

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA QUÍMICA

YASMIN MATOS CARDOSO DOS SANTOS

**MONTAGEM E OPERAÇÃO DE UM BIORREATOR DE LEITO FIXO UTILIZANDO
RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL PARA TRATAR EFLUENTES POR
CONSÓRCIO MICROALGA-FUNGO**

**Maceió/AL
2025**

YASMIN MATOS CARDOSO DOS SANTOS

**MONTAGEM E OPERAÇÃO DE UM BIORREATOR DE LEITO FIXO UTILIZANDO
RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL PARA TRATAR EFLUENTES POR
CONSÓRCIO MICROALGA-FUNGO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Química da Universidade Federal de Alagoas,
como requisito para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo de Farias
Silva

Coorientadora: Prof^a. Dra. Brígida Maria Villar da
Gama

**Maceió/AL
2025**

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

S237m Santos, Yasmin Matos Cardoso dos.

Montagem e operação de um biorreator de leito fixo utilizando resíduos da construção civil para tratar efluentes por consórcio microalga-fungo / Yasmin Matos Cardoso dos Santos. – 2025.

66 f. : il. color.

Orientador: Carlos Eduardo de Farias Silva.

Co-orientadora: Brígida Maria Villar da Gama.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2025.

Bibliografia: f. 58-66.

1. Biorreator de leito fixo. 2. Soro do leite. 3. Consórcio microalga-fungo. 4. Resíduos de construção. I. Título.

CDU: 602.42-7

**MONTAGEM E OPERAÇÃO DE UM BIORREATOR DE LEITO FIXO UTILIZANDO
RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL PARA TRATAR EFLUENTES POR
CONSÓRCIO MICROALGA-FUNGO**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Alagoas, como
requisito para a obtenção do Título de
Mestre em Engenharia Química.

Aprovada em: Maceió, 28 de fevereiro de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **CARLOS EDUARDO DE FARIAS SILVA**
Data: 28/02/2025 15:38:15-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Carlos Eduardo de Farias Silva (Orientador - PPGEQ/UFAL)

Documento assinado digitalmente
 **BRIGIDA MARIA VILLAR DA GAMA**
Data: 01/03/2025 08:34:57-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof^a. Dr^a. Brígida Maria Villar da Gama (Coorientadora – Pós-Doc/PPGEQ/UFAL)

Documento assinado digitalmente
 **RENATA MARIA ROSAS GARCIA ALMEIDA**
Data: 05/03/2025 13:24:28-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof^a. Dr^a. Renata Maria Rosas Garcia Almeida (PPGEQ/UFAL)

Documento assinado digitalmente
 **ALBANISE ENIDE DA SILVA**
Data: 28/02/2025 21:04:30-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof^a. Dr^a. Albanise Enide da Silva (CTEC/UFAL)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo que conquistei até agora, mas peço a Ele para me dar sabedoria para conquistar muito mais.

Agradeço a minha mãe Ana Valéria Matos Cardoso, heroína que me deu apoio, incentivo nas horas difíceis, de desânimo e cansaço. E que todas as vezes em que eu fraquejei me mostrava que faltava muito pouco para alcançar meus objetivos. Ao meu padrasto, Osman de Lima Peixoto Júnior, pois sem ele muito do que alcancei não seria possível, agradeço pelas horas abdicadas nos finais de semanas e feriados, ao me acompanhar para o laboratório, muitas das vezes sem nem almoçar e ao meu irmão, Ronaldo Cardoso dos Santos Neto, pois você ter passado no mestrado antes de mim, me incentivou a lutar pelo meu.

Agradeço ao me esposo, Afonso Fernandes Matos Neto, pela paciência nos momentos difíceis e por todas as vezes que tivemos de renunciar aos nossos momentos juntos para me dedicar aos estudos e pesquisa. E aos meus dois amores: Bono, que virou estrelinha no meu primeiro ano de mestrado, o que me causou uma das piores dores que já pude sentir, mas que me acompanhou ao longo de uma vida e me viu sair da infância e me tornar a mulher que sou hoje e Otto, meu pequeno grande gigante, pela sua força todas as vezes que adoeceu e eu não pude estar lá ou me dedicar ao máximo por estar ocupada com a minha pesquisa. Só eu sei o quanto difícil era.

Agradeço também ao meu tio, Jóse Márcio Matos Cardoso, que sempre me incentivou e renunciou ao seu tempo me acompanhando no laboratório em momentos difíceis. E a minha avó, Dilma Matos Cardoso, que mesmo não estando mais consciente desse mundo e de quem eu sou ou o que faço, foi essencial para que eu pudesse chegar aonde cheguei, você me deu o bem mais precioso desse mundo, a educação.

Agradeço aos meus colegas de laboratório, em especial Josi, João, Gabi, Mari, Luís, Yarlei, Bruno e Mica que me auxiliaram diretamente e dividiram comigo seus conhecimentos para que este trabalho fosse concluído.

Por fim agradeço ao meu orientador Carlos Eduardo de Farias e coorientadora Brígida Villar da Gama por toda paciência, auxílio, conhecimento, suporte e orientação para que eu pudesse me tornar alguém um pouco melhor do que eu era antes.

RESUMO

O setor da construção civil é um dos maiores geradores de resíduos no mundo, e a maioria desses materiais é descartada de forma inadequada. Além disso, o descarte inadequado de efluentes, como o proveniente da indústria de laticínios, também gera sérios problemas ambientais em relação à Demanda Química de Oxigênio (DQO), Nitrogênio Total (NT) e Fósforo Total (FT). Nesse sentido, o objetivo desse trabalho foi montar e operar um biorreator aerado de leito fixo utilizando resíduos da construção civil – RCCs, para otimizar o tratamento terciário de soro do leite, utilizando a simbiose microalga-fungo (*Tetrademus obliquus* e *Fusarium* sp.). Os RCCs foram caracterizados pela microscopia eletrônica de varredura (MEV), Difractometria de Raios X (DRX) e Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR). Além disso, os reatores foram operados à temperatura ambiente, sob aeração contínua de 1,5 vvm, agitados magneticamente no fundo do tanque, sob intensidade luminosa de $100 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Na primeira etapa, de verificação do preenchimento do leito, e manutenção da atividade microbiana, os reatores foram operados por 6 dias com a menor carga orgânica, seguido por esvaziamento e realimentação do efluente (novo ciclo em batelada). Na segunda etapa, os reatores foram nomeados como R1, R2, R3 e R4, com cargas orgânicas distintas, possuindo DQO ~ 1350, 3150, 660 e 11.550 mg.L^{-1} , NT ~ 60, 75, 173 e 385 mg.L^{-1} ; e FT ~ 10, 24, 55 e 86 mg.L^{-1} , respectivamente. Os RCCs foram caracterizados como irregulares (conjuntamente textura lisa e poroso), cristalino, com grupos hidroxilas, carboxílicos e alcenos em sua superfície, o que facilitaria a adesão microbiana. Após o tratamento, obteve-se concentrações de DQO residuais de $58,70 \pm 2,38$, $309,36 \pm 19,83$, $40,45 \pm 11,50$, e $95,19 \pm 15,86 \text{ mg.L}^{-1}$, para R1-R4, respectivamente; enfatizando que R2 não funcionou adequadamente. Para NT, as concentrações residuais foram $4,40$ - $6,36 \pm 0,10$ - $0,23$, $12,33 \pm 0,36$, $10,74 \pm 0,44$ e $33,38 \pm 2,18 \text{ mg.L}^{-1}$, para R1-R4, respectivamente. Por sua vez, para FT residual, $0,17 \pm 0,02$, $1,12 \pm 0,01$, $4,16 \pm 0,02$, $8,28 \pm 0,02 \text{ mg.L}^{-1}$, para R1-R4, respectivamente. Em termos de biomassa celular, após a fase de preenchimento do leito, houve a produção de lodo microbiano entre 140-1250 mg.L^{-1} . O estudo contribuiu para a pesquisa sobre biorreatores sustentáveis e estratégias para reaproveitamento de resíduos sólidos urbanos e industriais.

Palavras-chave: tratamento biológico, *Tetrademus obliquus*, *Fusarium*.

ABSTRACT

The construction industry is one of the largest generators of waste in the world, and most of these materials are wrongly disposed. In addition, inappropriate disposal of effluents, such as those from the dairy industry, also generates serious environmental problems in relation to Chemical Oxygen Demand (COD), Total Nitrogen (TN) and Total Phosphorus (TP). In this sense, the objective of this work was to assemble and operate an aerated fixed bed bioreactor using construction wastes - CWs, to optimize the tertiary treatment of dairy wastewater, using microalga-fungus symbiosis (*Tetradescmus obliquus* and *Fusarium* sp.). The CWs were characterized by scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD) and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). Furthermore, the reactors were operated at room temperature, under continuous aeration of 1.5 vvm, magnetically stirred at the bottom of the tank, under a light intensity of $100 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. In the first stage, to verify bed filling and maintenance of microbial activity, the reactors were operated for 6 days with the lowest organic load, followed by emptying and refeeding of the effluent (new batch cycle). In the second stage, the reactors were named as R1, R2, R3 and R4, with different organic loads, having COD $\sim 1350, 3150, 660$ and $11,550 \text{ mg.L}^{-1}$, TN $\sim 60, 75, 173$ and 385 mg.L^{-1} ; and TP $\sim 10, 24, 55$ and 86 mg.L^{-1} , respectively. The CWs were characterized as irregular (smooth and porous in texture), crystalline, with hydroxyl, carboxylic and alkene groups on their surface, which would facilitate microbial adhesion. After treatment, residual COD concentrations of $58.70 \pm 2.38, 309.36 \pm 19.83, 40.45 \pm 11.50$, and $95.19 \pm 15.86 \text{ mg.L}^{-1}$ were obtained for R1-R4, respectively; emphasizing that R2 did not work properly. For TN, the residual concentrations were $4.40\text{-}6.36 \pm 0.10\text{-}0.23, 12.33 \pm 0.36, 10.74 \pm 0.44$ and $33.38 \pm 2.18 \text{ mg.L}^{-1}$, for R1-R4, respectively. In turn, for residual TP, $0.17 \pm 0.02, 1.12 \pm 0.01, 4.16 \pm 0.02, 8.28 \pm 0.02 \text{ mg.L}^{-1}$, for R1-R4, respectively. In terms of cellular biomass, after the bed filling phase, there was production of microbial sludge between $140\text{-}1250 \text{ mg.L}^{-1}$. The study contributed to research on sustainable bioreactors and strategies for reusing urban and industrial solid waste.

Keywords: biological treatment, *Tetradescmus obliquus*, *Fusarium*.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - A cadeia Produtiva da Construção 2021.....	16
Gráfico 2 – Destaques do setor da indústria de alimentos.....	21
Gráfico 3 – Difratometria de Raios X para Tijolo, Cerâmica, Brita e Argila.....	45
Gráfico 4 - Espectro de infravermelho por transformada de Fourier para amostras de Tijolo, Cerâmica, Brita e Argila.....	47
Gráfico 5 – Demanda Química de Oxigênio para os reatores R1 (A), R2 (B), R3 (C) e R4 (D).....	48
Gráfico 6 – Concentrações do Nitrogênio Total ao longo dos dias para os reatores R1 (A), R2 (B), R3 (C) e R4 (D).....	51
Gráfico 7 – Concentração Fósforo total ao longo dos dias para os reatores R1 (A), R2 (B), R3 (C) e R4 (D).....	53
Gráfico 8 – peso seco celular ao longo dos ciclos para os reatores R1 (A), R2 (B), R3 (C) e R4 (D).....	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Geração de RCD no Brasil e por grande região - Comparativo 2021 e 2022.....	18
Figura 2 – Métodos utilizados no tratamento de efluentes.....	22
Figura 3 – Microalga <i>Tetrademus obliquus</i>	29
Figura 4 – Fungo filamentoso <i>Fusarium</i> sp.....	30
Figura 5 – Simbiose microalga-fungo.....	31
Figura 6 - Leito fixo de resíduos da construção civil.....	39
Figura 7 – Esquema do Reator.....	39
Figura 8 – Método de operação dos reatores.....	40
Figura 9 - MEV dos materiais componentes do leito, argila (A), brita (B), cerâmica (C) e tijolo (D).....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Alguns tipos de Biorreatores e suas características.....	26
Tabela 2 - Grupos funcionais presentes no Tijolo, Cerâmica, Brita e Argila.....	46

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
2 OBJETIVOS.....	15
2.1 Geral.....	15
2.2 Específicos.....	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1 Setor da construção civil.....	16
3.1.1 Resíduos da construção civil e seus impactos.....	17
3.1.2 Destinação atual dos RCC's.....	19
3.2 Setor da indústria de alimentos.....	20
3.2.1 Geração de efluentes pela indústria de alimentos e tratamentos biológicos.....	21
3.3 Indústria de laticínios.....	23
3.3.1 Soro do leite.....	24
3.4 Biorreatores.....	25
3.4.1 Reator aeróbio de leite fixo.....	26
3.5 Microalgas e fungos filamentosos.....	28
3.5.1 Microalgas.....	28
3.5.2 Fungos filamentosos/bolores.....	29
3.5.3 Tratamento de efluentes utilizando consórcio entre microalgas e fungos filamentosos.....	31
4 METODOLOGIA.....	33
4.1 Coleta e caracterização do efluente a ser tratado.....	33
4.1.1 Análise da Demanda Química De Oxigênio (DQO).....	33
4.1.1.1 Preparação da solução de digestão.....	33
4.1.1.2 Preparação do reagente de ácido sulfúrico.....	34
4.1.1.3 Preparação da solução padrão de biftalato de potássio	34
4.1.1.4 Cálculo.....	34
4.1.2 Análise do Nitrogênio Total (NT).....	34
4.1.2.1 Cálculo.....	35
4.1.3 Análise do Fósforo Total (FT).....	35
4.1.3.1 Cálculo.....	36
4.1.3.2 Solução diluidora de cor.....	36

4.1.4 Determinação do pH.....	36
4.1.5 Peso seco celular (PS).....	36
4.1.5.1 Cálculo.....	37
4.2 Coleta e caracterização do material que formou o leito fixo.....	37
4.2.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	37
4.2.2 Análise por Difratomia de Raios X (DRX).....	38
4.2.3 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)....	38
4.3 Construção do leito fixo.....	38
4.4 Montagem e funcionamento do reator.....	39
4.5 Análise da eficiência do sistema de tratamento.....	41
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
5.1 Caracterização do material utilizado no leito.....	43
5.1.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	43
5.1.2 Análise por Difratomia de Raios X (DRX).....	44
5.1.3 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)....	45
5.2 Caracterização do soro do leite.....	47
5.3 Demanda química de oxigênio (DQO).....	48
5.4 Nitrogênio total (NT).....	50
5.5 Fósforo total (FT).....	52
5.7 Peso seco celular.....	54
6 CONCLUSÃO.....	56
REFERÊNCIAS.....	57

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o setor da construção civil é considerado um dos maiores geradores de resíduos no mundo. O constante crescimento desse setor tem elevado significativamente a quantidade de resíduos provenientes das atividades de construção, renovação e demolição. Infelizmente, a maior parte desses resíduos acaba sendo descartada de maneira inadequada, o que gera diversos problemas ambientais. Dessa forma, tem crescido o número de pesquisas voltadas para estratégias de recuperação desses materiais com o intuito de minimizar seu volume e os impactos negativos causados no meio ambiente e na saúde humana (SERVADEI et al., 2024; ABDULLAH, 2024).

Conjuntamente, a problemática de excesso de resíduos da construção civil (RCC), os efluentes agroindustriais e urbanos podem causar severos problemas ambientais devido ao seu descarte em corpos d'água sem o correto tratamento prévio, pois em sua maioria, esses efluentes apresentam alto teor de carga orgânica e, geralmente, alta biodegradabilidade. Sendo assim, o efluente proveniente da indústria de laticínios, principalmente o soro proveniente da produção de queijo, apresenta um alto potencial poluidor devido à sua elevada demanda química de oxigênio (40.000–100.000 mg·L⁻¹), nitrogênio (800–2500 mg·L⁻¹) e fósforo (300–600 mg·L⁻¹). Diante desse cenário, estudos recentes têm buscado alternativas para o reaproveitamento e tratamento desse efluente (PONMANIAN et al., 2025; DE ANDRADE et al., 2023; SANTOS et al., 2024; MEDEIROS et al., 2025).

Dentre os principais processos de tratamento desse efluente de laticínio (soro do queijo ou leite), o método biológico é um dos mais utilizados, sejam eles processos aeróbicos ou anaeróbicos, e apesar de serem utilizados processos tradicionais como o de lodo ativado e digestão anaeróbica, ainda restam quantidades significativas de demanda química de oxigênio, nitrogênio total e fósforo total, que necessitam de tratamento terciário (SANTOS et al., 2024).

Desta forma os consórcios entre fungos e microalgas representam uma simbiose promissora e eficiente no tratamento de águas residuais. Essa interação é fundamentada no mutualismo, onde microalgas realizam a fotossíntese, fornecendo oxigênio e compostos orgânicos, enquanto fungos filamentosos, por meio de suas

enzimas extracelulares, convertem matéria orgânica em nutrientes solúveis (MEHRA et al., 2025; DAS et al., 2022)

Aliado a isso, os resíduos da construção civil possuem superfície irregular e porosa e por esse motivo podem se tornar excelentes suportes para o crescimento microbiano (ESTOLANO et al., 2024). Além disso, processos com imobilização de microrganismos tem a vantagem de aumentar a concentração celular dentro do biorreator, conferindo-os maior resistência às mudanças das condições ambientais, nutricionais e operacionais (STIBBS et al., 2024; ABYAR et al., 2024), podendo se tornar uma alternativa importante no tratamento de efluentes em relação ao crescimento do microrganismo em forma suspensa.

Sendo assim, este trabalho teve como objetivo realizar a montagem e operação de um biorreator aerado de leito fixo a partir de resíduos da construção civil visando potencializar o tratamento de efluentes, tomando como modelo efluente da indústria de laticínios e como agente bioativo o consórcio entre o fungo filamentoso *Fusarium* sp. e a microalga *Tetrademus obliquus*.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Montar um biorreator aerado de leito fixo confeccionado a partir de resíduos da construção civil e operá-lo para tratar efluentes a partir do consórcio microalga-fungo.

