVALCANTI, A.M.; SANTOS, G.F. A indústria têxtil no brasil: uma análise da importância da competitividade frente ao contexto mundial. *Exacta engenharia de produção.* 20(3), 706-726. Artigo. v. 20 n. 3 (2022): (jul./set.).

CISNEIROS, A.P. B., VAZQUEZ, E. G. Simulação de Análise Preliminar de Riscos em Métodos de Minimização do Consumo de Água em Canteiros de Obra. *Revista Boletim do Gerenciamento* n° 2 – 2018.

COSTA, R.H.R.; CAMPOS, R.H.; WOLFF, D.B.; HOFFMANN, H.; LAVINA, C.; FILHO, P.B. Pós-tratamento de efluente anaeróbico utilizando leito fluidizado trifásico aeróbico. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Campus Universitário Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Artigo; ResearchGate. 2015.

FILHO, A.A.R.S.; DUARTE, A.D.; PEDROZA, T.D.; SILVA, G.L.; PESSOA, S.G.S. Análise da importância do reuso da água em lavanderia de beneficiamento de jeans. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 6, e40710614402, 2021.

FUJITA, R. M. L.; JORENTE, M. J. A Indústria Têxtil no Brasil: uma perspectiva histórica e cultural. Universidade do Estado de Santa Catarina Florianópolis, Brasil. Revista Moda Palavra e-Periódico vol.8, n.15, jan./jul.2015.

GERHARDT, R.; REISDORFER, G.; CARDOSO, M. G. Remoção de nitrogênio e fósforo de efluente industrial através da precipitação de estruvita. Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, RS, Brasil. Revista tecnológica, Santa Cruz do Sul, v. 22, n. 1, p. 35-40, jan./jun. 2018.

GILI, I. Tratamento de efluentes por eletrólise: estudo de caso para efluentes têxteis. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis 2015.

GONZÁLEZ, A. D.P.L. “Meta-análisis y brechas del conocimiento en la literatura científica sobre el ciclo del fósforo en suelos (1975-2020)”. Universidad de Chile – Facultad de Ciencias Escuela de Ciencias Ambientales y Biotecnología. Noviembre, 2021 Santiago – Chile.

GUIMARÃES, L. B. Caracterização microbiológica do lodo granular na remoção de nutrientes e potencial de recuperação de exopolímeros de efluentes em reatores em bateladas sequenciais. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis 2017.

JACOBS, A. C. P.; CORREA, C. Z.; PRATES, K.V. M. C. Formação de biofilmes em diferentes materiais suporte no tratamento biológico de esgoto sanitário. Periódico eletrônico. ISSN 1980-0827. XI Fórum Ambiental da Alta Paulista, v. 11, n. 8, 2015, pp. 95-109.

JENA, K.K.; MITTAL, H.; WADI, V.S.; MANI, G.K.; ALHASSAN, S.M. Advanced TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>-Sulfur (Ti-Si-S) Nanohybrid Materials: Potential Adsorbent for the Remediation of Contaminated Wastewater. Department of Chemical Engineering, Khalifa University, SAN Campus, Abu Dhabi, United Arab Emirates (UAE) Micro/Nano Technology Center, Tokai University (Shonan Campus), 4-1-1 Kitakanamae, Kanagawa 259-1292, Japan. DOI: 10.1021/acsami.9b09140 ACS Appl. Mater. Interfaces 2019, 11, 30247–30258.

JÚNIOR, A.S.M.; FILHO, R.C.B.; PAPADOPOLI, G.U.; MORAIS, A.C.; HOCK, L.B.J.; CHIRINOS, G.J. Avaliação da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) em uma lagoa facultativa. Departamento de Engenharia Civil do Complexo Educacional FMU – UNICAMP. INOVAE -ISSN: 2357-7797, São Paulo, Vol.6, JAN-DEZ, 2018 - pág. 300-319.

KUNZ, A., ZAMORA, P.P., MORAES, S.G., DURAN, N. Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. *Quimica Nova*, Vol. 25, No. 1, 78-82, 2002.

KETINNY, C. C.; XAVIER, C. R. Tratamento por Efluente Kraft por Sistemas de Lodos Ativados com Adição de Carvão Ativado Como Meio Suporte. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais** (UTFPR)-Curitiba (PR), Brasil. RBCIAMB, v.55, p.510-524, dezembro de 2020.

KLEIN, C.; AGNE, S.A.A. Fósforo: de nutriente à poluente! *Rev. Elet. em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental* (e-ISSN: 2236-1170. V.(8), nº 8, p. 1713-1721, SET-DEZ, 2012.

