

**Universidade Federal de Uberlândia**  
**Instituto de Química**  
**Programa de Pós-graduação em Química**

JÉSSICA GONÇALVES BRAGA  
Dissertação de mestrado

APLICAÇÃO DE BIOSSURFACTANTE NA REMOÇÃO DE ESCUMA EM  
REATORES UASB: UMA ABORDAGEM SUSTENTÁVEL

UBERLÂNDIA  
2025



**Universidade Federal de Uberlândia**  
**Instituto de Química**  
**Programa de Pós-graduação em Química**

JÉSSICA GONÇALVES BRAGA

**APLICAÇÃO DE BIOSSURFACTANTE NA REMOÇÃO DE ESCUMA EM  
REATORES UASB: UMA ABORDAGEM SUSTENTÁVEL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Exatas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Química.

Orientador: Prof. Dr. Sidnei Gonçalves da Silva

UBERLÂNDIA

2025

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

B813  
2025 Braga, Jéssica Gonçalves, 1998-  
APLICAÇÃO DE BIOSURFACTANTE NA REMOÇÃO DE ESCUMA  
EM REATORES UASB: UMA ABORDAGEM SUSTENTÁVEL [recurso  
eletrônico] / Jéssica Gonçalves Braga. - 2025.

Orientador: Sidnei Gonçalves da Silva.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Pós-graduação em Química.  
Modo de acesso: Internet.  
DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2025.486>  
Inclui bibliografia.

1. Química. I. Silva, Sidnei Gonçalves da, 1980-, (Orient.). II.  
Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Química.  
III. Título.

CDU: 54

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:  
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091  
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



## ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Química				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 411, PPGQUI				
Data:	Trinta e um de julho de dois mil e vinte e cinco	Hora de início:	13h	Hora de encerramento:	15:30
Matrícula do Discente:	12322QMI001				
Nome do Discente:	Jéssica Gonçalves Braga				
Título do Trabalho:	Aplicação de biossurfactante na remoção de espuma em reatores UASB: uma abordagem sustentável				
Área de concentração:	Química				
Linha de pesquisa:	Instrumentação Analítica e Preparo de Amostras				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Internet das coisas aplicada em química analítica: desenvolvimento de sistemas analíticos portáteis				
<a href="#">ODS</a> 04	ODS 6 - Água potável e saneamento: garantir disponibilidade e manejo sustentável da água e saneamento para todos				

Reuniu-se, por webconferência, no link [meet.google.com/vru-gkwu-att](https://meet.google.com/vru-gkwu-att), a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Química, assim composta pelos professores doutores: **Edgar Silveira Campos**, da Universidade Federal de Uberlândia; **Camila Souza Porto**, da Universidade Federal de Alagoas e **Sidnei Gonçalves da Silva**, orientador da candidata.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr(a). **Sidnei Gonçalves da Silva**, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu à Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovada.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.



Documento assinado eletronicamente por **Sidnei Gonçalves da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 31/07/2025, às 15:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Edgar Silveira Campos, Professor(a) do Magistério Superior**, em 31/07/2025, às 15:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Camila Souza Porto, Usuário Externo**, em 31/07/2025, às 15:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **6534093** e o código CRC **992FDF60**.

**Referência:** Processo nº 23117.041797/2025-50

SEI nº 6534093

## DEDICATÓRIA

Ao NUCBIO e a todos os colaboradores do laboratório que, de alguma forma, contribuíram para o desenvolvimento deste estudo. Agradeço a valiosa ajuda na elaboração de experimentos, no esclarecimento de ideias, no manuseio de equipamentos, na preparação de soluções, na plotagem de gráficos e em tantas outras atividades que foram essenciais para a realização deste projeto.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, que me fortaleceu e permitiu que este trabalho fosse realizado em um momento em que me sentia sem forças para continuar. Sou profundamente grata por Sua presença e orientação ao longo de toda essa jornada.

Gostaria de expressar minha sincera gratidão ao meu orientador, Prof. Dr. Sidnei Gonçalves da Silva, que foi fundamental para a conclusão deste trabalho, sempre com dedicação, paciência e orientação precisa. Também agradeço ao Prof. Dr. Edgar Silveira por toda a ajuda ao longo do processo.

Agradeço imensamente ao Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE) pela visita às suas instalações e pelo fornecimento das amostras, essenciais para a realização da pesquisa.