2.2 Específicos

- Coletar e caracterizar os resíduos da construção civil;
- Montar e operar o biorreator aerado de leito fixo analisando a eficiência de remoção de DQO, NT e FT em uma carga orgânica fixa a partir do soro do leite;
- Verificar a estabilidade do leito (tempo de operação);
- Testar as diferentes cargas orgânicas e avaliar a capacidade de remoção de contaminantes.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

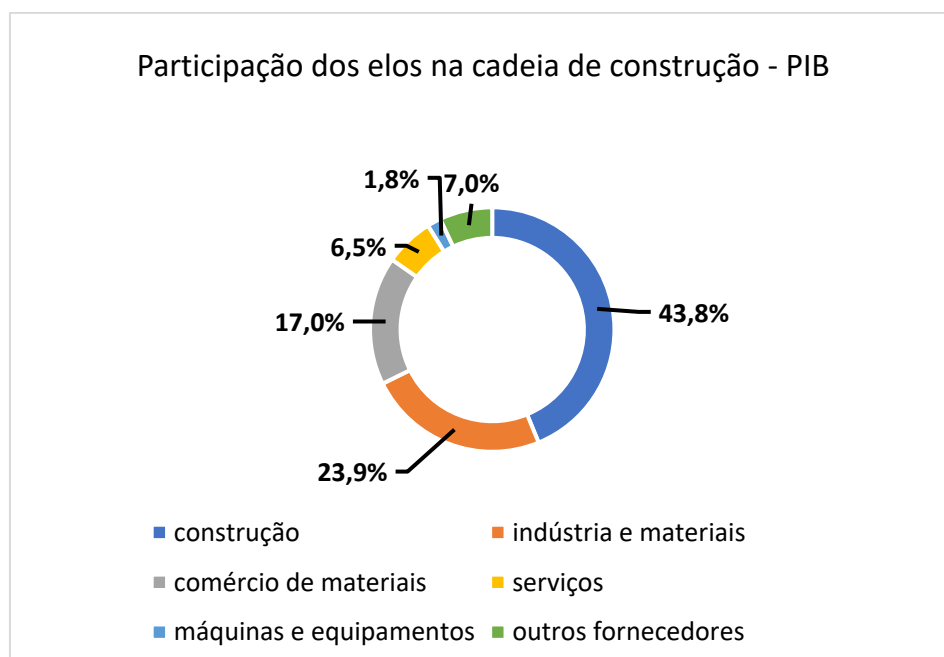
3.1 Setor da construção civil

O setor da construção civil pode ser considerado como parte essencial da economia de muitos países ao redor do mundo. Este setor engloba uma grande diversidade de atividades relacionadas à construção, manutenção e melhoria de infraestruturas e edificações residenciais, comerciais e industriais. O que inclui obras de saneamento, instalações hidráulicas e elétricas (MARCHI et al., 2024; BRAGA et al., 2024).

Segundo o PAIC – Pesquisa Anual da Indústria da Construção Civil, realizada pelo IBGE, em seu último levantamento realizado em 2022 com os dados referentes ao ano de 2021, no Brasil, o setor da construção civil possuía mais de 140 mil empresas ativas, gerando uma receita bruta de um pouco mais de 397 milhões de reais ao ano. O setor da construção também é responsável por empregar mais de duas milhões de pessoas, sendo considerado um grande gerador de empregos, com uma ampla gama de profissionais (PAIC, 2024).

A seguir o Gráfico 1 um traz o percentual de atividade de cada departamento dentro do setor da construção civil.

Gráfico 1 - A cadeia Produtiva da Construção 2021



Fonte: Adaptada de ABRAMAT e FGV, 2021.

Apesar do setor da construção civil ter sua importância na economia, ele também é responsável por causar impactos significativos nas comunidades e meio ambiente, oriundo de poluição das águas e do ar, destruição de habitats naturais, geração de resíduos sólidos, entre outros. Este último faz parte do objeto de estudo deste trabalho, visando sua redução no meio ambiente e amenizar seus impactos através de seu reaproveitamento.

3.1.1 Resíduos da construção civil e seus impactos

O crescimento desordenado da população mundial, aliado às altas densidades demográficas, desenvolvimento da economia mundial e industrialização, são os principais fatores responsáveis pela geração de resíduos sólidos, ao estimular as atividades de construção. Demolições são cada vez mais comuns com o intuito de substituir edifícios e estruturas civis antigas por outras maiores, melhores e mais modernas (CAMILO et al., 2022; LEE et al., 2024).

Os resíduos sólidos gerados pela construção civil, também conhecidos como RCC (Resíduo da Construção Civil), possuem impactos bastante significativos no meio ambiente, na saúde pública e na sustentabilidade de forma geral. De acordo com Lee et. al (2024) estes resíduos possuem em sua composição vários tipos de poluentes, incluindo desde resíduos finos a metais pesados e produtos químicos orgânicos persistentes.

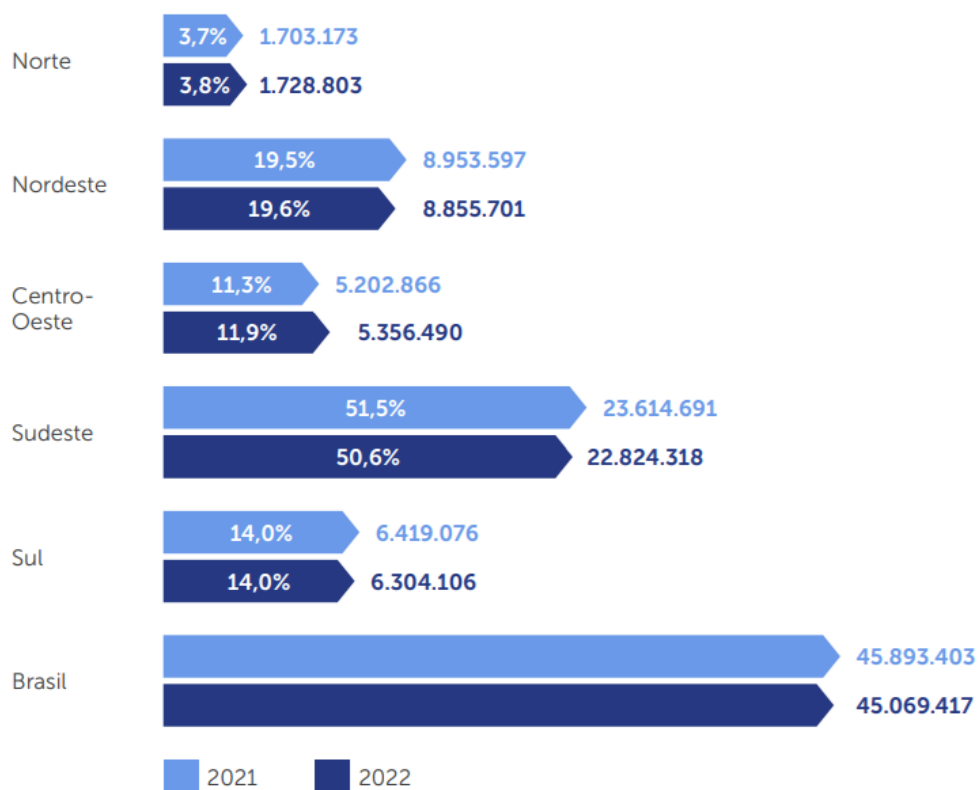
Estes resíduos são popularmente conhecidos como entulho ou metralha, oriundos do processo de construção, reforma, demolição, pavimentação entre outros serviços e são compostos por restos de fragmentos de materiais. Considerado um dos grandes vilões da poluição urbana pois quando acumulados acabam sendo vetor de doenças por atrair roedores e insetos (ABRECON, 2024).

De acordo com o Conselho Nacional do meio ambiente – CONAMA, resolução nº 307 de 05 de julho de 2002, são considerados resíduos sólidos da construção civil: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc (CONAMA, 2024).

Um panorama realizado pela ABREMA (Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente) em 2023 constatou que no ano de 2022 foram produzidos mais de 45 milhões de toneladas de resíduos sólidos no setor da construção civil, dados inferiores

ao do ano anterior, mas ainda assim alarmantes. Nos dados fornecidos pelo panorama, na Figura 1, também é possível verificar que o Nordeste se destaca como a segunda região com maior índice de geração de resíduos.

Figura 1 - Geração de RCD no Brasil e por grande região - Comparativo 2021 e 2022 (toneladas)



Fonte: ABREMA, 2023.

O acúmulo de resíduos e seu descarte inadequado pode comprometer o meio ambiente e a saúde dos seres humanos, prejudicando a drenagem urbana, aumentando o volume de lixo e a proliferação de vetores patológicos e poluição.

O setor é poluidor e causador de impactos ambientais, tanto na produção direta de insumos usados na construção como na extração de materiais e geração de resíduos nos processos de construção, manutenção e demolição. O que evidencia o quanto o setor necessita da implementação de práticas sustentáveis como a redução da geração e reaproveitamento desses resíduos (BARBOSA JÚNIOR et al., 2024; LEÃO et al., 2024).

3.1.2 Destinação atual dos RCC's

No mundo, os resíduos da construção civil para serem aproveitados precisam ser processados para serem reciclados. Durante esse processamento os materiais são lavados e separados de acordo com seu tamanho. Contudo, as taxas de reciclagem costumam ser baixas e atribuem-se a esse comportamento o fato de o processo ser considerado caro e levar um certo tempo para sua realização. Sendo assim, o material não processado costuma ser jogado em aterros sanitários, depósitos de lixo urbanos ou usinas de incineração (ARGAWAL et al., 2022).

Com o intuito de reduzir os descartes e acúmulo desses resíduos, e por isso tem-se buscado mais opções de reutilização destes materiais. Santos et al. (2024) realizaram um estudo sobre a incorporação de restos de vidros descartados após a lapidação na argamassa do cimento Portland. Os resíduos de vidro foram peneirados na peneira de nº 200 (0,75mm) e foi utilizado para substituir o agregado miúdo. Após a preparação da argamassa foram moldadas sete formulações: uma de referência, três substituindo parcialmente o cimento pelo resíduo de lapidação do vidro (RLV) e três substituindo parcialmente a areia, todos com concentrações de 5%, 10% e 15%. O traço adotado foi 1:3 (cimento:areia), com relação água/cimento de 0,48. Vários ensaios foram realizados para determinar o índice de resistência, absorção, retração, entre outros, concluindo que a presença do resíduo resultou em maior durabilidade do cimento e trouxe maior resistência a compressão até 10% de substituição da areia e maior resistência à tração até 5% de substituição, comprovando a viabilidade técnica da utilização de resíduo de lapidação de vidro como substituto parcial ao cimento Portland e ao agregado em argamassas.

De forma similar, Pimentel et al. (2023) reaproveitaram os resíduos da construção civil na composição do material para produção de telhas verdes (TV), onde utilizaram solo local, biocarvão de casca de arroz carbonizada, resíduos da construção civil, vermiculita e vermicomposto. Nesse caso o resíduo da construção civil entra com o intuito de melhorar o comportamento térmico da telha. Os módulos de telhado verde foram construídos em containers plásticos de 20 dm³ cada um, possuindo dimensões de 36 cm x 27 cm x 20 cm. Os módulos de TV foram eficientes na redução das temperaturas máximas e aumento das temperaturas mínimas, conseguindo manter a temperatura dos ambientes internos com valores inferiores à temperatura do ar.

Um outro material que vem sendo estudado seu reaproveitamento é a madeira. Júnior (2024) utilizou restos de madeira dos canteiros de obra para a geração de energia em indústrias de cerâmica. A indústria de cerâmica fornecia o caminho para a coleta da madeira e o canteiro de obras ficava responsável por fazer a coleta seletiva do material. A madeira então era queimada e sua queima gerava calor como fonte de energia. Sendo a madeira considerada de grande potencial uma vez que nesta biomassa está presente celulose e lignina como conteúdo energético.

Domingues e Nunes (2024) em seu artigo, fizeram um levantamento de estudos feitos no Brasil que envolvesse a reutilização de resíduos da construção civil. As autoras encontraram um total de 1183 artigos, considerando apenas artigos de acesso gratuito, dos quais apenas 10 artigos, segundo elas, possuíam um conteúdo relevante sobre o assunto em questão.

Este resultado levanta a questão da importância ao incentivo do estudo relacionado ao reaproveitamento dos materiais descartados em obras da construção civil.

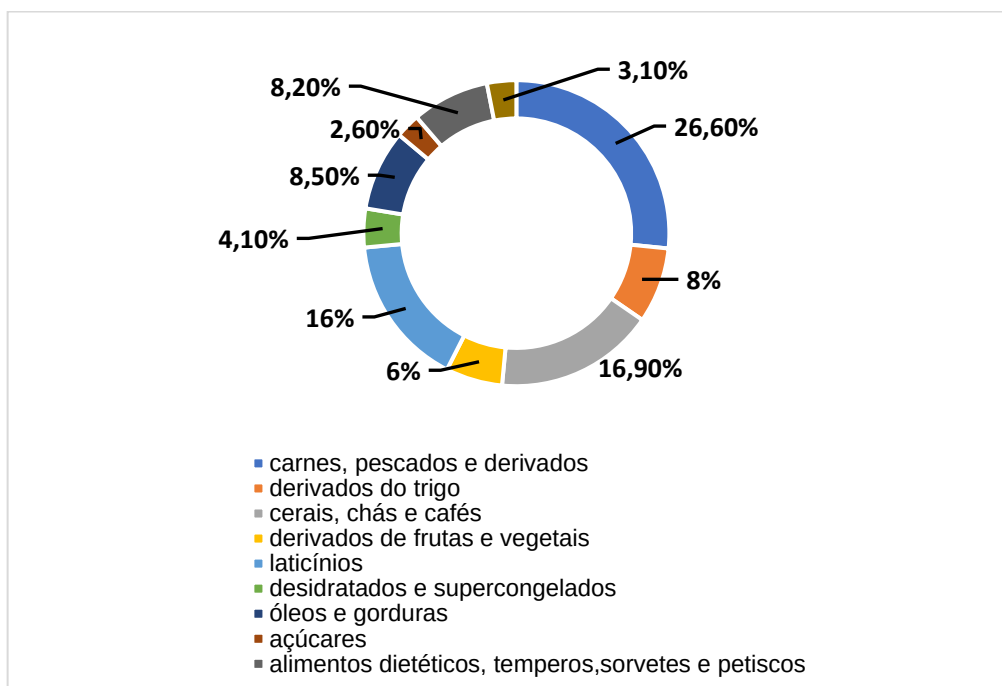
3.2 Setor da indústria de alimentos

Segundo a ABIA – Associação Brasileira da indústria de alimentos (2023) em seu relatório anual o maior setor industrial do Brasil é o de alimentos e bebidas. São mais de 38 mil empresas responsável pelo processamento de 58% de tudo que é produzido no campo, dos quais 72% abastecem o mercado interno e os demais são exportados para 190 países. Tornando o país o segundo maior exportador mundial de alimentos industrializados.

O processamento industrial é essencial para que os alimentos possam ser consumidos de forma segura, além de os tornarem agradável ao paladar e fáceis de digerir. Para atender às necessidades dos consumidores a indústria desenvolve alimentos com menos calorias; adiciona proteínas, fibras, vitaminas e minerais; elimina a adição de açúcares; remove o glúten e/ou lactose (ABIA, 2023). Por meio do processamento industrial dos alimentos é possível disponibilizar alimento de qualidade durante todo o ano em qualquer lugar.

O Gráfico 2 mostra a distribuição das indústrias do setor de alimentos, onde as indústrias de laticínios; carnes, pescados e derivados; e cereais, chás e cafés mostram-se predominantes.

Gráfico 2 – Destaques do setor da indústria de alimentos



Fonte: adaptada de ABIA, 2023.

3.2.1 Geração de efluentes pela indústria de alimentos e tratamentos biológicos

Um dos setores que mais consomem água é a indústria alimentícia, com destaque para as indústrias de carne, peixes, frutos do mar e laticínios. A indústria de alimentos é conhecida por gerar diversos tipos de efluentes durante seus processos de produção e estes efluentes podem variar dependendo do tipo de alimentos produzidos, dos métodos de processamento e das práticas de higiene adotadas. Estes efluentes, também conhecidos como águas residuais, carregam consigo resíduos sólidos e gasosos e possuem níveis consideráveis de matéria orgânica DQO, DBO, sólidos suspensos, entre outros (MORKER et al., 2023).

A disposição do efluente no meio ambiente sem o tratamento adequado pode propiciar a contaminação do solo e dos recursos hídricos, podendo afetar qualquer forma de vida presente naquele habitat (MARINHO, 2017).

Segundo Cunha e Pasqualetto (2021) diversas leis, regulamentos e políticas ambientais estabelecem diretrizes e critérios para determinar o grau de tratamento

exigido para assegurar que o impacto ambiental decorrente do descarte de esgoto tratado seja aceitável. Consequentemente, a formulação de parâmetros sanitários para o efluente é essencial para coordenar a poluição da água proveniente tanto de fontes industriais quanto da população, uma vez que esses efluentes geralmente contêm uma variedade significativa de poluentes.

Baptista e Rodolpho (2021) mencionam que o tratamento dos efluentes industriais, incluindo os gerados pela indústria de alimentos, é conduzido através de um sistema aerado por misturadores. Após esse processo, o esgoto tratado é reintroduzido no meio ambiente, seguindo os parâmetros estabelecidos pela legislação ambiental. Uma estratégia comum para tratar os efluentes da indústria de alimentos é a instalação de estações de tratamento de efluentes, onde os efluentes são submetidos a processos físicos, químicos e biológicos. No tratamento biológico é realizado por bactérias e outros microrganismos, que degradam a matéria orgânica removendo contaminantes do efluente.

A Figura 2 explica resumidamente os métodos utilizados no tratamento de efluentes.

Figura 2 – Métodos utilizados no tratamento de efluentes



Fonte: Adaptado de Marinho (2017).

As águas residuárias da indústria de alimentos são extremamente ricas em matéria orgânica por esse motivo além dos aspectos como cor, turbidez, temperatura e sólidos em suspensão também se faz necessário avaliar DQO (Demanda Química de Oxigênio) e DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) podendo ser um meio

propício ao desenvolvimento microbiano, principalmente em processos de tratamento biológico (MARINHO, 2017).

A biodegradação/biorremediação, de acordo com Sizirici e Yildiz (2020), é uma alternativa de baixo custo e alta eficácia para a decomposição dos poluentes orgânicos presentes nas águas residuais. A biorremediação se destaca como uma tecnologia que aproveita o metabolismo dos microrganismos com o intuito de reduzir ou eliminar, até níveis considerados aceitáveis, os poluentes presentes no meio, sendo, portanto, uma opção promissora para a descontaminação, oferecendo custos de implementação mais acessíveis e com menor impacto ambiental, entre os principais microrganismos destacam-se as bactérias, fungos e enzimas (COLLA, et al., 2008; RODRIGUES, 2021) e a decomposição pode ocorrer aeróbica ou anaerobicamente (MUTECA, 2012).

3.3 Indústria de laticínio

A indústria de laticínio é composta por fábricas responsáveis por realizar a pasteurização do leite cru e pela produção de alimentos derivados do leite como manteiga, iogurtes, leite em pó, creme de leite, entre outros. Essas indústrias contribuem significativamente para o desenvolvimento do país e produto interno bruto (PIB). Atualmente o Brasil é o terceiro maior produtor de leite do mundo (GAVLAK e DE SOUSA VIDAL, 2022; FORMIGONI, 2020; FAO, 2021).