LANGE, C.R. Estudo das condições operacionais do processo de tingimento de fibra mista acrílica/algodão em bobina cruzada. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis SC. Dissertação de mestrado, dezembro de 2004.

LEAL, T. W. Tratamento de efluentes têxteis por processos adsortivos visando o reuso da água. 2014. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

LEITE, A.S.; BARCO, L.; TRINDADE, N.B.; ARAUJO, M.C.; BEZERRA, R. N.; ROSA, J. M.; COSTA, M. Custos ecológicos e sustentabilidade em recursos hídricos na indústria têxtil. *Revista de ciências gerenciais*. v.17 n.26 2013 p. 103-111.

MACEDO, J.S. Avaliação do uso de água e geração de efluentes no processo de beneficiamento de jeans: estudo de caso lavanderias industriais de Toritama/PE. Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Filosofia e Ciências Humanas Departamento de Ciências Geográficas – Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente. 2022.

MACHADO, K.M.G; COMPART, L.C.A; MORAIS, R.O; ROSA, L.H; SANTOS, M.H. Biodegradação de corantes têxteis reativos fungos basidiomicetos do ecossistema brasileiro. Curso de Ciências Biológicas, Centro de Ciências da Educação, Universidade Católica de Santos. Av. Conselheiro Nébias, 300. 11015-002, Santos, SP, Brasil. Industrial Microbiology - Braz. J. Microbiol. 37 (4) - Dec 2006.

MARONEZE<sup>1</sup>, M.M.; ZEPKA<sup>1</sup>, L.Q.; VIEIRA<sup>2</sup>, J.G.; QUEIROZ<sup>2</sup>, M.I.; LOPES<sup>1</sup>, E.J. A tecnologia de remoção de fósforo: gerenciamento do elemento em resíduos industriais. <sup>1</sup>Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS, Brasil Departamento de Tecnologia e Ciência de Alimentos. <sup>2</sup>Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande, RS, Brasil Escola de Química e Alimentos – Rev. Ambient. Água vol. 9 n. 3 Taubaté - jul. / Sep 2014.

MARQUES<sup>1</sup>, C.F.; CONCEIÇÃO<sup>2</sup>, V.M. Alternativas Tecnológicas de Tratamento de Efluentes Têxteis: uma Revisão Bibliométrica. 1. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, RJ -Brasil. 2. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, RJ –Brasil. Revista Internacional de Ciências, Rio de Janeiro, v. 12, n. 03, p. 194-212, set-dez2022.

MARTINS, C. A. Simulação do perfil axial de pressão na coluna Riser de um leito fluidizado circulante. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Ponta Grossa/2015.

MATA, A.M.T; PINHEIRO, H.M.; LOURENÇO, N.D. Desenvolvimento de um biorreator de grânulos aeróbios para tratamento de água residuária sintética e reativação do sistema após parada prolongada. Artigo técnico - DOI: 10.1590/S1413-41522018154272. Escola Superior de Tecnologia de Setúbal do Instituto Politécnico de Setúbal – Setúbal, Portugal. Departamento de Bioengenharia e Biociências do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa – Lisboa, Portugal. Eng Sanit Ambient - v.23 n.4 - jul/ago 2018 - 757-766.

METCALF & EDDY. Tratamento de efluentes e recuperação de recurso. 5º edição, Mc Graw Hill Education – Bookman. AMGH editora Ltda. 2016.

MEZZOMO, L.F. Reatores de biofilme em bateladas sequenciais visando a nitrificação e

desnitrificação simultânea de esgoto sintético sob baixa relação carbono/nitrogênio. Universidade Federal de Alagoas – Centro de tecnologia – Programa de pós-graduação em recursos hídricos e saneamento. Maceió/ 2019.

MIGLIORINI, M.V.; MORAES, M.S. A; MACHADO, M. E; CARAMÃO, E.B. Caracterização de fenóis do bio-óleo da pirólise de caroço de pêssego por GC/MS e GCxGC/TOFMS. Laboratório de Química Analítica Ambiental e Oleoquímica, Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Av. Bento Gonçalves, 9500, Agronomia, Cep 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil. Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Energia e Ambiente – INCT E&A, Salvador, BA, Brazil. - **Scientia Chromatographica** 2013; 5(1):47-65.

MOSAI, A. K.; CHIMUKA, L.; CUKROWSKA, E.M.; KOTZÉ, I. A.; HLANGANANI, T. The Recovery of Rare Earth Elements (REEs) from Aqueous Solutions Using Natural Zeolite and Bentonite. Molecular Sciences Institute, School of Chemistry, University of the Witwatersrand, Private Bag X3, WITS, Johannesburg 2050, South Africa *Water Air Soil Pollut* (2019) 230: 188.