Sou grata ao laboratório NUCBIO por me permitir participar das atividades de pesquisa e pela troca de experiências que contribuíram para o meu aprendizado e desenvolvimento.

Agradeço à minha família, que sempre esteve ao meu lado, proporcionando o apoio emocional e estrutural necessários para que eu pudesse chegar até aqui. Sua confiança e compreensão foram fundamentais para o meu sucesso.

Quero também fazer um agradecimento especial à Laura, minha companheira de projeto, que compartilhou este percurso comigo, realizando sua iniciação científica com muito empenho e dedicação.

Minhas palavras de gratidão vão também para as colaboradoras Mayara Silva, Amanda Rocha, Adrielle Ribeiro e Tais Abrantes. Elas foram fundamentais na minha adaptação ao universo da biotecnologia, área que era nova para mim. A paciência e o ensino sobre microbiologia, equipamentos e técnicas laboratoriais foram essenciais para o desenvolvimento do meu trabalho.

Aos meus amigos, que se tornaram uma verdadeira família para mim durante minha jornada em Uberlândia, agradeço o apoio, compreensão e companheirismo.

Não posso deixar de agradecer também ao coordenador do Programa de Pós-Graduação, pela compreensão das minhas necessidades e dificuldades ao longo do curso, o que contribuiu muito para o meu bem-estar e organização.

Por fim, sou imensamente grata à FAPEMIG, que me proporcionou a bolsa de estudos, um apoio fundamental para a realização desta pesquisa e pelo suporte financeiro (APQ-01395-22).

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, muito obrigada.

"Sustentabilidade é a chave para o futuro, pois não podemos resolver nossos problemas com a mesma mentalidade que os criamos."

Albert Einstein



## RESUMO

O Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) utilizado no Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE) é um sistema de tratamento anaeróbico que opera com fluxo ascendente por gravidade, no qual o efluente atravessa uma cama de lodo, promovendo a decomposição da matéria orgânica por bactérias anaeróbicas. Entretanto, o acúmulo de espuma nas laterais do reator prejudica a eficiência do processo. Este estudo teve como objetivo produzir um BS a partir da levedura *Rhodotorula mucilaginosa*, e aplicá-lo na biorremediação da espuma acumulada nos reatores UASB, promovendo uma solução sustentável para essa problemática. Na análise do pré-inoculo o primeiro dia apresentou valor de DO suficiente para o prosseguimento dos experimentos, garantindo maior rapidez e sustentabilidade ao processo. O BS demonstrou colapso da gota e espalhamento, confirmando suas propriedades surfactantes. O rendimento foi de 10,66 g/L. O BS produzido apresentou CMD de 60 g/L, como esperado, e CMC de 5g/L, devido à baixa eficiência em formar micela. O índice de emulsificação foi considerado bom IE  $\geq 50$  evidenciando sua eficiência em estabilizar a emulsão. Os testes de estabilidade indicaram que as condições de pH 6,6 e temperatura de 30 °C foram as mais favoráveis. A espuma foi coletada diretamente do reator UASB e analisada quanto à sua composição. Ao aplicar o BS na espuma, verificou-se que a melhor condição foi observada no primeiro dia de análise, utilizando a condição C3 (meio + espuma + BS + levedura). Ao realizar uma nova aplicação em condições otimizadas, as amostras contendo BS (C4) e a combinação de BS com peróxido de hidrogênio (C5) apresentaram uma redução significativa da TS, indicando que esses tratamentos foram eficazes na degradação da espuma. Além disso, a recuperação eficiente da acetona utilizada no processo fermentativo contribuiu para a sustentabilidade geral, reduzindo custos e impactos ambientais. Embora os resultados obtidos até o momento sejam promissores, especialmente em termos de eficiência e sustentabilidade, mais experimentos e análises são necessários para confirmar a aplicabilidade do BS no tratamento da espuma em reatores UASB.