Como qualquer outro tipo de indústria, as indústrias de laticínio consomem grandes quantidades de água durante os processos produtivos, lavagem dos maquinários e pisos. Esse uso intenso de águas leva a geração de grandes volumes de efluentes constituídos principalmente de resíduos de leites e produtos lácteos provenientes das operações de processamentos. Esses efluentes possuem um elevado potencial poluidor devido as altas concentrações de nutrientes como nitrogênio, fósforo e material orgânico. Quando lançados nos corpos hídricos sem tratamento adequado podem causar sérios desequilíbrios ambientais, como por exemplo a eutrofização, afetando a fauna e flora (GAVLAK e DE SOUSA VIDAL, 2022; GALVÃO e DOS SANTOS GOMES, 2018; ZKERI et al., 2021).

As características quantitativas e qualitativas das águas residuais variam de acordo com os métodos de processamentos utilizados nas indústrias, os produtos finais e o porte da fábrica. Contudo, em geral os efluentes das indústrias de laticínios

são classificados como de alta ou média concentração. Podem ser classificados como água residual de alta concentração, o soro do queijo e permeados de leite por apresentarem altas concentrações orgânicas e de gordura, com DQO's de até 100 g.L⁻¹. Para águas residuais de média concentração, são aquelas provenientes da fabricação de sorvetes, manteiga, iogurte e águas residuais de queijo cuja DQO não ultrapassa 5 g.L⁻¹ (ZKERI et al., 2021; AHMAD et al., 2019; SLAVOV, 2017).

3.3.1 Soro do leite

O soro do leite (ou do queijo) é um líquido de cor amarelo-esverdeado resultante do processo da coagulação do leite na fabricação do queijo, sendo considerado o subproduto mais abundante da indústria de laticínios, e sua composição vem sendo estudada no Brasil como forma de encontrar alternativas para o seu reaproveitamento. Este subproduto é bastante valorizado devido seu alto valor nutricional, grandes volumes gerados e seu poder poluente (GAVA et al., 2018; MICHEL et al., 2015; DESCONSI et al., 2014; SANTOS 2012).

O soro do leite representa de 85 a 90% do total do volume de leite utilizado na fabricação do queijo. Volume que compreende cerca de 55% dos nutrientes do leite, o que inclui proteínas, sais minerais, vitaminas, lactose e lipídios. A proteína do soro do leite possui elevado potencial biológico por ser rica em leucina e lisina, considerados aminoácidos essenciais, além de ser uma boa fonte de metionina e cisteína. Estes aminoácidos são importantes para a saúde humana pois promovem a síntese proteica e outras atividades metabólicas. Destacam-se entre as proteínas do soro do leite: alfa-lactoalbumina (α -la), a beta-lactoglobulina (β -lg) e a lactoferrina (Lf) (ILTCHENCO et al., 2018; SOARES et al., 2018; DESCONSI et al., 2014).

Sua composição encontra-se distribuída da seguinte forma: 93,3% de água, 5% de lactose, 0,85% de proteínas, 0,36% de gordura e 0,53% de minerais. O soro pode ser classificado em soro ácido e soro doce. O primeiro possui um pH em torno de 4,6 e é resultante da manufatura de caseína ou de queijos fabricados com leite coagulados por ácido, como o queijo cottage, quark, requeijão e ricota. Já o segundo possui um pH em torno de 6,3 e 6,7 e é produzido a partir da coagulação enzimática do leite, obtido de queijos tipo cheddar, minas frescal, minas padrão e muçarela (BOSI et al., 2013; DESCONSI et al., 2014).

No Brasil o soro do leite é amplamente utilizado na indústria de alimentos

principalmente na produção de ricota e queijo tipo *cottage*, além de ser empregado como ingrediente em diversos produtos lácteos fermentados. Contudo, o soro do leite possui um elevado potencial poluente e por se tratar de um produto perecível não é possível realizar a sua estocagem por períodos prolongados. Durante muitos anos o soro do leite foi considerado um resíduo industrial, o que levou ao descarte de grandes volumes que eram muitas vezes não tratados e despejados diretamente nos rios ou utilizados como suplementos para ração animal. Com o aumento das exigências dos órgãos de fiscalização de saúde e ambiental em diferentes esferas do governo e a maior sensibilização da sociedade sobre os danos ambientais causados por essa prática diversos estudos têm sido propostos para enfrentar este desafio (DESCONSI et al., 2014; BOSI et al., 2013).

3.4 Biorreatores

Reatores para processos biológicos, conhecidos como biorreatores, são definidos por Tonso et al. (2021) como sistemas desenvolvidos para conduzir um bioprocessos, oferecendo um ambiente favorável ao crescimento celular e à produção do bioproduto desejado. Este conceito se aplica a equipamentos mais complexos que possibilitam a homogeneização do meio de cultura com as células, mantendo as variáveis de processo, como temperatura, pH e concentração de oxigênio dissolvido, sob controle.

Da mesma forma, Filho e Vitolo (2017) conceituam o biorreator como um reator químico convencional, adaptados para operar com biocatalisadores, no qual são introduzidos os componentes desejados no meio reacional com controle de temperatura podendo conter ou não agitação do meio.

A Tabela 1 traz uma lista de alguns dos tipos de reatores que podem funcionar como biorreatores para realizar o tratamento de águas residuais, incluindo algumas de suas características.

Tabela 1 – Alguns tipos de biorreatores e suas características

Tipos de biorreatores	Características	Referências
Tanque agitado – STR	Um dos mais utilizados, oferece vantagens como melhor homogeneização do meio e prevenção de espumas. Sua agitação é obtida usando um impulsor que mistura o meio de cultura	SCHMIDT-DURÁN et al., 2025.
Leito Fixo	É uma alternativa aos sistemas de cultivo tradicionais, possui uma matriz imobilizada que favorece a adesão e expansão celular. Aumento do desempenho e eficiência do tratamento.	STIBBS et al., 2024; ABYAR et al., 2024.
Leito Fluidizado	Dispositivos altamente eficientes, design compacto, baixo consumo de energia. Uso de microrganismos imobilizados em partículas fluidizadas	RAZZAK et al., 2024.
De membrana	Superioridade na produção de água de alta qualidade facilitando a reciclagem. O líquido/sólido é separado com filtração de membrana de baixa pressão.	YÜCESOY et al., 2024.
Airlift	Eficiência na remoção simultânea de carbono e outros nutrientes, suspensão eficaz e completa de mais de uma fase, baixo consumo de energia, facilidade de operação.	RAHIMI et al., 2025.

Fonte: Autora, 2025.

3.4.1 Reator aeróbio de leito fixo

Reatores aeróbios de leito fixo costumam ser diferentes dos demais pelo crescimento da comunidade microbiana aderidos sobre o leito (imobilizados), formando biofilmes. Nas últimas décadas algumas pesquisas têm destacado as

vantagens no uso desse tipo de reator em relação aos reatores onde a biomassa fica em suspensão, incluindo por exemplo condições operacionais mais estáveis e flexíveis, maior tempo de detenção da comunidade microbiana e desempenho mais eficiente pelo aumento da concentração celular no biorreator (STIBBS et al., 2024; ABYAR et al., 2024).

Nesse sentido os biorreatores aeróbios de leito fixo têm se mostrado uma boa opção no tratamento de águas residuais, pois podem ser compactos, propiciam uma boa fixação dos microrganismos e bons níveis de remoção de DQO e nitrogênio total em um reator de única etapa, devido à uniformidade em uma ampla faixa de taxas de concentrações de efluentes (ROVEROTO et al., 2021; MANIKKAMPATTI PALANISAMY et al., 2022).

Existem trabalhos que testam a viabilidade da construção do leito fixo com diferentes tipos de materiais como forma de reduzir o descarte desses materiais e pelo fato de ser economicamente viável. Chaturvedi et al (2022) por exemplo utilizaram pedaços de espuma de polietileno de baixa densidade (biorreator cilíndrico com diâmetro interno de 6 cm e altura de 53 cm), Wang et al. (2024), por sua vez, utilizaram sabugos de milho (resíduo da indústria de processamento do milho) como leito fixo para suporte dos microrganismos, usando reatores com capacidade de 9L com entrada e saída de 3L por ciclo, funcionam por 12 h e 2 ciclos por dia. Cada ciclo incluiu influente (1h), agitação anóxica (3h), aeração (5h), sedimentação (2h), drenagem e inatividade (1h). Temperatura em torno de 15-22°C e tempo de retenção hidráulica de 4h.

Por outro lado, Abyar et al. (2024) utilizaram resíduos plásticos triturados para estruturar um leito fixo para crescimento do lodo ativado, com intuito de tratar águas residuais de laticínios. Tanto as águas residuais como o lodo ativado foram coletados na Sabah Dairy Company, localizada no Irã. Os biorreatores utilizados eram de vidro com capacidade de 3L operados em modo de lote à temperatura ambiente ($25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) com difusores de ar na parte inferior. O material do leito foi embalado em tecidos de renda e aprisionado em hastes de aço para garantir sua imobilização. O leito compactado possuía uma área superficial de $181,37 \text{ cm}^2$. O lodo foi inoculado nos reatores e mantido por 2 a 4 semanas para se adaptarem ao efluente e desenvolver um biofilme. O oxigênio fornecido foi ajustado para o crescimento microbiano ($< 2\text{mg.L}^{-1}$). A bomba também foi desligada a cada uma hora para estabelecer condições

óxicas e anaeróbicas. Foram obtidas taxas de remoção de DQO, nitrato e fostato superiores a 78%.

3.5 Microlagas e fungos filamentosos

Os seres vivos são constituídos por unidades menores denominadas células, e quando seu material genético é envolto por uma membrana (carioteca) os organismos são chamados eucarióticos, quando o material genético é disperso no citoplasma são chamados procarióticos. Robert H. Whittaker classificou, de acordo com a forma como os organismos obtêm seu alimento e energia celular, além de outras características, em cinco reinos: protista, monera, plantae, animalia e fungi. Dos quais os microrganismos estão presentes em três: monera (bactérias), protista (protozoários e algas), fungi (leveduras e fungos filamentosos - bolores) (CARVALHO, 2016), que podem ser utilizados para o tratamento de efluentes das mais variadas origens, principalmente as bactérias, microalgas e fungos filamentosos (DE ANDRADRE et al., 2024; LIN et al., 2023).

3.5.1 Microalgas

Microalgas são microrganismos fotossintetizantes unicelulares, que utilizam energia luminosa para sintetizar uma variedade de compostos bioativos (polissacarídeos, lipídios e proteínas), comumente encontrados em ambientes de água doce e marinha. Esse grupo diversificado de organismos engloba principalmente espécies aquáticas e terrestres, tanto eucarióticas (microalgas denominadas biologicamente de maneira correta) quanto procarióticas (apesar das cianobactérias pertencerem ao Reino Monera e serem classificadas junto as microalgas por comodidade de aplicação) (TANG et al., 2020).

Graças à sua notável taxa de crescimento e capacidade de sobrevivência em ambientes adversos, as microalgas tornaram-se aplicáveis em diversas áreas industriais, pois estes microrganismos geram biomassa valiosa com inúmeras aplicações nas indústrias alimentícia, de biocombustíveis e farmacêutica. Além disso, sua capacidade de purificação vem sendo cada vez mais empregada para reduzir a carga poluente das águas residuais, oferecendo uma abordagem autossustentável de tratamento. Reconhecida por sua eficácia na remoção de uma grande variedade de

nutrientes e poluentes como azoto, fosfato, compostos carbônicos, corantes, compostos farmacêuticos e metais pesados, desempenhando papel crucial na biorremediação (DUARTE et al., 2021; ZAINITH et al., 2021).

De acordo com De Andrade (2022), o tratamento realizado por esses microrganismos pode ocorrer em diversos sistemas, sejam abertos, fechados ou híbridos. A escolha do sistema está diretamente relacionada as características desejadas em termos de design e configuração. Contudo, em sistema aberto, geralmente em lagoas e tanques abertos, oferece várias vantagens econômicas e operacionais, o que o torna amplamente utilizado para o tratamento de efluentes.

Figura 3 – Microalga *Tetradismus obliquus*



Fonte: Autora, 2024.

Neste trabalho foi utilizado a microalga *Tetradismus obliquus* (Figura 3), conhecido mundialmente como *Scenedesmus obliquus* ou *Acutodesmus obliquus*, é uma alga verde clorófito de origem tropical que possui uma parede celular composta por açúcares neutros (glicose, manose, frutose e ramnose) e aminoácidos. Cada célula possui um único cloroplasto que preenche toda a superfície interna da célula, localizado na região central. É uma espécie que se reproduz de forma assexuada liberando autósporo por meio de ruptura celular. Esse gênero é conhecido por possuir um grande potencial biológico devido a produção de biomassa (DO CARMO CESÁRIO et al., 2022; OLIVEIRA et al., 2021).

3.5.2 Fungos filamentosos/ bolores

Os fungos são microrganismos considerados uma forma de vida antiga (com cerca de 640 milhões de anos), organismos eucariontes, heterotróficos e considerados os protagonistas da manutenção da estabilidade geoquímica da terra. Além de possuírem um enorme valor comercial e uma importância crucial em nossa

sociedade, tanto de forma benéfica como prejudicial. Sendo necessários estudos para entender, aprimorar e controlar tecnologicamente seu uso (MENDES et al., 2022).

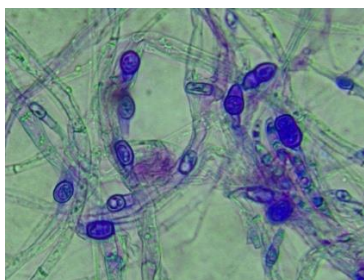
Reproduzem-se sexuada ou assexuadamente e alguns apresentam ciclo parassexuado. Apresentam-se em habitats variados, algumas espécies são aquáticas, dos quais a maioria vive em água doce, mas também existem fungos marinhos. A maioria, no entanto, vive em ambientes terrestres, podendo ser no solo ou em matéria vegetal morta (NOÇÕES DE MICOLOGIA, 2010).

Os fungos microscópicos são divididos em dois grupos: as leveduras e os fungos filamentosos (também conhecidos como bolores). Os bolores, são de acordo com Guimarães et al. (2021), células cilíndricas, com espécies que possuem importância na fabricação de antibióticos, produtos alimentícios, produção de enzimas, deterioração de diferentes materiais.

Os bolores são formados por filamentos denominados hifas, que crescem rapidamente à temperatura ambiente e ramificam-se. Cada hifa é formada pela reunião de muitas células. As paredes rígidas das hifas são formadas de quitina, celulose e glicose (GUIMARÃES et al., 2021).

Os fungos filamentosos estão trazendo uma revolução para a indústria biotecnológica devido à sua versatilidade, amplas aplicações e capacidade de biodegradação. Utilizando fungos filamentosos como fontes de antioxidantes, probióticos, iniciadores de fermentação e produtores de enzimas que atuam em diversos processos industriais, podemos observar impactos positivos na produção e otimização de processos complexos e dispendiosos na indústria alimentícia (MENDES et al., 2022).

Figura 4 – Fungo filamentoso *Fusarium* sp.



Fonte: Autora, 2025.

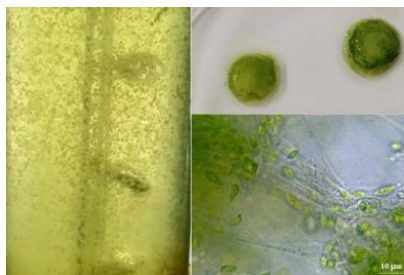
O fungo filamentoso do gênero *Fusarium* sp. (Figura 4) possui mais de 200 espécies e estão presentes no ambiente na forma de esporos, de saprófitos do solo e

em patógenos de plantas e cereais. Hassan et al. (2020) utilizou em seu estudo cepas desse fungo associados à outros fungos (*Cladosporium sp.* e *Aspergillus sp.*) para analisar seu desempenho no tratamento do soro do leite.

3.5.3 Tratamento de efluentes utilizando consórcio entre microalgas e fungos filamentosos

A aplicação de microalgas no processo de biorremediação de efluentes tanto urbanos quanto industriais tem mostrado resultados excelentes, tanto na remoção de nutrientes, especialmente nitrogênio e fósforo, quanto na operação do sistema que é simples e não requer grandes estruturas. Nas últimas décadas, os pesquisadores têm focado no uso das microalgas com outros microrganismos como fungos (Figura 5), bactérias e outras algas, nos chamados consórcios entre microrganismos. O consórcio promove um processo alternativo e de baixo custo para produção e recuperação microalgal, além de ser útil no tratamento de águas residuárias devido à combinação de seus metabolismos (DE ANDRADE et al., 2022; DE ANDRADE et al., 2024).

Figura 5 - Simbiose microalga-fungo



Fonte: Dos Santos, 2024.

Na grande maioria dos casos o consórcio entre fungos e microalgas traz benefícios para ambas as espécies envolvidas. Enquanto as microalgas liberam oxigênio, por meio da fotossíntese, os fungos utilizam este oxigênio na respiração, liberando dióxido de carbono e favorecendo o desenvolvimento das microalgas. Sendo assim, o sistema simbiótico de microalgas e fungos pode ser mais efetivo do que os sistemas em que estes microrganismos são utilizados de forma isolada. Isso se deve ao fato de a simbiose favorecer o desenvolvimento desses microrganismos (DE ANDRADE et al., 2022; SANTOS et al., 2023, MEDEIROS et al., 2022).

Efremenko et al. (2024) destaca o crescente interesse na formação de consórcios microbianos artificiais, especialmente no desenvolvimento e aplicação de diversos processos de biorremediação, sendo estes consórcios projetados tanto para o tratamento do solo como para o tratamento da água.

A aplicabilidade do consórcio microalga-fungo no tratamento do soro do leite ainda é escassa na literatura, como menciona Santos et al. (2023) em seu trabalho. No entanto, a autora faz menção ao trabalho desenvolvido por Medeiros et al. (2022) que obteve resultados satisfatórios no tratamento do soro do leite utilizando a microalga *Tetrademus sp.* e o fungo filamentoso *Cunninghamella echinulata*, com remoção de 91,3% de DQO, 90,46% de fósforo total e 77% de nitrogênio total.

Marazzi et al. (2023) utilizou o consórcio entre *Chlorella spp.*, *Scenedesmus spp.* e cianobactérias para realizar o tratamento de águas residuais da indústria têxtil. Foram montados 4 fotobioreatores paralelos com volume de 3L cada e uma coluna de Plexiglas, com agitação magnética de 300 rpm, iluminação de LED com aproximadamente $100 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ trabalhando 12 horas por dia. O pH mantido entre 7,5 e 8,7. Os reatores foram operados em batelada durante 15 dias para permitir a aclimação dos microrganismos, com detenção hidráulica de 13 dias e em seguida iniciando o teste contínuo por 50 dias. A biomassa teve um rendimento de 6×10^6 células/mL e os contaminantes tinham concentrações iniciais de DQO de aproximadamente 764 mg.L^{-1} , de fosfato de aproximadamente 2 mg.L^{-1} e de $\text{NH}_4 - \text{N}$ de aproximadamente 200 mg.L^{-1} , havendo uma redução de 21,9%, 81,5% e 9,15%, respectivamente.