MULINARI, J. Tratamento de efluente da indústria têxtil através de biofilme em suporte carbonoso impregnado com nutrientes. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) Florianópolis 2018.

NASCIMENTO, R.F. Pós-tratamento de estações de tratamento de efluentes têxteis com uso de macrófitas aquáticas *lemna sp.* Universidade Federal de Pernambuco – centro acadêmico do agreste núcleo de tecnologia engenharia civil. PE - Caruaru 2018.

NETO, I.F.F. Estudo dos processos de nitrificação e desnitrificação numa Estação de Tratamento de Águas Residuais. Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade nova de Lisboa. Outubro 2011.

NINAD, O.; MOHAN S. Development of Nanoporous Textile Sludge Based Adsorbent for the Dye Removal from industrial Textile Effluent. Indian Institute of Technology Madras - Environmental and Water Resources Engineering Division, Department of Civil Engineering, Chennai, Tamil Nadu, 600 036, India – 2021. *Journal of Hazardous Materials*.

OLIVEIRA, G. S. S.; ARAÚJO, C. V. M.; FERNANDES, J. G. S. Microbiologia de sistema de lodos ativados e sua relação com o tratamento de efluentes industriais: a experiência da Cetrel. **Laboratório de Biologia** – Via Atlântica, Km 9 – Polo Industrial – 42810-000 – Camaçari Eng. Sanit. Ambient v.14 n.2 2009 183-192.

PERRY, T.A. Avaliação da Remoção de Azoto por Nitrificação e Desnitrificação Simultânea. Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa. Junho/2020.

QUEIROZ, L. M.; AMARAL, M. S.; MORITA, D. M.; YABROUDI S. C.; SOBRINHO, P. A. Aplicação de processos físico-químicos como alternativa de pré e pós-tratamento de lixiviados de aterros sanitários. **Eng. Sanit. Ambient.**, v.16 n.4, p. 403-410, out/dez 2011.

QUEIROZ, M.T.A.; QUEIROZ, C.A.; ALVIM, L.B.; SABARÁ, M.G.; LEÃO, M.M.D.; AMORIM, C.C. Reestruturação na forma do tratamento de efluentes têxteis: uma proposta embasada em fundamentos teóricos. 4 Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Avenida Presidente Antônio Carlos, 6627, Pampulha, CEP 31270-901, Belo Horizonte – Gest. Prod., São Carlos, v. 26, n. 1, e1149, 2019.

ROCHA, K.M.; SALAMONI, S.P.; SANTOS, R.H.; GOLDBACH, A. Monitoramento e avaliação de parâmetros físico-químicos e microbiológicos de uma estação de tratamento de efluentes com sistema de lodos ativados em uma agroindústria no meio oeste de Santa Catarina. Revista de Engenharia Civil IMED, 3(1): 25-36, jan./jun. 2016 - ISSN 2358-6508 – DOI: 10.18256/2358-6508/rec-imed. v3n1p25-36.

ROCHA, C.M.R.; SILVA, V.P.R.; SILVA, P.F.; CAMPOS, J.H.B.C. Análise do consumo de água e produtos químicos em indústrias têxteis no Agreste Pernambucano. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais. Jan 2021 - v.12 - n.1.

RULKENS, Win. Sewage Sludge as a Biomass Resource for the Production of Energy: Overview and Assessment of the Various Options. Energy & Fuels, Wageningen **University**, **Sub-department of Environmental Technology**, Wageningen, The Netherlands v. 22, p. 9 -15, 2008.

SANTANA, J. S.; SANTOS, B. R.; RESENDE, B. O. Utilização da casca de banana como biossorvente para adsorção de metais pesados viabilizando sua utilização em águas residuárias da indústria galvânica. *INOVAE – Journal of engineering, architecture, and technology innovation* - ISSN: 2357-7797, São Paulo, Vol.8, JAN-DEZ, 2020 - pág. 143-157.

SANTOS, L. F.; PAIVA, T.C.B.; SILVA, F.T. Microrganismos encontrados no sistema de lodos ativados aplicado ao tratamento do licor negro. Escola de Engenharia de Lorena – USP, 1Dep. de Química e 2Dep. de Biotecnologia. XX congresso Brasileiro de Engenharia Química. Florianópolis, 10/2014.

SANTOS, C.E.D., Remoção de nitrogênio de efluente de reator anaeróbico via processo NDS utilizando sulfeto como doador de elétrons na desnitrificação autotrófica. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Hidráulica e Saneamento. São Carlos, 2019.