Por outro lado, Rathour et al. (2024), fez um levantamento bibliográfico sobre o uso do consórcio microalga-bactéria no tratamento de águas residuais. Em seu trabalho ele traz alguns exemplos de autores como Charria-Girón et al. (2021) que utilizou lodo aeróbico e *C. Sorokiniana*, para tratar águas residuais suínas (em mini reatores de tanque agitado (500 mL), com agitação de 250 rpm a 30°C e com fornecimento de oxigênio (2vvm) e Mubashar et al. (2020) que trabalharam com *Chlorella vulgaris* e *Enterobacter sp. MN17*, no tratamento de águas residuais da indústria têxtil. O experimento foi realizado em tubos plástico de 5L com diferentes concentrações da água residual (5%, 10% e 20%), pH ajustado para 7, temperatura mantida em torno de 25°C com ciclo claro:escuro de 14:10h, intensidade luminosa de $100\text{-}120 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, e agitação feita com ar mistura a 2% de CO_2 .

4 METODOLOGIA

4.1 Coleta e caracterização do efluente a ser tratado

A coleta do efluente utilizado, o soro do leite, foi feita na indústria de laticínios Ducamp®. Localizada na Fazenda Santa Lúcia – Av. Cachoeira do Meirim, 997 – Benedito Bentes em Maceió/AL. Após a coleta o soro foi filtrado em papel de filtro qualitativo e em seguida centrifugado a 3500 rpm por 15 min, com o objetivo de separar as partículas sólidas grosseiras da parte líquida. O soro foi conservado a uma temperatura de -12°C a -18 °C no Laboratório de Bioprocessos (Labio) localizado na Universidade Federal de Alagoas (UFAL). Para sua caracterização foram realizadas análises como demanda química de oxigênio (DQO), nitrogênio total (NT), fósforo total (FT) e pH.

4.1.1 Análise da Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A análise da DQO foi realizada pelo método de digestão de dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$), que consiste na oxidação das substâncias orgânicas e inorgânicas pelo $K_2Cr_2O_7$.

Inicialmente os tubos que foram utilizados precisaram ser lavados com uma solução de ácido sulfúrico H_2SO_4 20% (v/v) para eliminar qualquer resquício de material ou substância que pudesse interferir na amostra. Em seguida foram inseridos nos tubos 2,5 mL da amostra que estavam devidamente filtrada, 1,5 mL da solução de digestão e 3,5 mL do reagente de ácido sulfúrico (sulfato de prata diluído em ácido sulfúrico) (AOAC, 2002). Em seguida os tubos foram agitados e colocados no bloco digestor a uma temperatura de 150°C por duas horas. Passado o período de digestão, as amostras foram novamente agitadas e resfriadas para a realização das leituras no espectrofotômetro (Shimadzu, UVmini 1240) a 600 nm. Todos os valores obtidos foram expressos em $mg\ O_2.L^{-1}$ de DQO.

4.1.1.1 Preparação da solução de digestão

A solução de digestão é composta por 125 mL de água destilada, 2,554 g de $K_2Cr_2O_7$, previamente seco em estufa a 103°C por duas horas, 41,75 mL de H_2SO_4 e

8,325 g de sulfato de mercúrio (II). Após a dissolução e resfriamento completa o restante do volume em um balão volumétrico de 250 mL com água destilada.

4.1.1.2 Preparação do reagente de ácido sulfúrico

Adiciona-se em 200 mL de H_2SO_4 concentrado 2,03 g de sulfato de prata (Ag_2SO_4) e aguarda cerca de 24 horas para dissolução completa.

4.1.1.3 Preparação da solução padrão de biftalato de potássio

Uma quantidade de 450 mg de biftalato de potássio, seco previamente a 120°C em estufa por duas horas, diluído em água destilada até o volume de 1000 mL em balão volumétrico. Quando guardada sob refrigeração, essa solução é estável por 3 meses. A relação teórica entre o biftalato de potássio e a DQO é de que 1 mg de biftalato de potássio corresponde a 1,171 mg O_2 . Sendo essa uma solução mãe contendo 500 mg.L⁻¹ de DQO.

4.1.1.4 Cálculo

$$DQO (mg.L^{-1}) = 3079,7 * Abs * Diluição \quad (1)$$

Onde:

Abs = Valor da Absorbância obtida em espectrofotômetro;

Diluição = Diluição da amostra.

4.1.2 Análise do Nitrogênio Total (NT)

A análise do Nitrogênio Total (NT) foi feita a partir de uma adaptação do Método de Kjeldahl para efluentes agroindustriais com alta concentração de nitrogênio total adaptado da AOAC, 2002. Esse método é constituído por 3 etapas: digestão da amostra, destilação e titulação. A primeira etapa consiste na digestão da matéria orgânica onde adicionou-se 5 mL da amostra coletada dos restos; 1g de mistura catalítica, composta por sulfato de sódio, sulfato de cobre e dióxido de selênio na proporção 100:1:0,8; e 10 mL de ácido sulfúrico PA em tubos de Kjeldahl e em seguida aquecidos em bloco digestor (TECNAL, modelo TE007 MP), com a temperatura sendo elevada lentamente até atingir cerca de 310°C. Sendo o processo de digestão

finalizado quando as amostras apresentavam coloração incolor ou levemente esverdeada.

Na segunda etapa realizou-se a destilação do nitrogênio. Onde nos tubos os quais a digestão foi realizada, após atingirem a temperatura ambiente, foram adicionadas um pouco de água destilada e 2 gotas de fenolftaleína 1% sendo em seguida acoplados no destilador de nitrogênio (TECNAL, modelo TE-0363), onde foi inserido NaOH 40% até atingir o pH alcalino (quando ocorre a mudança da coloração para rosa). Em seguida iniciou-se o processo de aquecimento da amostra, dando início à destilação. Foram coletados, em um erlenmeyer de 250 mL, o qual continha 25 mL de ácido bórico 4%, 2 gotas do indicador vermelho de metila 0,25% e 2 gotas do indicador verde de bromocresol 0,2%, até atingir 100mL. Por fim, a solução do erlenmeyer foi titulada com ácido clorídrico 0,01 N padronizado até o aparecimento da coloração rosada.

4.1.2.1 Cálculo

O nitrogênio total (NT) é determinado pela seguinte equação:

$$NT (mg.L^{-1}) = \frac{V_{HCL} * f_{HCL} * N_{HCL} * 14000}{V} \quad (2)$$

Onde:

V_{HCL} = Volume gasto na titulação com ácido clorídrico;

f_{HCL} = Fator de correção da solução de ácido clorídrico;

N_{HCL} = Normalidade ácido clorídrico;

V = Volume da amostra.

4.1.3 Análise do Fósforo Total (FT)

A análise do fósforo foi realizada pelo método do ácido ascórbico (AOAC, 2002). Para análise foram adicionados em tubos de ensaio, 1 mL de água destilada, 1 mL da amostra já filtrada, e 0,4 mL da solução desenvolvidora de cor, em seguida os tubos foram tampados. Após 30 minutos foram realizadas as leituras no espectrofotômetro a 760 nm (Shimadzu, UV-mini 1240).

4.1.3.1 Cálculo

$$FT (mg.L^{-1}) = 10,174 * Abs * Diluição \quad (3)$$

Onde:

Abs = Valor da Absorbância obtida em espectrofotômetro;

Diluição = Diluição da amostra

4.1.3.2 Solução diluidora de cor

A solução desenvolvedora de cor é formada pela fração das soluções dada a seguir e possui estabilidade de 4 horas. A = 0,5; B=0,05; C=0,15; D=0,3.

- Solução A: ácido sulfúrico 5 N;
- Solução B: tartarato misto de antimônio e potássio hemihidratado: 1,3715 g para 500 mL de água;
- Solução C: mobilidato de amônio: 20 g em 500 mL de água;
- Solução D: ácido ascórbico 0,01M, 0,44 g para 100 mL de água.

4.1.4 Determinação do pH

A determinação de pH foi feita diretamente na bancada onde estavam localizados os reatores para evitar interromper a aeração e agitação. Inicialmente o pHmetro foi calibrado utilizando as soluções tampões de pH 4 e pH 7, operando-o de acordo com as instruções do manual do fabricante (TECNAL). Em seguida o pH dos reatores foram aferidos e regulados quando necessários, deixando-os em torno de 7,5.

4.1.5 Peso seco celular (PS)

A determinação do peso seco celular é feita utilizando os separados na centrifugação. O material foi colocado em cápsulas alumínio, previamente taradas e secas em estufa por 1 hora a uma temperatura de 100 °C, e levadas para a estufa onde permaneceu por 2h a 60°C, ou até peso constante. Ao sair da estufa as

forminhas foram levadas ao dessecador onde permaneceram por 15 min para esfriar e em seguida foram pesadas.

4.1.5.1 Cálculo

$$PS (mg. L^{-1}) = \frac{N}{V} * 10^6 \quad (4)$$

Onde:

N= massa de resíduo seco em gramas (massa da cápsula com o extrato seco menos z tara da cápsula);

V= volume tomado da amostra em mL.

4.2 Coleta e caracterização do material que formou o leito fixo

Os materiais para a construção do leito foram coletados em uma obra residencial familiar. Entre os materiais obtidos, estavam restos de revestimento cerâmicos, tijolos, argila expandida e brita. Em seguida os materiais foram lavados para remover o excesso do pó, com água destilada, e secados para posterior utilização na construção do leito.

Com o objetivo de conhecer melhor a composição e características físicas e químicas desses materiais foram feitas algumas análises como microscopia eletrônica de varredura (MEV), Difratometria de Raios X (DRX) e Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).

4.2.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O microscópio eletrônico de varredura (MEV), segundo Dedavid *et al.* (2007) é um aparelho que permite a visualização e análise de microestruturas de objetos sólidos, por meio de um feixe de elétrons de pequeno diâmetro que exploram a superfície ponto a ponto, realizando uma varredura. Equipamentos mais modernos permitem uma ampliação de até 300.000 vezes ou mais.

Para caracterização morfológica, as microcápsulas foram metalizadas em um QUORUM Q150R ES com uma corrente de 45 mA por 200 s. As imagens de MEV das amostras metalizadas foram obtidas no Laboratório de Microscopia do Instituto Federal de Alagoas (Maceió, Brasil) usando um TESCAN VEGA3 (EUA). O microscópio de MEV foi operado a uma potência de 10 kV.

4.2.2 Análise por Difratometria de Raios X (DRX)

A análise de difração de raios-X (DRX), no difratômetro de raios-X BRUKER (XRD 6000, Shimadzu) ocorreu por meio da radiação de Cu-K α com voltagem de 40 kV e corrente de 30 mA. Os padrões de difração foram efetuados variando de 5 a 90°, com um passo de 0,02° e velocidade angular de 2 graus·min⁻¹. As fendas utilizadas de divergência e espalhamento foram de 1° e a de recepção de 0,30 mm. As análises foram realizadas no Laboratório de Caracterização e Microscopia de Materiais (LCMMat - UFAL).

4.2.3 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

As análises foram realizadas em um espectrômetro da marca Shimadzu PRESTIGE 21, com acessório de reflexão total atenuada (Attenuated total reflectance - ATR). Os espectros de absorção foram obtidos na região do infravermelho de (400 cm⁻¹ a 4000 cm⁻¹) com resolução de 4 cm⁻¹. As análises foram efetuadas no Laboratório de Caracterização e Microscopia de Materiais (LCMMat - UFAL).

4.3 Construção do leito fixo

Inicialmente, os materiais coletados foram fragmentados em pedaços menores (brita 12,25 mm x 15,00 mm; tijolo 18,92 mm x 25,25 mm; cerâmica 26,27 mm x 18,12 mm; argila 21,92 mm x 20,75 mm, valores médios), para que fossem distribuídos de forma mais uniforme e em maior quantidade no interior do leito.

Por não ser possível quantificar os materiais pelo peso devido as diferentes densidades, optou-se por trabalhar com volume equivalente aparente, utilizando aproximadamente 180 cm³ de cada material.

Um recipiente acrílico de formato quadrado, com dimensões 6 cm x 12 cm x 12 cm e perfurações na parte superior e inferior para permitir a passagem do efluente e do ar, foi utilizado para montar o leito. O recipiente foi preenchido com os resíduos e selado com cola de silicone atóxica para aquários, sendo deixado para secar por 24 horas antes do uso.

O resultado do leito pode ser observado na Figura 6 apresentada abaixo:

Figura 6 – Leito fixo de resíduos da construção civil

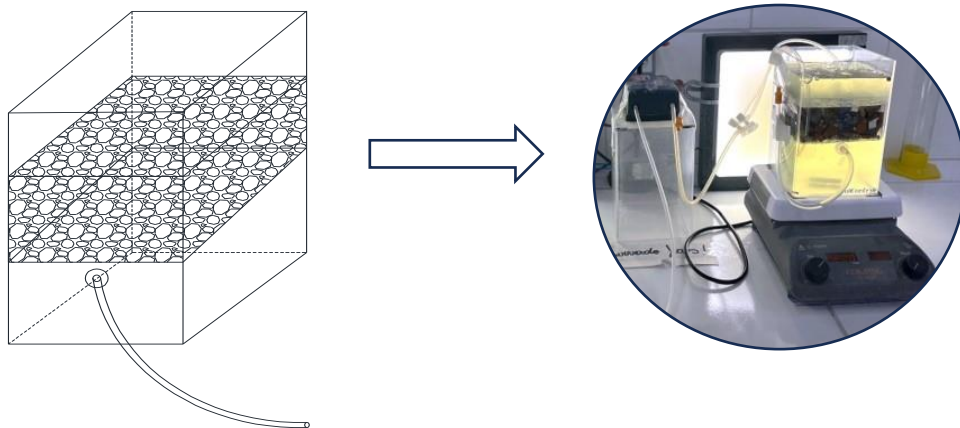


Fonte: Autora, 2023.

4.4 Montagem e funcionamento do reator

Após o período de 24 horas de secagem, o leito foi inserido no reator, que é composto por um recipiente acrílico transparente (*PoliControl®*) com dimensões de 18,7 cm x 12 cm x 12 cm, como esquematizado na Figura 7.

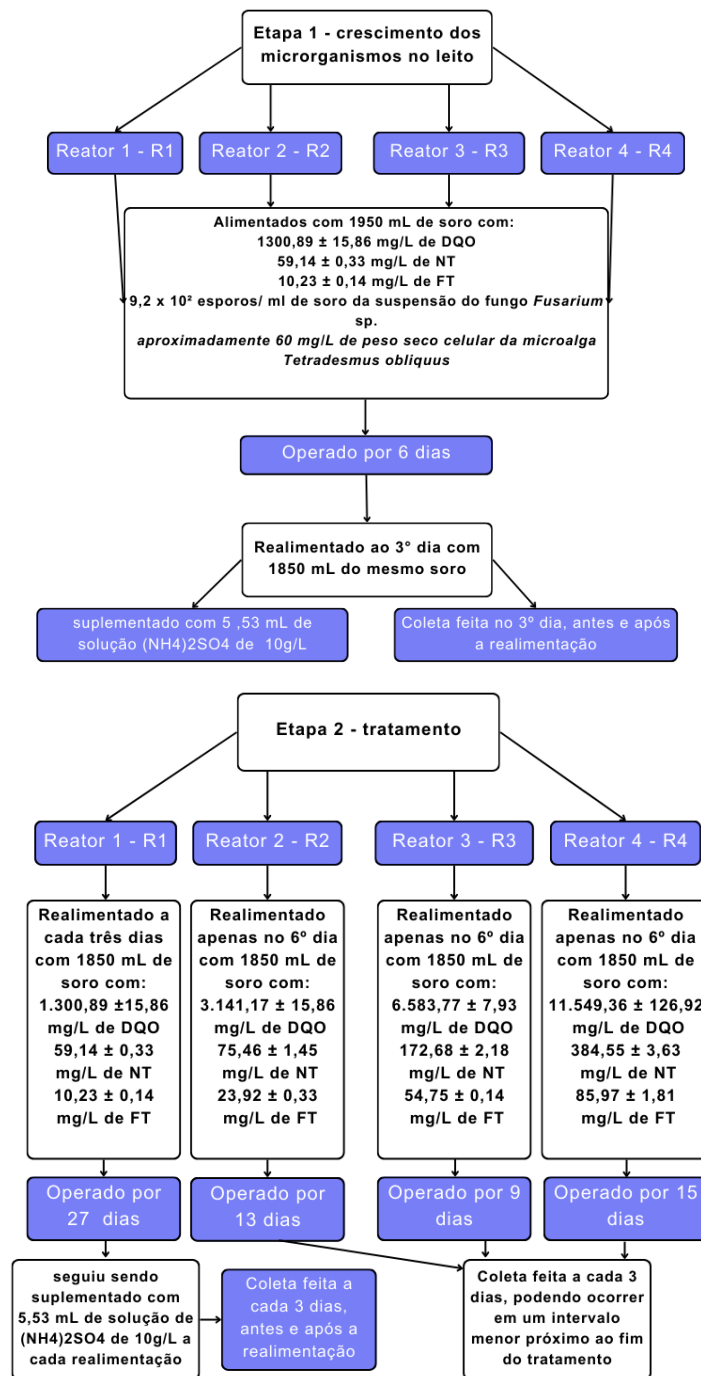
Figura 7 - Esquema do Reator



Fonte: Autora, 2024.

Foram montados 4 reatores com a finalidade de verificar inicialmente o funcionamento do biorreator com uma carga orgânica fixa, e após verificar estabilidade no tratamento, buscou-se operá-los em cargas orgânicas diferentes. O detalhamento de todas as etapas e funcionamento dos biorreatores está presente no fluxograma a seguir (Figura 8).

Figura 8 – Método de operação dos reatores



Fonte: Autora, 2025.

Algumas informações importantes sobre o funcionamento dos reatores devem ser destacadas:

- Os reatores foram inicialmente operados por seis dias com uma carga orgânica baixa visando o crescimento dos microrganismos e sua aderência ao material do leito;
- É importante destacar também que durante a realimentação, praticamente todo o efluente foi removido, exceto por cerca de 100 mL, devido à dificuldade em realizar a remoção completa;
- Durante o funcionamento dos reatores, eles foram mantidos à temperatura ambiente, sob aeração contínua fornecida por um compressor com fluxo de 2 L/min, e com agitação magnética constante (SP LABOR®). O pH foi controlado em torno de 7,5 e o sistema recebeu iluminação artificial contínua por meio de uma luminária (Paflon LED 25W 6500K) com intensidade de $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;
- Durante o período de tratamento nos reatores R2, R3 e R4 as coletas não seguiram um padrão pois o reator se manteve até atingir o nível estabelecido pela legislação Europeia, Comissão Europeia 91/271/EEC - 2014, para descarte (125 mg/L de DQO; 15 mg/L de NT e 2 mg/L de FT), por esse motivo os dias de coleta foram feitos em um espaço de tempo mais curto em alguns momentos e os reatores foram desmontados em períodos diferentes;
- As amostras coletadas foram congeladas à temperatura entre -12°C a -18°C para serem posteriormente analisadas pelos métodos mencionados na seção 4.1;
- Os reatores que não foram mais realimentados depois do sexto dia (R2, R3 e R4) tiveram seu volume reajustado a cada 3 dias com 200 mL de água destilada.

4.5 Análise da eficiência do sistema de tratamento

Nessa seção, as amostras coletadas durante o experimento, que foram analisadas pelos métodos descritos na seção 4.1 para a obtenção de dados referentes às concentrações de DQO, NT, FT, pH e peso seco celular dos quatro reatores, serão analisados quanto a eficiência de remoção dos contaminantes, os dias de maiores taxas de remoção, e as concentrações residuais de DQO, NT e FT.

Os resultados obtidos serão comparados principalmente a dois trabalhos realizados na mesma área, pelo mesmo grupo de pesquisa, com a mesma microalga, tratamento efluente de laticínio por consócio microalga-fungo em sistema suspenso, para que seja confirmada ou não a eficiência do sistema imobilizado (reator aerado de leito fixo).

O primeiro trabalho de Medeiros et al. (2025) os autores utilizaram a *Tetrademus obliquus* em consócio com os fungos *Penicillium oxalicum* e *Cunninghamella echinulata* para o tratamento do soro do leite em biorreatores de coluna de bolhas (500 mL) com diferentes concentrações de DQO (223–1663 mg.L⁻¹), NT (13–61 mg.L⁻¹) e FT (3-26 mg.L⁻¹); contendo 400 mL de volume útil, com aeração forçada utilizando um compressor (JEBO 660; 2 L/min) conectado a cada reator e utilizando 1,5 vvm de ar atmosférico; iluminação artificial constante (Plafon LED 25W 6500 K, 100 μmol fótons. $\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$); pH mantido entre 7-7,5; batelada de 14 dias com coletas a cada 48h.

O segundo trabalho utilizado na comparação será o de Santos et al. (2024) onde os autores utilizaram o consócio entre a microalga *Tetrademus obliquus* e o fungo filamentoso *Cunninghamella echinulata* para o tratamento do soro do leite com diferentes concentrações de DQO (550-2200 mg.L⁻¹), NT (14-56 mg.L⁻¹) e FT (4,5-18 mg.L⁻¹); Os experimentos foram realizados em reatores transparentes de acrílico (PoliControl®) com dimensões de 18,7 × 12 cm × 12 cm, em sistema aberto com razão de substituição volumétrica (VRR) de 40 e 60%; com iluminação artificial constante (Plafon LED 25W 6500 K, 100 μmol fótons. $\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$); com volume efetivo em cada reator de 1,7 L; agitação magnética (LABOR®, Prudente, Brasil); temperatura entre 30°C a 35°C; pH mantido entre 7-7,5; aeração forçada utilizando um compressor (JEBO 660; 2 L.min⁻¹); Batelada de 7 dias para o crescimento dos microrganismos e semicontínuo (3 ciclos com o tempo de reposição volumétrica de 3 dias) com razão de substituição volumétrica de 40% e 60% (v/v).

Para verificar se os níveis de cargas resíduas estavam adequados para descarte, tanto este trabalho como os dois utilizados na comparação, utilizaram como referência a Legislação Européia (Comissão Europeia 91/271/EEC, 2014) que prevê como valores adequados para descarte: DQO de até 125 mg.L⁻¹, NT de até 15 mg.L⁻¹ e FT de até 2 mg.L⁻¹.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

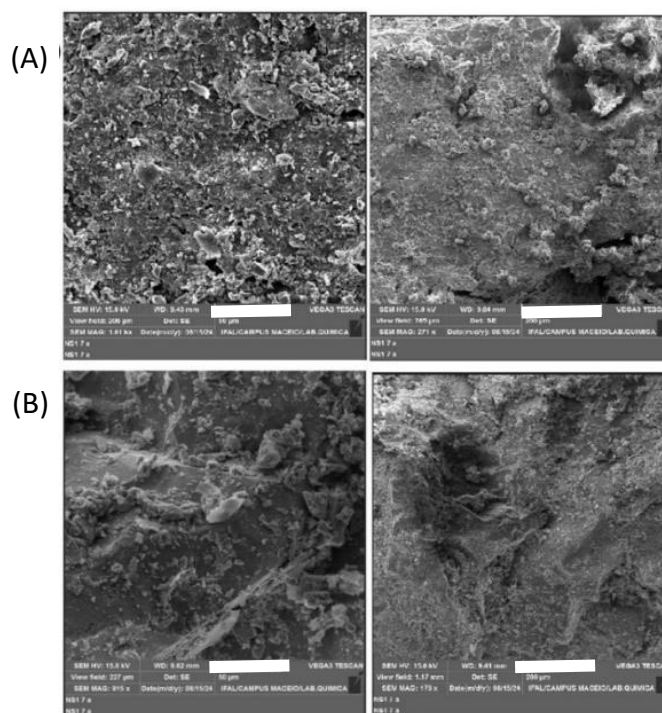
5.1 Caracterização do material utilizado no leito

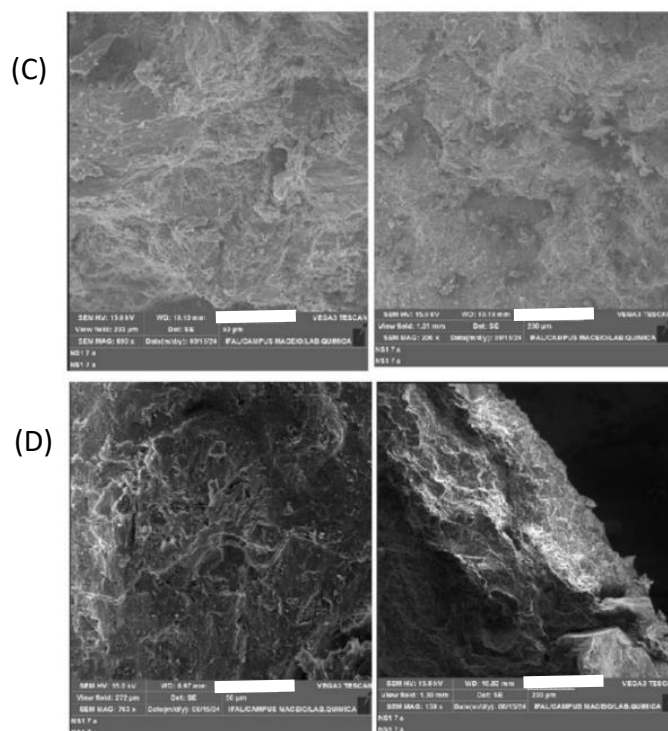
Para compreender melhor o comportamento do leito em relação a adesão dos microrganismos e sua interação com eles, foram feitas algumas análises dos materiais como a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier e Difratometria (FTIR) de Raios X (DRX).

5.1.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Com o intuito de conhecer de forma mais detalhada a superfície dos materiais usados na composição do leito fixo, foram feitos MEV de cada um dos materiais. As imagens da Figura 9 mostram os resultados obtidos para a ampliação de $50\mu m$ (imagem do lado esquerdo) e $200\mu m$ (imagem do lado direito) (representados pelo traço branco na parte inferior) para a argila (A), brita (B), cerâmica (C) e tijolo (D).

Figura 9 – MEV dos materiais componentes do leito. argila (A), brita (B), cerâmica (C) e tijolo (D) argila (A), brita (B), cerâmica (C) e tijolo (D).





Fonte: Autora, 2025.

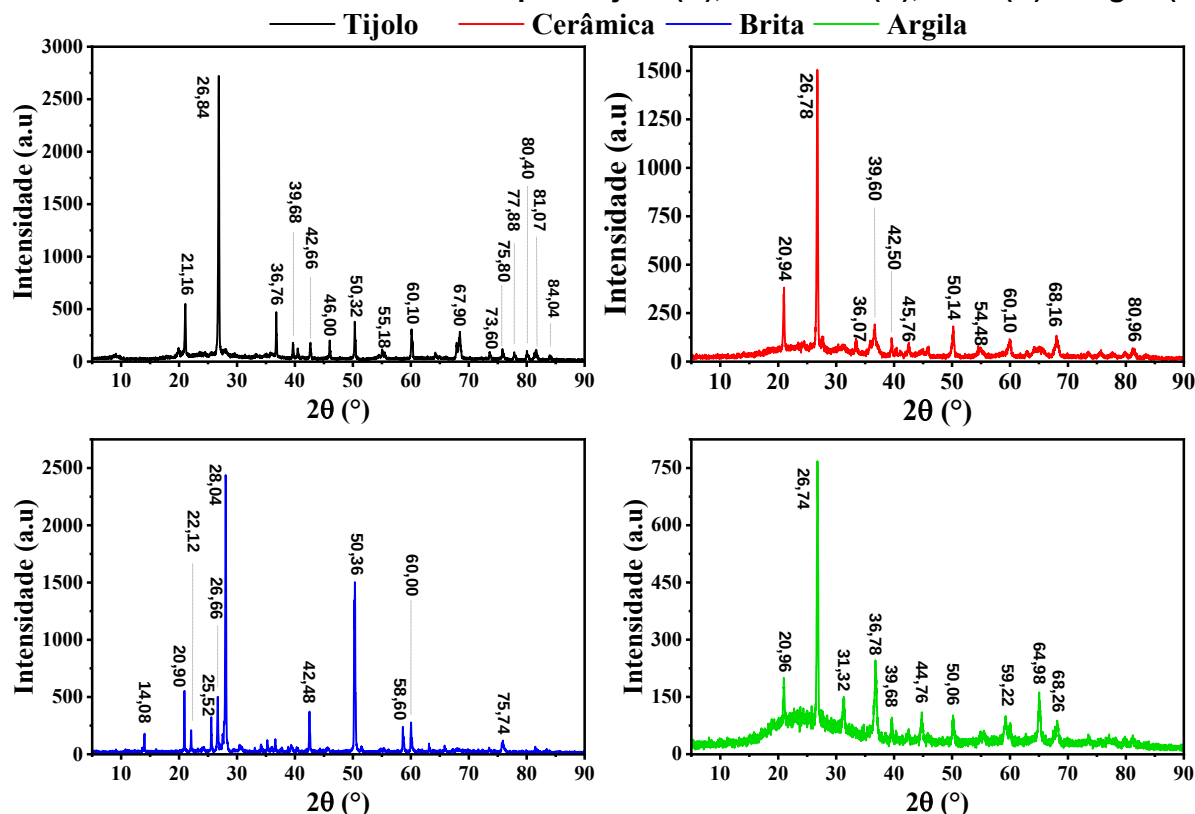
Ao analisarmos as imagens dos materiais é possível identificar que elas apresentam superfícies com variações de texturas, que vão desde áreas mais homogêneas até regiões com irregularidades acentuadas. Nota-se regiões de estrutura porosa e rugosa, indicando a possível presença de microfissuras. Já as regiões mais lisas podem indicar zonas com menor porosidade ou compactadas (Sena et al., 2019). A presença de rugosidade e/ou porosidade é favorável para a utilização destes materiais como suportes, uma vez que a irregularidade na superfície garante maior aderência dos microrganismos, como foi mencionado por Abou-Elela et al. (2019).

5.1.2 Análise por Difractometria de Raios X (DRX)

Os materiais detectados na Difractometria de Raios X (Gráfico 3) dos resíduos foram: Quartzo SiO_2 (Q), Calcita CO_3Ca (C), Gipsita $Ca(SO_4)(H_2O)_2$ (G), Caulinita $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ (Ca) e Microclína $KAlSi_3O_8$ (M) e Muscovita $KAl_3Si_3O_{10}OH_2$ (Mu). É possível observar ainda que por volta de 40° aparece um pico identificado como o mineral flogopita, um filossilicato do grupo da mica e que apresenta potássio, magnésio e alumínio na fórmula. É importante destacar também que a análise da composição mineralógica dos Resíduos Sólidos da Construção Civil é algo que pode

se tornar complexo pelo fato da grande variedade das fases cristalinas dos seus componentes e que os resultados obtidos pelo equipamento são aproximação da composição real desses materiais (BRITO et al., 2023; VENEZIAM, 2023).

Gráfico 3 – Difratometria de Raios X para Tijolo (A), Cerâmica (B), Brita (C) e Argila (D)



Fonte: Autora, 2025.

5.1.3 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A grande vantagem dos espectros de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) é a alta sensibilidade que permite a determinação de muitos componentes, mesmo em quantidades muito pequenas. Os espectros de FT-IR observados no Gráfico 4 mostram a presença de vibrações fracas e fortes na região de $4000\text{--}500\text{ cm}^{-1}$ para as amostras de tijolo, cerâmica, brita e argila, indicando a presença de grupos funcionais diversos. Todos os materiais mostram banda de absorção em torno de $2810\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$, caracterizando a presença de ligações C-H, alcanos, alcenos e aldeído. O mesmo é observado para as bandas na faixa de $1400\text{--}1560\text{ cm}^{-1}$ e $760\text{--}780\text{ cm}^{-1}$, indicando a presença de ligações N-H, NH_2 e N=O, e dos grupos aminas, amidas e nitro, como observado na Tabela 2. Segundo Manoharan et al. (2012) a presença dos grupos NH_2 e aminas ocorre devido a água absorvida

pelo material. Ainda segundo o autor, o aparecimento de bandas duplas de média intensidade em 600 a 700 cm^{-1} em material argiloso é considerado uma indicação da presença de quartzo.

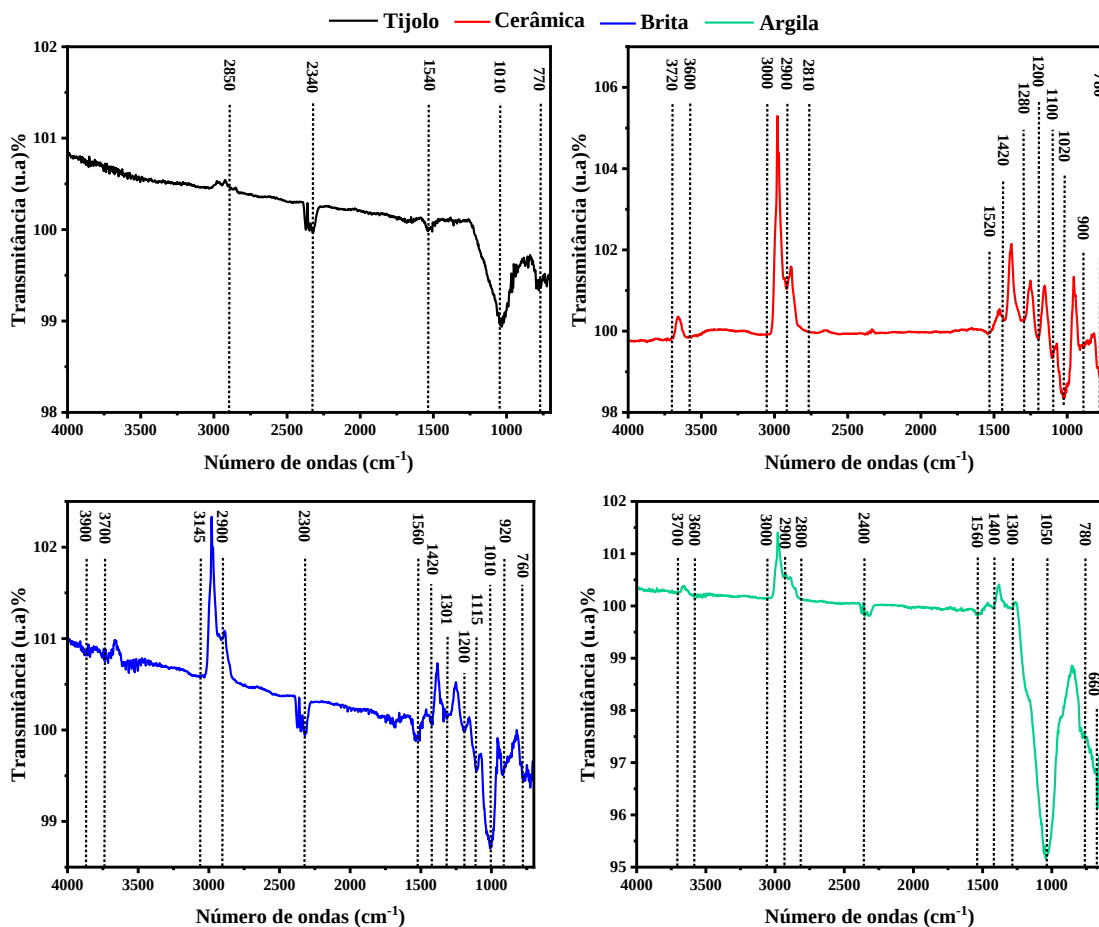
A confirmação da ocorrência de absorção de água pelos materiais confirma o que foi evidenciado no MEV, que todos os materiais são porosos, justificando a importância na escolha desses materiais, uma vez que essas porosidades favorecem a aderência dos microrganismos nos materiais.

Tabela 2 – Grupos funcionais presentes no Tijolo, Cerâmica, Brita e Argila

Número de ondas (cm^{-1})				Grupos Funcionais
Tijolo	Cerâmica	Brita	Argila	
-	3600 e 3720	3700 e 3900	3700	OH+ de caulinita e illita
2850	2810, 2900 e 3000	2900 e 3145	3000	C-H; alcanos, alcenos, aldeídos
2340	-	2300	-	O-H; ácidos carboxílicos com ligações de hidrogênio
1540	1420 e 1520	1420 e 1560	1400 e 1560	N-H; aminas e amidas primárias e secundárias (dobramento) ou N=O nitro
-	-	1301	1300	C-O álcoois, éteres, ácidos carboxílicos e ésteres
-	1280	-	-	C-N; amidas e aminas
1010	1200, 1100, 1020 e 900	1200, 1115, 1010 e 920	-	C-O-C; C-O; polissacarídeos, fosfodiésteres, C-O-P
-	-	-	1050	Si-O; minerais argilosos, impurezas de silicato e argilas minerais possivelmente em complexo com húmicos ácidos
770	780	760	780	NH ₂ ; grupo amina primária
-	-	-	660	S-O; sulfatos inorgânicos

Fonte: Autor 2025; Keshmiri-Naqab et al., 2024; Lopes e Fascio, 2004.

Gráfico 4 – Espectro de infravermelho por transformada de Fourier para amostras de Tijolo, Cerâmica, Brita e Argila



Fonte: Autora, 2025.