SANTOS, J.S. WALESIUKE, N. D'AMELIO, M.T.S. **Estudo de Leito Fluidizado**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 04, Ed. 07, Vol. 02. pp. 106-130, julho de 2019.

SANTOS, S.S. Investigação da presença e da formação de biofilmes por estafilococos em micro-usina de beneficiamento de leite. Universidade Estadual Paulista. Campus de Jaboticabal. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – SÃO PAULO – BRASIL 2009.

SANTOS, S.L.; MINÁ, V.G.; CATUNDA, S.Y.C.; HAANDEL, A.C.V. Influência da concentração de lodo sobre o consumo de energia para aeração em sistemas de lodo ativado. *Eng Sanit Ambient*; v.22 n.3; maio/jun 2017; 437-444.

SCHIMITT, G. T.; MODOLO, R. C. E.; MORAES, C. A. M.; JOHANN, A. D. D.; NUNES, T. Uso de Cinza de Casca de Arroz como Constituinte da Camada de Substrato em Sistema Wetland para Tratamento de Efluente. **Revista Tecnologia e Sociedade**, Curitiba, v. 12, n. 26, p. 109-121, set./dez. 2016.

SILVA, C. A. A.; SILVA, C. F.; MATOS, J. M. E. Síntese, caracterização e aplicação do trióxido



de molibdênio na fotocatalise de efluente têxtil sintético. Programa de Pós-Graduação em Química, Departamento de Química. Universidade Federal do Piauí, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Ciências dos Materiais, 64049-550, Teresina, PI, Brasil. *Cerâmica* 64 (2018) 454-465.

SILVA, N.T.M. Remoção de carbono e nitrogênio de efluente de matadouro em reator anaeróbio-aeróbio de leito fixo. Universidade Federal de Pernambuco. Centro acadêmico do agreste – programa de pós-graduação em engenharia civil e ambiental. *Tecnologia ambiental*. Caruaru/2018.

SILVA, R. T. S. Processo de Degradação do Corante RR141 através da Formação do Biofilme em Suporte Nutricional. **Programa de Pós-graduação em Engenharia Química**, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis SC, p. 86, setembro, 2016.

SILVA, T.C. Avaliação do resíduo argiloso proveniente da indústria do alumínio como adsorvente de corantes têxteis. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Química - PPGEQ – UFPE – Recife/PE; agosto/2008.

SONAI, G. G. Ativação de adsorventes carbonosos para a remoção de corantes de efluentes têxteis. Dissertação de mestrado, **Programa de pós-graduação em engenharia química**, maio /2012

SOUZA, A.A.U.; MELLO, J.M.M.; BRANDÃO, H.L.; SILVA, A.; SOUZA, S.M.A.G.U. Application of Biofilm in the Degradation of Contaminants in Industrial Effluents. ResearchGate. Janeiro 2011. Publisher: Nova Science Publishers, Inc., NY, USA.

SPERLING, M.V. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – DESA. Volume 4, 2ª edição ampliada, 2002.

Standard Methods, For The Examination Of Water And Wastewater. 1989, 17<sup>th</sup> Edition. American Public Health Association, 1015 Fifteenth Street NW, Washington, DC 20005.

SUDIANA, K., CITRAWATHI, D.M., SASTRAWIDANA, D. K., MARYAM, S., SUKARTA, N., WIRAWAN. G. A. H. Biodegradation of Turquoise Blue Textile Dye by Wood Degrading Local Fungi Isolated from a Plantation Area. Department of Chemistry, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Universitas Pendidikan Ganesha, Singaraja 81116 Bali, Indonesia. *Journal of Ecological Engineering* 2022, 23(7), 205–214.

TEIXEIRA, L.F. Estudo do processo de pirólise termocatalítica como alternativa ao aproveitamento do lodo de esgoto doméstico. Universidade Federal do Tocantins – campus universitário de Palmas, pós-graduação *scripto sensu* em agroenergia. Palmas TO 2014.

TONIOLLO, M.; ZANCAN, N. P.; WÜST, C. Indústria têxtil: sustentabilidade, impactos e minimização. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul-Campus Sertão (IFRS). VI Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental; Porto Alegre/RS – 23 a 26/11/2015.

TUNUSSI, J. L.; SOBRINHO, P. A. Remoção de Cor e Nitrificação de Efluentes de Tinturaria Têxtil Através de Processos Biológicos Anaeróbio-Aeróbio, University of São Paulo, p.456, dezembro/2003

VASQUEZ, A. R. Caracterização e Aplicação de Adsorvente Para Remoção de Corantes de Efluentes Têxteis em Batelada e Coluna de Leito Fixo. **Dissertação de Mestrado do Programa Pós-Graduação de Engenharia Química.** Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis SC. P.67, março 2008.