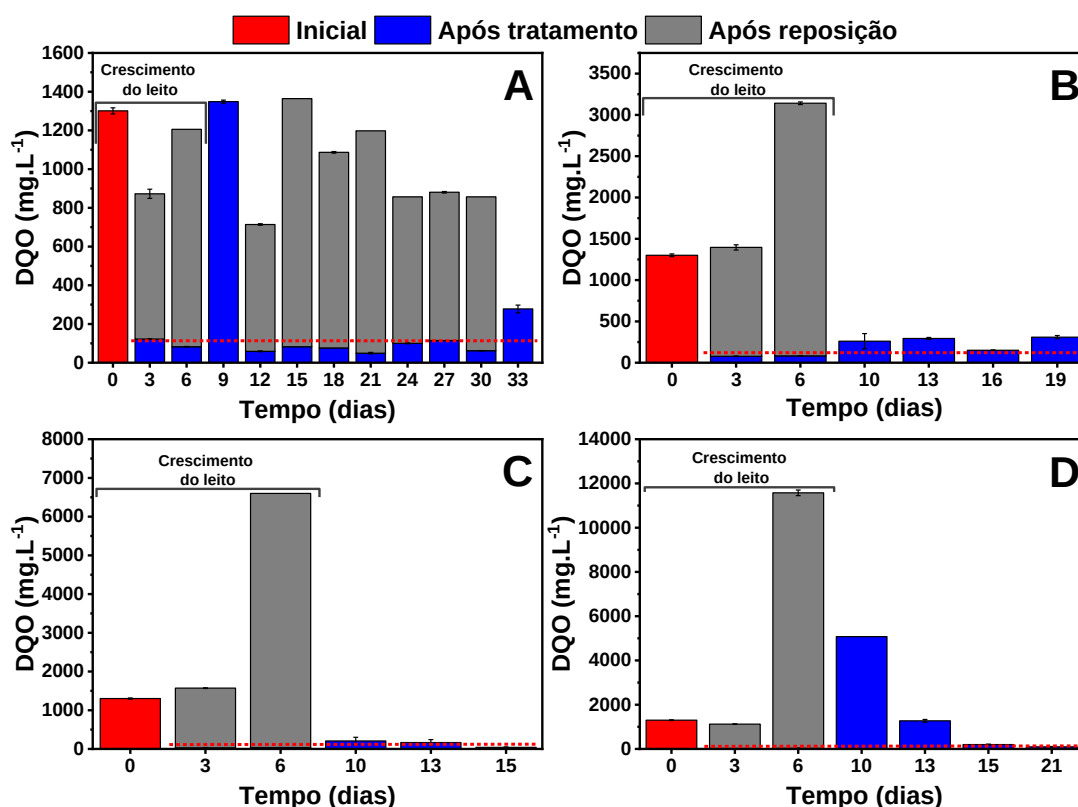
5.2 Caracterização do soro do leite

O soro do leite é considerado um efluente com alta carga poluidora devido a sua carga orgânica. Em sua caracterização foram obtidos valores de concentrações para a DQO de $61.395,6 \pm 237,97 \text{ mg.L}^{-1}$, para o NT de $1.574,16 \pm 10,88 \text{ mg.L}^{-1}$, para o FT de $573 \pm 4,50 \text{ mg.L}^{-1}$. Esses valores elevados se enquadram nos valores encontrados na literatura, como menciona Santos et al. (2024), em seu artigo, valores para o soro do leite compreendidos entre $40.000 - 100.000 \text{ mg.L}^{-1}$ para a DQO, $800 - 2.500 \text{ mg.L}^{-1}$ de NT e $300 - 600 \text{ mg.L}^{-1}$ de FT, correspondendo a um potencial poluidor 100 vezes superior ao de águas residuais domésticas. Para operação dos reatores nesse trabalho, visando um tratamento terciário, considerou-se o seguinte intervalo: DQO $1000-10.000 \text{ mg.L}^{-1}$, NT na faixa entre $60-400 \text{ mg.L}^{-1}$ e FT entre $10-90 \text{ mg.L}^{-1}$, como explicado por Medeiros et al. (2025).

5.3 Demanda química de oxigênio (DQO)

O Gráfico 5 mostra as variações da Demanda Química de Oxigênio (DQO) ao longo do tempo em dias dos 4 reatores. As amostras eram coletadas a cada 3 dias, sendo uma coleta antes e após a realimentação. Os valores da DQO apresentam oscilações com picos e quedas ao longo do período analisado. Essas oscilações consistem na redução da DQO devido ao tratamento e reposição desses níveis após a realimentação.

Gráfico 5 – Demanda Química de Oxigênio DQO para os reatores R1 (A), R2 (B), R3 (C) e R4 (D).



Nos reatores R2 (Gráfico 5B), R3 (Gráfico 5C) e R4 (Gráfico 5D) é possível observar valores inferiores nas concentrações de DQO ($1.300,89 \pm 15,86$ mg/L) no período que corresponde a etapa de crescimento e aderência dos microrganismos ao leite, que vai até o sexto dia de operação. No sexto dia são inseridos efluentes com concentrações maiores como $3.141,17 \pm 15,86$ mg.L⁻¹, $6.583,77 \pm 7,93$ mg.L⁻¹ e $11.549,16 \pm 126,92$ mg.L⁻¹, para R2, R3 e R4, respectivamente. Chegando a concentrações de DQO residuais de $309,36 \pm 19,83$ mg.L⁻¹ para R2 após 14 dias; $40,45 \pm 11,50$ mg.L⁻¹ após 9 dias para o R3 e $95,19 \pm 15,86$ mg.L⁻¹ em 15 dias para o

R4. O reator R1 (Gráfico 5A) foi capaz de tratar uma DQO inicial com concentração de $1348,48 \pm 7,93 \text{ mg.L}^{-1}$ e atingir a carga residual de $58,70 \pm 2,38 \text{ mg.L}^{-1}$ em apenas 3 dias de tratamento.

O R1, R2 e R3 apresentaram sua maior taxa de remoção no sexto dia de operação, atingindo 98,77%; 91,71% e 96,87% respectivamente. Enquanto o R4 atingiu sua maior taxa de remoção no décimo dia correspondente a 75% de remoção.

As concentrações de DQO apresentam valores dentro do esperado e com eficiência superior se comparado com tratamentos em que os microrganismos são utilizados em suspensão no meio. Isso pode ser observado no trabalho de Medeiros et al. (2025) onde concentrações de DQO de $1.940,21 \pm 15,40 \text{ mg.L}^{-1}$ foram tratadas por 14 dias até atingir o valor de $441,04 \pm 3,74 \text{ mg.L}^{-1}$, e não foi possível atingir o valor de concentração exigido por norma para descarte. Enquanto o R4 conseguiu tratar uma carga praticamente seis vezes superior no mesmo intervalo de tempo.

O mesmo pode ser observado no trabalho de Santos et al. (2024) onde os autores utilizaram o mesmo biorreator deste trabalho, sob as mesmas condições, porém utilizando o consórcio microalga-fungo (*Tetrademus obliquus* e *Cunninghamella echinulata*), com um período de 7 dias (em batelada) para o crescimento dos microrganismos e um tempo de substituição volumétrica de 3 dias, durante três ciclos (em semintínuo). Operando a temperatura entre 30°C e 35°C, agitação magnética e iluminação artificial com intensidade de $100 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, pH entre 7-7,5 e com aeração de 2 L.min^{-1} . Seu reator possuía uma concentração inicial de $2288,87 \pm 2,56 \text{ mg.L}^{-1}$, similar ao desse trabalho, atingindo o valor de carga residual após a batelada de 7 dias: para o reator que seria realimentado com um VRR (razão de substituição volumétrica) de 40%, $320,39 \pm 2,56 \text{ mg.L}^{-1}$; para o VRR de 60%, $335,77 \pm 12,56 \text{ mg.L}^{-1}$. Depois dos três ciclos com realimentação a cada 3 dias as cargas residuais finais foram de: $115,07 \pm 3,49 \text{ mg.L}^{-1}$ (para o VRR de 40%); $225,33 \pm 13,04 \text{ mg.L}^{-1}$ de DQO (para o VRR de 60%).

Um comparativo entre o trabalho de Santos et al. (2024) é possível constatar que durante o período de crescimento do leito onde não foi feita realimentação durante 7 dias (batelada) o reator, apesar de possuir uma carga orgânica maior, não conseguiu atingir o valor exigido pela legislação para descarte, correspondente a 125 mg.L^{-1} de DQO, enquanto reator de leito fixo R3 com uma carga praticamente 3 vezes superior ($6.583,77 \pm 7,93 \text{ mg.L}^{-1}$) chegou-se quase ao mesmo valor de carga residual em apenas 3 dias de batelada e atingiu o valor exigido pela norma em 9 dias.

Com isso é possível comprovar que o tratamento de efluentes utilizando o consórcio microalga-fungo em um reator de leito fixo possui uma potência de tratamento mais eficiente em relação aos reatores em que estes microrganismos são encontrados em suspensão. Apresentando níveis de tratamento superiores em menos tempo de operação.

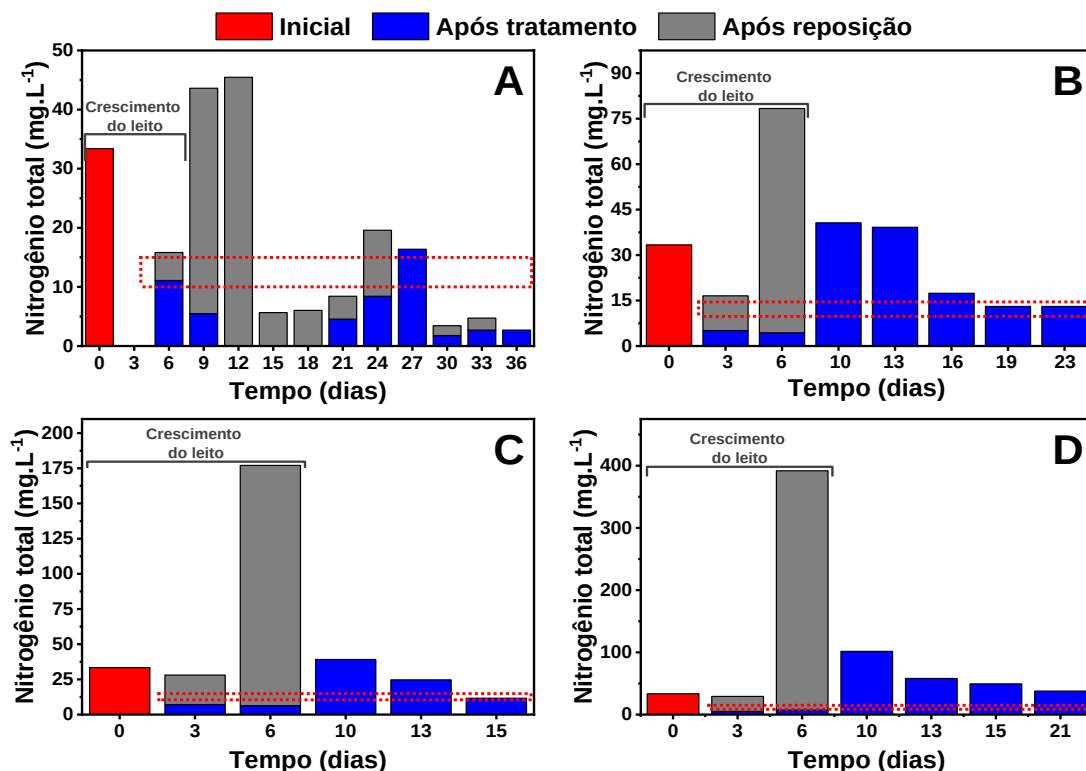
É importante destacar que o R2 apresentou problemas operacionais ao longo de seu funcionamento que provavelmente influenciaram em seus resultados; pois é notável que seu comportamento deveria ter sido similar aos dos outros reatores, o que não ocorreu. Recomenda-se refazer o funcionamento desse reator.

5.4 Nitrogênio total (NT)

Os valores referentes as concentrações de NT em relação ao tempo, em dias, podem ser observados no Gráfico 6. Os valores correspondentes ao R1 (Gráfico 6A) apresentaram um comportamento fora do esperado, com valores após a reposição abaixo do valor inicial inserido no reator, apesar dos valores residuais estarem dentro do limite máximo para descarte, mostrando a eficiência do reator em remover nitrogênio. Esse comportamento necessita de maior investigação para ser esclarecido. Por outro lado, os reatores R2 (Gráfico 6B), R3 (Gráfico 6C) e R4 (Gráfico 6D) apresentaram um comportamento mais uniforme. Os seis primeiros dias, correspondentes a etapa de crescimento do leito, apresentaram valores residuais dentro dos exigidos pela legislação Europeia (máximo de 15 mg.L^{-1}) partindo de uma concentração inicial de $59,14 \pm 0,51 \text{ mg.L}^{-1}$ para $4,40 \pm 0,02 \text{ mg.L}^{-1}$; $6,36 \pm 0,04 \text{ mg.L}^{-1}$; $6,75 \pm 0,23 \text{ mg.L}^{-1}$ para o R2, R3 e R4 respectivamente.

No sexto dia, os três reatores foram realimentados com cargas orgânicas mais elevadas para iniciar a etapa de tratamento, onde foram inseridas concentrações de $72,56 \pm 2,0 \text{ mg.L}^{-1}$; $174,13 \pm 1,45 \text{ mg.L}^{-1}$ e $384,55 \pm 3,63 \text{ mg.L}^{-1}$ para R2, R3 e R4 respectivamente. O R2 (Gráfico 4B) apresentou uma concentração residual de $12,33 \pm 0,36 \text{ mg.L}^{-1}$ (em 13 dias de tratamento); enquanto o R3 (Gráfico 4C) de $10,74 \pm 0,44 \text{ mg.L}^{-1}$ (em 9 dias de tratamento) e o R4 (Gráfico 4D) forneceu $33,38 \pm 2,18 \text{ mg.L}^{-1}$ (em 21 dias de tratamento). Dessa forma apenas os reatores R2, R3 atingiram concentrações inferiores a 15 mg.L^{-1} exigidos pela norma.

Gráfico 6 – Concentrações do Nitrogênio Total ao longo dos dias para os reatores R1(A), R2(B), R3(C) e R4(D)



Fonte: Autora, 2025.

Em forma comparativa, Medeiros et al. (2025) em seu trabalho obteve valores de $4,83 \pm 0,03 \text{ mg.L}^{-1}$ (carga inicial de $12,73 \pm 0,07 \text{ mg.L}^{-1}$), $8,89 \pm 0,03 \text{ mg.L}^{-1}$ (carga inicial de $23,72 \pm 0,10 \text{ mg.L}^{-1}$), $9,73 \pm 0,03 \text{ mg.L}^{-1}$ (carga inicial de $28,69 \pm 0,35 \text{ mg.L}^{-1}$), $13,92 \pm 0,10 \text{ mg.L}^{-1}$ (carga inicial de $60,88 \pm 0,35 \text{ mg.L}^{-1}$). Se compararmos os resultados obtidos por Medeiros é possível constatar que o reator de leito fixo apresenta mais uma vez um resultado eficiente em relação ao reator em que os microrganismos se encontram em suspensão. Pois em seu trabalho com concentração de nitrogênio total inicial de $60,88 \text{ mg.L}^{-1}$ que obteve uma concentração residual após 14 dias de tratamento de $13,92 \text{ mg.L}^{-1}$. No reator de leito fixo desse trabalho, utilizando uma concentração de NT inicial de $59,14 \text{ mg.L}^{-1}$ chegou-se a ao resíduo de $6,75 \pm 0,23 \text{ mg.L}^{-1}$ em apenas 3 dias de tratamento.

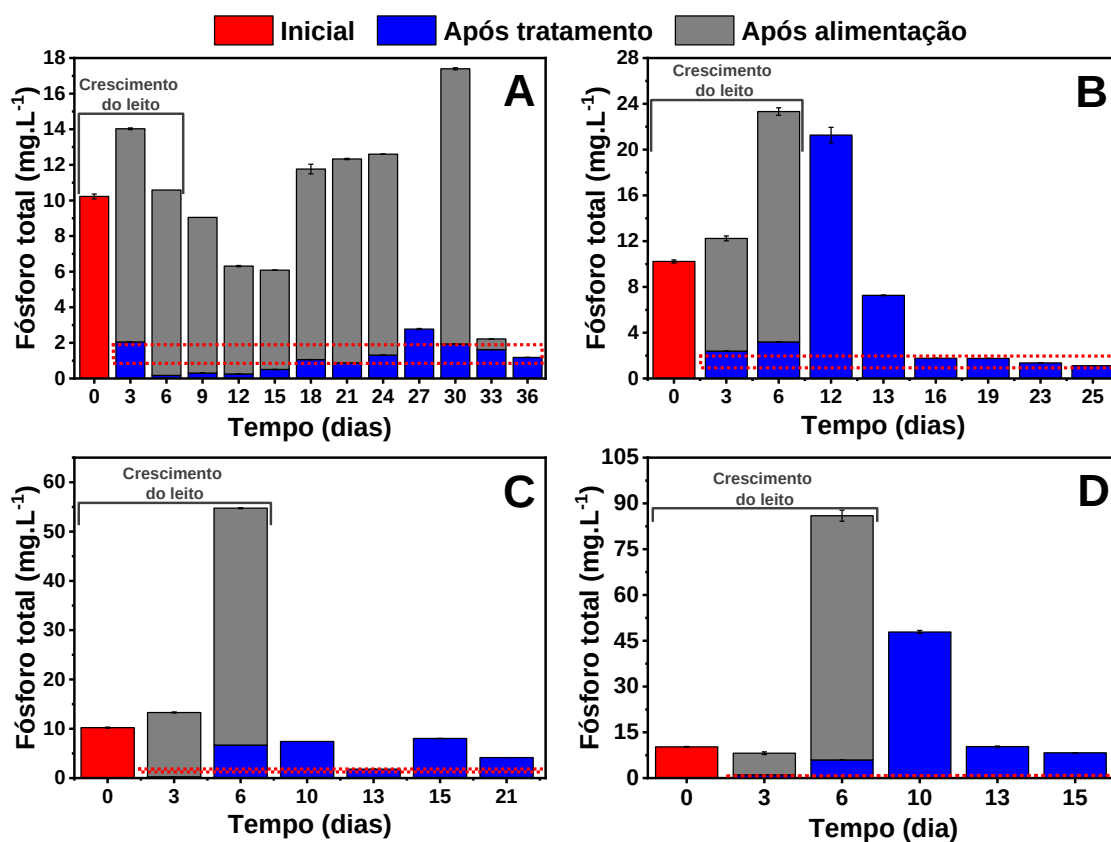
Adicionalmente, Santos et al. (2024) trabalharam com uma concentração de NT de $56,10 \pm 2,37 \text{ mg.L}^{-1}$. Esse reator atingiu a carga residual após a batelada de 7 dias: para o reator que seria realimentado com um VRR (razão de substituição volumétrica) de 40%, $8,84 \pm 1,36 \text{ mg.L}^{-1}$; para o VRR de 60%, $10,1 \pm 0,58 \text{ mg.L}^{-1}$. E os valores de cargas residuais de NT obtidos após os três ciclos com realimentação (em semintínuo)

a cada 3 dias, foram de: $6.50 \pm 0.53 \text{ mg.L}^{-1}$ (para o VRR de 40%) e $9.49 \pm 0.25 \text{ mg.L}^{-1}$ (para o VRR de 60%). Ao comparar os dados do reator de Santos et al. (2024) com os dados do reator R1, a carga residual do R1 foi inferior e tratada em um intervalo de tempo menor (3 dias). Com isso, podemos concluir que a eficiência do reator de leito fixo é superior ao de cultivo em suspensão para a remoção de nitrogênio do efluente.

5.5 Fósforo total (FT)

O Gráfico 7 contém os dados referentes as concentrações de fósforo total nos 4 reatores para as diferentes cargas de soro analisadas neste trabalho. É possível verificar que os gráficos assim como os de DQO também apresentam oscilações nos valores que são justificáveis pela presença dos pontos de realimentação e tratamento.

Gráfico 7– Concentração Fósforo total ao longo dos dias para os reatores R1(A), R2(B), R3(C), R4(D).



Fonte: Autora, 2025.

O Gráfico 7A, correspondente ao R1 apresentou ao longo de seus 36 dias uma variação de fósforo total de $14,03 \pm 0,03$ para $0,17 \text{ mg.L}^{-1}$, no sexto dia de operação.

O reator apresentou boas taxas de remoção, atingindo os valores mínimos exigidos pela legislação europeia, correspondente a 2 mg.L^{-1} .

Adicionalmente, o R2 (Gráfico 7B), R3 (Gráfico 7C) e R4 (Gráfico 7D) apresentam concentrações iniciais semelhantes com valores próximos a 10 mg.L^{-1} correspondentes ao período de crescimento do leite, atingindo os níveis esperados. Após o sexto dia as cargas desses reatores são aumentadas atingindo valores como $21,27 \pm 0,68 \text{ mg.L}^{-1}$, $54,75 \pm 0,14 \text{ mg.L}^{-1}$ e $85,97 \pm 1,81 \text{ mg.L}^{-1}$ para os reatores R2, R3 e R4, respectivamente.

Para o R2, atingiu-se a concentração residual de fósforo de $1,12 \pm 0,01 \text{ mg.L}^{-1}$. Para os reatores R3 e R4 alcançou-se $4,16 \pm 0,02$ e $8,28 \pm 0,02 \text{ mg.L}^{-1}$, respectivamente. Em seu trabalho, Medeiros et al. (2025) obtiveram após os 14 dias de funcionamento dos seus reatores os seguintes resultados: $0,33 \pm 0,01 \text{ mg.L}^{-1}$ para a carga inicial de concentração $3,64 \pm 0,10 \text{ mg.L}^{-1}$, $0,50 \pm 0,01 \text{ mg.L}^{-1}$ para $7,62 \pm 0,04 \text{ mg.L}^{-1}$, $1,05 \pm 0,01 \text{ mg.L}^{-1}$ para $11,82 \pm 0,10 \text{ mg.L}^{-1}$ e $2,21 \pm 0,01 \text{ mg.L}^{-1}$ para $26,54 \pm 0,48 \text{ mg.L}^{-1}$.

Dessa forma, o reator de leite fixo também se sobressaiu na remoção de fósforo do efluente em relação ao reator de coluna de bolhas, pois comparando os tratamentos de concentrações iniciais de fósforo semelhantes, ele apresenta melhores resultados de remoção em menor tempo de tratamento. Por exemplo, o reator de carga inicial de $11,82 \pm 0,10 \text{ mg.L}^{-1}$ e residual de $1,05 \pm 0,01 \text{ mg.L}^{-1}$ possui uma carga inicial semelhante ao do R1 deste trabalho, contudo o reator de leite fixo obteve uma carga residual menor em um período inferior ($0,17,05 \pm 0,01 \text{ mg.L}^{-1}$ em 3 dias).

De forma similar, Santos et al. (2024) trabalhando com o consórcio de microalga-fungo para tratar uma carga inicial com concentração de $17,92 \pm 0,01 \text{ mg.L}^{-1}$, atingiu-se o valor residual, após a batelada de 7 dias, de $2,76 \pm 0,05 \text{ mg.L}^{-1}$, para o reator que seria realimentado com um VRR (razão de substituição volumétrica) de 40% e de $2,80 \pm 0,01 \text{ mg.L}^{-1}$ para o com VRR de 60%. Os valores de cargas residuais obtidos após os três ciclos com realimentação (em semicontínuo) a cada 3 dias foram de: $1,98 \pm 0,20 \text{ mg.L}^{-1}$ (para o VRR de 40%) e $3,38 \pm 0,25 \text{ mg.L}^{-1}$ (para o VRR de 60%).

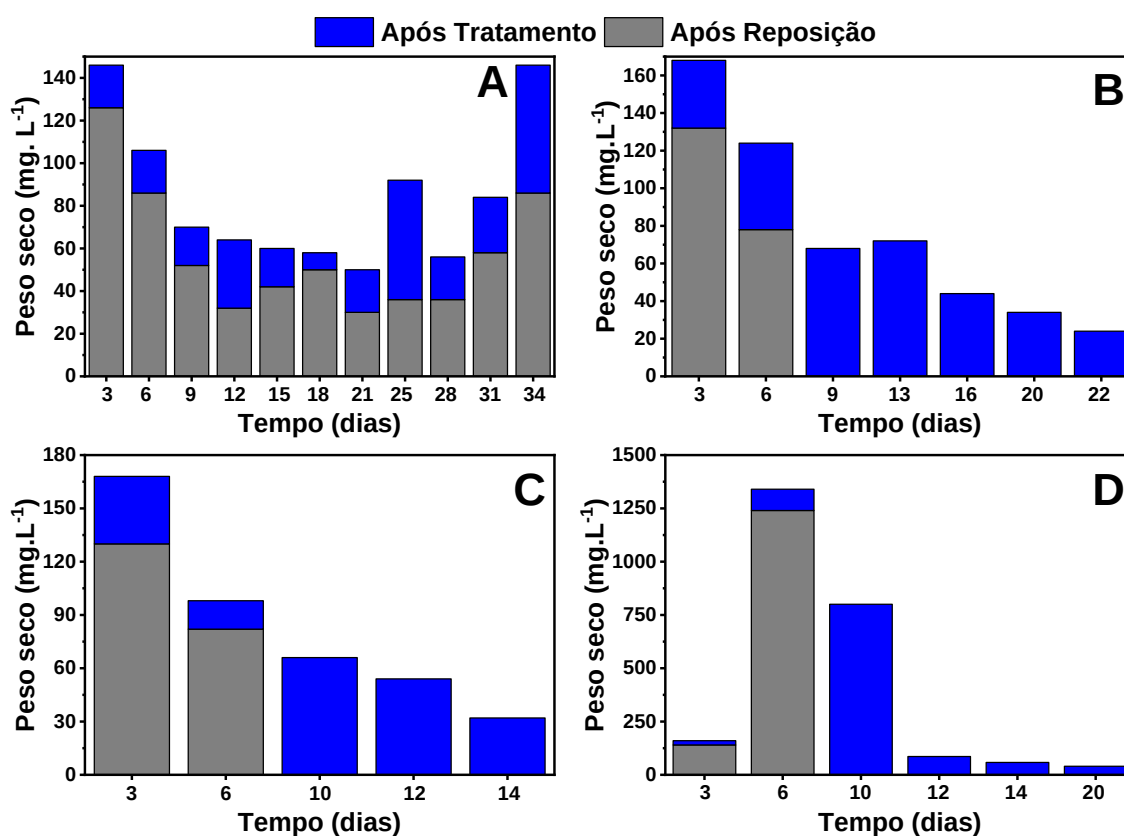
Da mesma forma, o reator de leite fixo se destacou, pois para o R2 que possuía concentração inicial de FT de $21,27 \pm 0,68 \text{ mg.L}^{-1}$ e obteve carga residual de $1,12 \pm 0,01 \text{ mg.L}^{-1}$, foi mais eficiente que os resultados obtidos por Santos et al. (2024) que

tratou o efluente com um FT de $17,92 \pm 0,01 \text{ mg.L}^{-1}$ para $2,76 \pm 0,05 \text{ mg.L}^{-1}$ e $2,80 \pm 0,01 \text{ mg.L}^{-1}$.

5.6 Peso seco celular

O peso seco dos reatores pode ser visualizado no Gráfico 8, onde temos a concentração da biomassa em mg.L^{-1} em relação aos dias de operação dos quatro reatores. É importante mencionar que essa é a biomassa que é despreendida do leito ou que cresceu nos espaços com apenas o líquido em suspensão.

Gráfico 8 – Peso seco celular ao longo dos ciclos para os reatores R1(A), R2(B), R3(C), R4(D).



Fonte: Autora, 2025.

No R1 (Gráfico 8A) é possível verificar que durante a etapa inicial, correspondente ao crescimento do leito, ocorre uma queda da quantidade de biomassa encontrada na fração líquida nos primeiros vinte e um dias. Isso é justificado pela aderência gradativa dos microrganismos ao material utilizado como suporte. À

medida que os dias se passam a tendência é que existam cada vez menos microrganismos em suspensão.

Contudo, a partir do 24º dia é evidenciado sucessivos aumentos na quantidade da biomassa seguido de queda na concentração quando o reator é esvaziado e realimentado com o efluente. Esse aumento pode ser explicado pelo fato do leito estar preenchido com lodo microbiano, que continua a crescer com a concomitante remoção de contaminantes do efluentes, portanto, os microrganismos em excesso se desprendem do leito e permanecem suspenso na fração líquida.

Por outro lado, nos reatores R2 (Gráfico 8B), R3 (Gráfico 8C) e R4 (Gráfico 8D) esse peso seco vai caindo gradativamente, justificado pela aderência dos microrganismos ao leito com o passar do tempo, assim como foi evidenciado nos primeiros dias de operação de reator R1. Nesse caso, não é possível verificar os picos de aumento posterior da biomassa porque os reatores foram desmontados antes de atingir a sobrecarga no preenchimento do leito.

Os valores de peso seco celular do lodo microbiano formado durante o tratamento desse tipo de efluente por consórcio microalga-fungo com valores entre 140-1250 mg.L⁻¹, está compatível com os valores encontrados no trabalho de Medeiros et al. (2025) e Santos et al. (2024).

6 CONCLUSÃO

O presente estudo demonstrou que a utilização de um biorreator de leito fixo confeccionado a partir de resíduos da construção civil, associado a um consórcio microalga-fungo, pode ser uma alternativa tecnicamente viável e sustentável para o tratamento de efluentes, especificamente o soro do leite. A pesquisa evidenciou que os resíduos da construção civil apresentaram características estruturais favoráveis, como porosidade e superfície irregular, que possibilitam a fixação e o crescimento dos microrganismos, contribuindo para a estabilidade do sistema.

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) confirmou que a superfície dos materiais eram propícias a aderência microbiana, enquanto a espectroscopia no infravermelho (FTIR) indicou a presença de grupos funcionais que reforçam a presença da porosidade dos materiais.

Os resultados obtidos confirmam que o biorreator aerado de leito fixo foi eficiente na remoção de contaminantes do efluente, alcançando valores menores que o indicado pelas legislações consideradas para DQO, NT e FT. Esses valores indicam um desempenho significativo do sistema na degradação da carga orgânica e na remoção de nutrientes, reduzindo o impacto ambiental do descarte inadequado do soro do leite, e alcançando os limites para descarte. Além disso, a estabilidade operacional do sistema foi verificada ao longo do tempo, demonstrando a resistência do consórcio microbiano às diferentes cargas orgânicas aplicadas.

Diante dos achados, concluiu-se que a estratégia empregada apresenta um grande potencial para aplicações em tratamentos sustentáveis de efluentes industriais, promovendo o reaproveitamento de resíduos da construção civil e contribuindo para uma abordagem mais ecológica e economicamente viável no tratamento de águas residuais.

No entanto, estudos futuros devem explorar a escalabilidade do sistema e melhoria do sistema, além de estudar sua viabilidade econômica em maior escala e a otimização de parâmetros operacionais para maximizar a eficiência do tratamento assim como novos testes devem ser realizados para reaverificar alguns pontos do processo.

REFERÊNCIAS

- ABIA – Associação Brasileira da Indústria de Alimentos. Relatório Anual 2023. Disponível em:<<https://www.abia.org.br/vsn/temp/z2023417RelatorioAnual2023interativoFINAL.pdf>>. Acesso em 12 de fev. de 2024.
- ABIA – Associação Brasileira da Indústria de Alimentos. Relatório Anual 2023. Disponível em:<https://www.abia.org.br/vsn/temp/z2021113Alimentocienciafolder.pdf>. Acesso em 21 de maio de 2024.
- ABDULLAH, Z. T. Remanufacturing construction and demolition waste and incineration ashes into eco-blocks: Quantitative sustainability assessment. Results in Engineering, v. 24, p. 103242, 2024 <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103242>.
- ABOU-ELELA, S. I.; ABO-EL-ENEIN, S. A.; HELLAL, M. S. Utilization of autoclaved aerated concrete solid waste as a bio-carrier in immobilized bioreactor for municipal wastewater treatment. Desalination and Water Treatment, v. 168, n. October, p. 108–116, 2019. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24640>
- ABRAMAT – Associação Brasileira da Indústria de Materiais de Construção e FGV Projetos. Perfil da Cadeia Produtiva da Construção e da Indústria de Material e Equipamentos -2021. Disponível em:< https://abramat.org.br/wp-content/uploads/2023/03/Perfil-da-Cadeia-resumo-2022_c-serie-5-anos-v2.pdf>. Acesso em: 14 de fev. de 2024.
- ABRECON - Associação Brasileira para a Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição. Programa Setorial 2014/2015. Disponível em:<<https://abrecon.org.br/entulho>>. Acesso em: 09 de jun. de 2023.
- ABREMA – Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023. Disponível em:<https://abrema.org.br/pdf/Panorama_2023_P1.pdf>. Acesso em: 11 de fev. de 2024.
- ABYAR, H., NAMROODI, S., GHAREKHANI, Z., & HAJIMORADLOO, F. Life cycle and efficiency assessment of fixed-bed bioreactor using recycled shredded plastics compared with conventional activated sludge bioreactor for dairy wastewater treatment. **Journal of Water Process Engineering**, v. 64, p. 105676, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105676>
- AHMAD, T.; AADIL, R.M.; AHMED, H.; RAHMAN, U.; SOARES, B.C.V.; SOUZA, S.L.Q.; PIMENTEL, T.C.; SCUDINO, H.; GUIMARÃES, J.T.; ESMERINO, E.A.; FREITAS, M.Q.; ALMADA, R.B.; VENDRAMEL, S.M.R.; SILVA, M.C.; CRUZ, A.G. Treatment and utilization of dairy industrial waste: A review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 88, p. 361-372, 2019. doi: [10.1016/j.tifs.2019.04.003](https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.04.003)

ALAMRI, S.; et al. Experimental investigation of *Chlorella vulgaris* and *Enterobacter* sp. MN17 for decolorization and removal of heavy metals from textile wastewater. **Water**. 2020;12:3034. <https://doi.org/10.3390/w12113034>.

ANDRADE, Aline; FERNANDES, Alexandre Andrade; VIANA, Abraão José Silva. Reaproveitamento e alternativas para o Soro proveniente de Queijarias no Município de Itamarandiba–Minas Gerais. **Revista GeTeC**, v. 19, 2024.

BARBOSA JÚNIOR, I. de O.; MARTINS, V. W. B.; NEVES, R. M. das; MACÊDO, A. N. Práticas sustentáveis no setor da construção: um panorama de empresas atuantes no Brasil e suas contribuições para alcance dos ODS da ONU. **Ambiente Construído**, [S. l.], v. 24, 2024. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212024000100738>

BAPTISTA, J. L. M.; RODOLPHO, D. Gestão dos Resíduos Na Indústria Alimentícia. **Revista Interface Tecnológica**, v. 18, n. 1, p. 567-579, 2021. <https://doi.org/10.31510/infa.v18i1.1139>

BOSI, M. G., BERNABÉ, B. M., DELLA LUCIA, S. M., & ROBERTO, C. D. Bebida com adição de soro de leite e fibra alimentar prebiótica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, p. 339-341, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2013000300013>

BRAGA, L. J. D. N., MAR, B. D. C., FEITOZA, J. C., & MACIEL, J. S. C.. Análise dos impactos ambientais causados pelos resíduos sólidos de construção e demolição em Manaus–AM. 2024.

Brasil. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução CONAMA Nº 307, de 05/06/2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.

BRITO, C. E. C., MARINHO, R. N., VILHENA, M. B. D., MACÊDO, E. N., & SOUZA, J. A. D. S. Estudo dos efeitos da adição de óxido de cálcio nas propriedades cerâmicas, na morfologia e na produção de agregados cerâmicos produzidos à base de resíduo de bauxita. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 28, n. 2, p. e20230039, 2023. <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2023-0039>

CAMILO, B. Q., CARDOSO, C. N. P., BATISTA, S. B. S., MARQUES, A. T., Gadelha, H. S., Castro Filho, H. M., ... & dos Santos, S. A.. Resíduos sólidos na construção civil: análise da gestão frente aos impactos causados ao meio ambiente. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 2, p. e32711220994-e32711220994, 2022. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i2.20994>

CARVALHO, I. T. Microbiologia básica. 2016.

CHARRIA-GIRON, E.; AMAZO, V.; DE ÂNGULO, D.; HIDALGO, E.; VILLEGAS-TORRES, M.F.; BAGANZ, F.; ORTEGA, N. H. C. Strategy for managing industrial anaerobic sludge through the heterotrophic cultivation of *Chlorella sorokiniana*: effect

of iron addition on biomass and lipid production. **Bioengineering**. 2021;8:82. <https://doi.org/10.3390/bioengineering8060082>.