VASQUES, A. R. Caracterização de adsorventes obtidos por combustão e pirólise de lodo residual e aplicação no tratamento de efluentes têxteis. 2012. 130 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

VILELA, A.P.P. Otimização do processo de tingimento pós confecção de artigos de algodão e linho com corantes reativos. Universidade do Minho – Escola de Engenharia Dissertação de mestrado em química têxtil. Outubro 2018.

WANDERLEY, P.R.B. Reatores químicos em leito fluidizado. Modelagem e simulação. Editora Dialética. São Paulo – 2022.

WEISS, F., MACHADO, E.L., RODRIGUEZ, A.A.L., LOPEZ, D.A.R., STROTHMANN, A. Pirólise de passivo de aterro de resíduos industriais para geração de carvão. Universidade de Santa Cruz do Sul – Santa Cruz (RS), Brasil. Eng. Sanitária Ambiental - v.27 n.3 – maio/jun 2022 / 523-531.

WIELEWSKI, L. P; ZUCCOLOTTO, T.; SOARES, M.; PROLA, L. D. P; LIZ, M. V. Degradation of the Textile Dye Reactive Black 5 by Basidiomycetes. Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science. Rev. Ambient. Água vol. 15 n. 1, e2464 - Taubaté 2020.

YANO, A.A; GOMES, L.A. Uso de cloro no controle de bactérias filamentosas em lodos ativados de indústria frigorífica. Universidade Federal de Mato Grosso – Cuiabá, MT, Brasil Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science: v. 8, n.2, p. 146-156, 2013.

ZOPPAS, F.M.; BERNARDES, A.M.; MENEGUZZI, A. Parâmetros operacionais na remoção biológica de nitrogênio de águas por nitrificação e desnitrificação simultânea. UFRGS – Porto Alegre (RS), Brasil. Eng. Sanitária Ambiental | v.21 n.1 | jan/mar 2016 | 29-42.

## 6.1. ANEXO

## PROCEDIMENTO ANALÍTICO PARA DETERMINAÇÃO DA DQO – ASTM 5220 D

- Adicionar 2 mL da amostra em cubeta específica pré-preparada para esse procedimento;
- Agitar a amostra e colocar no reator de DQO por duas horas.
- Deixar a amostra resfriar antes de realizar a leitura;
- Realizar a leitura através de comprimento de onda específico do espectrofotômetro.

## PROCEDIMENTO ANALÍTICO PARA DETERMINAÇÃO DO FÓSFORO TOTAL – ASTM 4500 P B

- Colocar 25 mL da amostra em um Becker de 40 mL;
- Adicionar 0,1 g de persulfato de amônio P.A;
- Adicionar 2 mL de ácido sulfúrico 5,25 N;
- Levar a chapa aquecedora mantendo em ebulição branda até redução do volume para 20 mL;
- Resfriar a amostra até a temperatura ambiente;
- Adicionar 2 gotas de fenolftaleína;
- Ajustar o pH da amostra para a faixa de 7 e 8 com solução de hidróxido de sódio 6,0 N;
- Transferir a amostra digerida para uma proveta de 25 ml e completar o volume;
- Adicionar 1 mL de reagente molibdovanadato;
- Realizar a leitura da amostra utilizando o espectrofotômetro pelo comprimento de onda específico.

## PROCEDIMENTO ANALÍTICO PARA DETERMINAÇÃO DO NITROGÊNIO AMONIACAL – ASTM 4500 C

- Adicionar 5 mL da amostra em tubo Nessler de 50 mL;
- Completar o volume com água destilada para 50 mL;
- Utilizar uma cubeta de 25ml para realizar a leitura;
- Adicionar 3 gotas de estabilizador mineral;
- Adicionar 3 gotas de álcool poli vinílico;
- Adicionar 1 mL de reagente de Nessler;
- Agitar a amostra;
- Realizar a leitura no espectrofotômetro no comprimento de onda específica;

- O resultado será multiplicado por 10.

PROCEDIMENTO ANALÍTICO PARA DETERMINAÇÃO DA COR - ASTM 2120 C

- Utilizar uma cubeta de 25 mL para realizar a leitura;
- Fazer uma diluição de acordo com a intensidade da cor;
- O fator de diluição deve ser usado para realizar a leitura no espectrofotômetro;

Para a realização da leitura da cor, procedeu-se com uma diluição em um tubo de Nessler, com 10,0 ml da amostra através de uma pipeta graduada, e completado o volume para 50 ml, para que tornasse possível a leitura no espectrofotômetro.