CHATURVEDI, A.; RAI, B. N.; RAM, S. S.; JAISWAL, R. P.. Comparative toxicity assessment using plant and luminescent bacterial assays after anaerobic treatments of dyeing wastewater in a recirculating fixed bed bioreactor. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 09, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105466>

COLLA, L. M., PRIMAZ, A. L., LIMA, M. D., BERTOLIN, T. E., & COSTA, J. A. V. Isolamento e seleção de fungos para biorremediação a partir de solo contaminado com herbicidas triazínicos. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, p. 809-813, 2008. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542008000300016>

CUNHA, G. N.; PASQUALETTO, A. Impactos socioeconômicos e ambientais do transporte ao processamento da cana-de-açúcar na Região Norte de Goiás. **COLÓQUIO-Revista do Desenvolvimento Regional**, v. 18, n. 4, out/dez, p. 301-322, 2021. <https://doi.org/10.26767/2213>

DAS, P. K., RANI, J., RAWAT, S., & KUMAR, S. Microalgal co-cultivation for biofuel production and bioremediation: current status and benefits. **BioEnergy Research**, v. 15, n. 1, p. 1-26, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10254-8>

DE ANDRADE, F. P., GONÇALVES, A. H. S., SILVA, C. E. F., MACÁRIO, L. R., DA SILVA, J. V. O. N., DA GAMA, B. M. V., ... & TONHOLO, J. Treatment of oil-produced water using a fungus–microalga consortium. **Energy, Ecology and Environment**, v. 9, n. 2, p. 144-158, 2024. <https://doi.org/10.1007/s40974-023-00307-3>

DE ANDRADE, F. P., SILVA, C. E. F., MEDEIROS, J. A., VIEIRA, R. C., DE SÁ FILHO, M. L. F., & Santos, G. K. S. Consortium between microalgae and other microbiological groups: a promising approach to emphasise the sustainability of open cultivation systems for wastewater treatment. **Journal of Water Process Engineering**, v. 50, p. 103211, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103211>

DESCONSI, A. C.; IZÁRIO FILHO, H. J.; SALAZAR, R. F. S. Avaliação físico-química e microbiológica do soro de leite concentrado obtido por osmose inversa. **Revista Ambiente & Água**, v. 9, p. 325-335, 2014. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1316>

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores. EdIPUCRS, 2007.

DO CARMO CESÁRIO, C., SOARES, J., COSSOLIN, J. F. S., ALMEIDA, A. V. M., BERMUDEZ SIERRA, J. J., DE OLIVEIRA LEITE, M., ... & DOS REIS COIMBRA, J. S. (2022). Biochemical and morphological characterization of freshwater microalga

Tetrademus obliquus (Chlorophyta: Chlorophyceae). *Protoplasma*, 1-12..
 Biochemical and morphological characterization of freshwater microalga
 Tetrademus obliquus (Chlorophyta: Chlorophyceae). **Protoplasma**, p. 1-12, 2022.
<https://doi.org/10.1007/s00709-021-01712-3>

DOMINGUES, R. S.; NUNES, V. G. A. Reuso e reaproveitamento de resíduos de construção e demolição na construção civil brasileira: Potencialidades e barreiras. 2024.

DOS SANTOS, L. M., DA SILVA, J. C. B., SILVA, C. E. F, DA GAMA, B. M. V., MEDEIROS, J. A., MARKOU, G., ... & ABUD, A. K. D. S. Co-Cultivation between the Microalga Tetrademus obliquus and Filamentous Fungus Cunninghamella echinulata Improves Tertiary Treatment of Cheese Whey Effluent in Semicontinuous Mode. **Processes**, v. 12, n. 8, p. 1573, 2024. <https://doi.org/10.3390/pr12081573>

DUARTE, I. F., DE SOUZA RIBEIRO, V., DOS SANTOS, M. I. G. R., COSTA, T. A. D., DE SANTANA, M. B., OLIVEIRA, A. C. V., ... & MOREIRA, Í. T. A.. Mecanismos de remediação dos hidrocarbonetos policíclicos aromáticos do petróleo utilizando microalgas e cianobactérias com vistas a bioeconomia circular. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 11, p. e512101119954-e512101119954, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i11.19954>

EFREMENKO, E., STEPANOV, N., SENKO, O., ASLANLI, A., MASLOVA, O., & LYAGIN, I. Using Fungi in Artificial Microbial Consortia to Solve Bioremediation Problems. **Microorganisms**, v. 12, n. 3, p. 470, 2024. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12030470>

ESTOLANO, A. M. L., SILVA, D. H. A. D., SÁ, L. F. T., CRUZ, F. M. D., & LIMA, N. B. D. Análise da rugosidade de agregados reciclados e a influência na aderência pasta-agregado em compósitos cimentícios: uma nova abordagem com microscopias de superfície. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 29, n. 4, p. e20240528, 2024. <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2024-0528>

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Food Outlook: Biannual Report on Global Food Markets. Rome, 2021.

FERREIRA, L. D. O., PIMENTA, C. J., SANTOS, G., RAMOS, T. D. M., PEREIRA, P. A. P., & PINHEIRO, A. C. M. Adição de soro de leite e café na qualidade do doce de leite pastoso. **Ciênc. rural** (Online), 2012. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782012000700028>

FILHO, J. A. R.; VITOLO, M. Guia Para Aulas Práticas de Biotecnologia de Enzimas e Fermentação. São Paulo. Editora Bluncher, 2017.

FORMIGONI, I. (2020) Principais países produtores de leite: dados de julho de 2020.

Farmnews. Acesso em: 21, maio de 2024, disponível em: <http://www.farmnews.com.br/gestao/principais-paises-produtores-de-leite/>.

GALVÃO, D. F.; DOS SANTOS GOMES, E. R.. Pós-tratamento de efluentes de indústria de laticínios por processos de separação por membranas. **Ambiência**, v. 14, n. 3, p. 594-613, 2018. DOI:10.5935/ambiencia.2018.03.12

GAVA, A., MOLOSSI, F. A., WICPOLT, N. S., OGLIARI, D., CARDOSO, T. C., TRAVERSO, S. D., & WISSER, C. S. Soro de leite como causa de alta mortalidade de bovinos. **Pesquisa Veterinária Brasileira**, v. 38, p. 620-623, 2018. <https://doi.org/10.1590/1678-5150-PVB-5196>

GAVLAK, G.; DE SOUSA VIDAL, C. M.. Avaliação de um biorreator a membrana de leite móvel na remoção de nutrientes de efluente da indústria de laticínios. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica**, p. 896-915, 2022. <https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2022.15.2.79853>

GUIMARÃES, L. D. S., FERNANDES, A. P. S., SOARES, D. S. B., MENEZES, N. M. C., COSTA, J. C. C. P., PINTO, M. D. S. D. C., ... & Martins, W. F. Métodos de inativação de fungos filamentosos termorresistentes em frutas e sucos de frutas: uma revisão integrativa. 2021. <https://repositorio.ifgoiano.edu.br/handle/prefix/2258>

HASSAN, R. G.; EL-SAID, M. A.; MOHAMED, L. A. Assessment of some bacterial and fungal strains for dairy wastewater treatment. **Egyptian Journal of Applied Science**, v. 35, n.1, p. 272-283, 2020 doi: 10.21608/ejas.2020.148321.

ILTCHENCO, S., PRECI, D., BONIFACINO, C., FRAGUAS, E. F., STEFFENS, C., PANIZZOLO, L. A., ... & STEFFENS, J. Whey protein concentration by ultrafiltration and study of functional properties. **Ciência Rural**, v. 48, p. e20170807, 2018. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20170807>

LEÃO, Ú. M. M. R., LEÃO, M., SANCHES, J. C. M., SCHNEIDER, K. W. S., VALENZUELA, R. G., & SCHNEIDER, R. M. O cenário do gerenciamento de resíduos da construção civil no Brasil. ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, v. 20, 2024.

LEE, S.; CHANG, H. E.; LEE, Jechan. Construction and Demolition Waste Management and its Impacts on the Environment and Human Health: Moving Forward Sustainability Enhancement. *Sustainable Cities and Society*, p. 105855, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105855>

LIN, W., CHEN, L., TAN, Z., DENG, Z., & LIU, H. . Application of filamentous fungi in microalgae-based wastewater remediation for biomass harvesting and utilization: from mechanisms to practical application. **Algal Research**, v. 62, p. 102614, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102614>

LOPES, W. A.; FASCIO, M. Esquema para interpretação de espectros de substâncias orgânicas na região do infravermelho. **Química nova**, v. 27, p. 670-673, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422004000400025>

MANIKKAMPATTI PALANISAMY, Murugesan; MOHAMED LEBBAI, Minar; RATNAM, M. Venkata. Treatment of Municipal Wastewater in a Fixed Aerated Bed: Use of Natural Fibrous Materials. **International Journal of Biomaterials**, v. 2022, n. 1, p. 4839913, 2022.

MARAZZI, F.; FORNAROLI, R.; CLAGNAN, E.; BRUSETTI, L.; FICARA, E.; BELLUCCI, M.; MEZZANOTTE, V. Wastewater from textile digital printing as a substrate for microalgal growth and valorization. **Bioresource Technology**, v.375, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128828>

MARCHI, Cristina M. Dacach Fernandez; BOHANA, Mirela Carvalho; DE JESUS, Gilciana. Resíduos de Construção Civil no Brasil e na Itália: Enfoque nas Normas e nas Tecnologias de Sustentabilidade. **Boletim do Gerenciamento**, v. 45, n. 45, 2024.

MARINHO, Isabela Queiroz. Tratamento de efluentes da indústria alimentícia. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

MEDEIROS, J. A. Biorremediação do soro do leite utilizando consórcio microalga-fungo. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2022.

MEDEIROS, J.A., SILVA, C.E.F., SANTOS, G. K. S., DO NASCIMENTO, M.A.A., DE ANDRADE, F.P., DE SÁ FILHO, M.L.F., ... & ALMEIDA, R.M.R.G.. Tertiary treatment of dairy wastewater applying a microalga-fungus consortium. **Environmental Technology**, v. 46, n. 3, p. 370-386, 2025. <https://doi.org/10.1080/09593330.2024.2357695>

MEHRA, K. S., ABRAR, I., BHATIA, R. K., & GOEL, V. A comprehensive review of algae consortium for wastewater bioremediation and biodiesel production. **Energy Conversion and Management**, v. 325, p. 119428, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119428>

MENDES, W. J. M.; GONÇALVES, B. M. T.; COSTA, N. C.; SANTOS, M. J. F.; OLIVEIRA, T. M. F. S.; BENASSI, V. M. Caracterização macromorfológica de fungos filamentosos isolados em Minas Gerais e Espírito Santo. SICITAL - Simpósio de Ciência e Tecnologia de Alimentos, 2022. DOI: [10.29327/167959.1-5](https://doi.org/10.29327/167959.1-5)

MICHEL, B., NEVES, M. T., SOUSA, R. D. C. S. D., CHAGAS, M. M. D., MARTINS, B. A., & COIMBRA, J. S. D. R. Partição de proteínas de soro de leite em sistemas aquosos bifásicos baseados em líquidos iônicos. **Química Nova**, v. 38, p. 1148-1152, 2015 <https://doi.org/10.5935/0100-4042.20150123>

MORKER, H.; SAINI, B.; DEY, A. Role of membrane technology in food industry effluent treatment. **Materials Today: Proceedings**, v. 77, p. 314-321, 2023.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.406>

MUBASHAR, M.; NAVEED, M.; MUSTAFA, A.; ASHRAF, S.; SHEHZAD BAIG, K.; RATHOUR, R. K., SHARMA, D., ULLAH, S., MAHMOUD, E. H. M., SHARMA, N., KUMAR, P., ... & BHATIA, R. K. Bacterial–microalgal consortia for bioremediation of textile industry wastewater and resource recovery for circular economy. **Biotechnology for the Environment**, v. 1, n. 1, p. 6, 2024.

<https://doi.org/10.1186/s44314-024-00005-2>

MUTECA, F. L. L.; Biorremediação de solo contaminado com óleo cru proveniente de Angola. Dissertação (Mestre em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Programa em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

KESHMIRI-NAQAB, Rasoul; TAGHAVIJELOUDAR, Mohsen. Efficient adsorption of acid orange 7 from wastewater using novel bio-natural granular bentonite-sawdust-corn cob (GBSC): Mixture optimization, adsorption kinetic and regeneration. **Environmental Research**, v. 262, p. 119966, 2024.

<https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119966>

NOÇÕES DE MICOLOGIA. Aula 09. Portal CESAD. 2010. Disponível em:< https://cesad.ufs.br/ORBI/public/uploadCatalogo/10303304042012Microbiologia_Geral_Aula_9.pdf>. Acesso em 17 de fev. de 2024.

OLIVEIRA, C. Y. B., OLIVEIRA, C. D. L., Prasad, R., ONG, H. C., ARAUJO, E. S., SHABNAM, N., & GÁLVEZ, A. O. A multidisciplinary review of *Tetrademus obliquus*: a microalga suitable for large-scale biomass production and emerging environmental applications. **Reviews in Aquaculture**, v. 13, n. 3, p. 1594-1618, 2021.

PAIC – Pesquisa Anual da Indústria da Construção. IBGE. Disponível em:< <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/industria/9018-pesquisa-anual-da-industria-da-construcao.html?>>. Acesso em 14 de fev. de 2024.

PIMENTEL, F. C.; TASSI, R.; ALASSIA, D. G.; MINETTO, B.; PERSCH, C. G. Influência do substrato no desempenho térmico de telhados verdes. **Ambiente Construído**, v. 23, n. 4, p. 83-103, 2023. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212023000400692>

PONMANIAN, M.; SIVASHANMUGAM, P. Biotransformation of cheese whey effluent: A dual approach for wastewater treatment and polyhydroxyalkanoates production using mixed microbial cultures. **Bioresource Technology Reports**, p. 102054, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2025.102054>

RAHIMI, Z., ZINATIZADEH, A. A., ZINADINI, S., VAN LOOSDRECHT, M., &

BATSTONE, D. J. A high-rate A2O bioreactor with airlift-driven circulation and anoxic hybrid growth for enhanced carbon and nutrient removal from a nutrient rich wastewater. **Chemosphere**, v. 370, p. 143811, 2025.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143811>

RAZZAK, S. A., SULTANA, N., HOSSAIN, S. Z., RAHMAN, M. M., YUAN, Y., HOSSAIN, M. M., & ZHU, J.. A hybrid BOA-SVR approach for predicting aerobic organic and nitrogen removal in a gas-liquid-solid circulating fluidized bed bioreactor. **Digital Chemical Engineering**, v. 13, p. 100188, 2024.

<https://doi.org/10.1016/j.dche.2024.100188>

RODRIGUES, A. R. S. P. Biorremediação de solos contaminados por pesticidas—uma revisão de literatura, VI WIPIS – Workshop Internacional de Pesquisa em Indicadores de Sustentabilidade, PUC-Campinas, 2021.

ROVEROTO, G. P., TELES, J. C., VUITIK, G. A., BATISTA, J. S. D. S., & BARANA, A. C. Craft brewery wastewater treatment: a fixed-bed single-batch reactor with intermittent aeration to remove COD and TN. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 64, n. spe, p. e21200613, 2021. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-75years-2021200613>

SANTOS, G. K. S. Isolamento de fungos filamentosos em sistema aberto de tratamento do soro do leite por microalgas. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Química, Universidade Federal de Alagoas, 2023.

SANTOS, E. A., ARAUJO, G. V. D. N., FONSÊCA, G. M., ALMEIDA, V. G. D. O., OLIVEIRA, H. A. D., MELO, L. D., & MELO, F. M. C. D. Influência da incorporação de resíduo de lapidação de vidro nas propriedades da argamassa de cimento Portland. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 29, n. 2, p. e20230330, 2024. <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2023-0330>

SENA, P. G.; AMORIM, E. F.; INGUNZA, M. P. D. Análises de dosagens de concreto asfáltico do tipo Pré Misturado a Frio (PMF) utilizando Resíduos da Construção e Demolição de obras (RCD). **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, n. 4, p. e12529, 2019. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190004.0854>

SERVADEI, F., MURRI, A. N., PAPA, E., MEDRI, V., & LANDI, E. Thermal behavior of construction and demolition waste-based geopolymers. **Construction and Building Materials**, v. 452, p. 138969, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138969>

SIZIRICI, B.; YILDIZ, I.. Simultaneous removal of organics and metals in fixed bed using gravel and iron oxide coated gravel. *Results in Engineering*, v. 5, p. 100093, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2019.100093>

SIZIRICI, B.; YILDIZ, I. Organic matter removal via activated sludge immobilized gravel in fixed bed reactor. In: *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences, 2020. p.

03006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019103006>

SLAVOV, A. K.. General characteristics and treatment possibilities of dairy wastewater—a review. **Food technology and biotechnology**, v. 55, n. 1, p. 14, 2017. <https://doi.org/10.17113/ftb.55.01.17.4520>

STIBBS, D. J., COUTO, P. S., TAKEUCHI, Y., RAFIQ, Q. A., JACKSON, N. B., & RAYAT, A. C. Continuous manufacturing of lentiviral vectors using a stable producer cell line in a fixed-bed bioreactor. **Molecular Therapy Methods & Clinical Development**, v. 32, n. 1, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.omtm.2024.101209>

SOARES, J. P., MARQUES, G. D. A., MAGALHÃES, C. S. D., SANTOS, A. B., JOSÉ, J. F. B. D. S., SILVA, D. A., & SILVA, E. M. M. D.. Efeito da adição de proteína do soro do leite como substituto do trigo na formulação de bolos sem adição de açúcar. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 21, p. e2016190, 2018. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.19016>

TANG, D. Y. Y., KHOO, K. S., CHEW, K. W., TAO, Y., HO, S. H., & SHOW, P. L. Potential utilization of bioproducts from microalgae for the quality enhancement of natural products. **Bioresource Technology**, v. 304, p. 122997, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122997>

TONSO, A., BADINO JUNIOR, A. C., & SCHMIDELL NETTO, W. Tipos de Biorreatores e formas de operação. *In*: SCHMIDELL, Willibaldo (org.). *Coleção Biotecnologia Industrial. Vol 2.* São Paulo. Editora Blüncher, 2021. Cap 6. p. 109-126.

VENEZIAM, L.R. Efeito da adição de pó de cerâmica vermelha no concreto em substituição parcial a areia média. TCC (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, Engenharia Civil de Infraestrutura. 2023.

WANG, Z.; ZHENG, M.; HE, C.; HU, Z.; YU, Y. WANG, W. Enhanced treatment of low-temperature and low carbon/nitrogen ratio wastewater by corn-cob-based fixed bed bioreactor coupled sequencing batch reactor. **Bioresource Technology**. v.351, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126975>

YÜCESOY, Z.; SAHINKAYA, E.; CALLI, B. Innovative high-performance and energy-positive Co-treatment of organic kitchen waste and domestic wastewater using a fluidized bed ceramic membrane bioreactor. **Journal of Environmental Management**, v. 370, p. 122578, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122578>

ZAINITH, S., SAXENA, G., KISHOR, R., & BHARAGAVA, R. N. Application of microalgae in industrial effluent treatment, contaminants removal, and biodiesel production: Opportunities, challenges, and future prospects. **Bioremediation for environmental sustainability**, p. 481-517, 2021. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12->

[820524-2.00020-1](#)

ZKERI, E., ILIOPOULOU, A., KATSARA, A., KORDA, A., ALOUPI, M., GATIDOU, G., ... & STASINAKIS, A. S. Comparing the use of a two-stage MBBR system with a methanogenic MBBR coupled with a microalgae reactor for medium-strength dairy wastewater treatment. **Bioresource Technology**, v. 323, p. 124629, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124629>