Palavras-chave: Biossurfactante, biorremediação, espuma, reatores UASB, *Rhodotorula mucilaginosa*, sustentabilidade

## ABSTRACT

The *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB) used by the Municipal Department of Water and Sewage (DMAE) is an anaerobic treatment system that operates with an upward gravity flow, where the effluent passes through a sludge blanket, promoting the decomposition of organic matter by anaerobic bacteria. However, foam accumulation on the reactor walls impairs process efficiency. This study aimed to produce a biosurfactant (BS) from the yeast *Rhodotorula mucilaginosa* and apply it for the bioremediation of foam accumulated in UASB reactors, providing a sustainable solution to this problem. The inoculum analysis showed sufficient dissolved oxygen (DO) on the first day to proceed with experiments, ensuring faster and more sustainable processing. The BS demonstrated droplet collapse and spreading, confirming its surfactant properties, with a yield of 10.66 g/L. The produced BS had a critical micelle dilution (CMD) of 60 g/L and a critical micelle concentration (CMC) of 5 g/L, indicating low micelle-forming efficiency. The emulsification index (EI) was considered good ( $\geq 50$ ), showing efficiency in stabilizing emulsions. Stability tests indicated that pH 6.6 and 30 °C were the most favorable conditions. Foam was collected directly from the UASB reactor and analyzed for composition. Applying the BS to the foam showed the best results on the first day under condition C3 (medium + foam + BS + yeast). In optimized conditions, samples containing BS (C4) and BS combined with hydrogen peroxide (C5) significantly reduced total solids (TS), indicating effective foam degradation. Additionally, efficient recovery of acetone used in fermentation contributed to overall sustainability by reducing costs and environmental impacts. Although the results are promising regarding efficiency and sustainability, further experiments are needed to confirm the applicability of the BS in treating foam in UASB reactors.

**Keywords:** Biosurfactant, bioremediation, foam, UASB reactors, *Rhodotorula mucilaginosa*, sustainability

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Representação da formação de micelas .....	22
<b>Figura 2:</b> Representa a reativação da Cepa, cuja tal, representa a <i>Rhodotorula mucilaginosa</i> .....	25
<b>Figura 3:</b> Tensão Superficial do Pré-inóculo ao longo dos dias .....	39
<b>Figura 4:</b> Densidade Ótica (DO) do pré-inóculo contendo o meio YPD com a levedura <i>Rhodotorula mucilaginosa</i> ao longo dos dias representado em gráfico de barras .....	40
<b>Figura 5:</b> Estrutura Química do Hexano .....	42
<b>Figura 6:</b> Representa a estrutura do éster.....	42
<b>Figura 7:</b> Representa formação de um triglicerídio a partir da combinação do ácido graxo com álcool.....	43
<b>Figura 8:</b> Representa a estrutura química do Ácido Oleico.....	43
<b>Figura 9:</b> Representa a estrutura química do Ácido Linoleico .....	44
<b>Figura 10:</b> Representa a variação da TS de acordo com aumento da [BS].....	49
<b>Figura 11:</b> Representa os pontos de CMC e CMD referentes s diluições do BS produzido. ....	49
<b>Figura 12:</b> Teste de Estabilidade do [BS]=1CMD em diferentes condições físico-químicas de pH e temperatura ao longo do dias.....	51
<b>Figura 13:</b> Coleta da amostra de espuma na superfície do reator UASB contido no DMAE .....	53
<b>Figura 14:</b> Variação da Tensão Superficial durante a aplicação do BS em soluções contendo 1% de espuma em diferentes condições ao Longo de 25 Dias.....	55
<b>Figura 15:</b> Variação da Tensão Superficial durante a aplicação do BS em soluções contendo 4% de espuma em diferentes condições ao Longo de 25 Dias.....	56
<b>Figura 16:</b> Tensão Superficial no Controle Negativo ao Longo de 7 Dias .....	56
<b>Figura 17:</b> Variação da TS durante a aplicação do [BS]=CMC com pH=6,6 e T=30°C em soluções com diferentes condições contendo concentrações 1 ou 4% de espuma .....	58
<b>Figura 18:</b> Desvio das amostras na condição C4 durante a aplicação do [BS]=1CMC tanto em soluções com 1% quanto nas com 4% de espuma .....	59
<b>Figura 19:</b> Diferença da coloração das amostras na condição C4 sendo uma delas a amostra contaminada e a outra não, representando então o desvio amostral ocorrido durante a aplicação do [BS]=1CMC tanto em soluções com 1% quanto nas com 4% de espuma .....	60

Figura 20: Densidade óptica da aplicação do [BS]=CMC com pH=6,6 e T=30°C em diferentes condições nas soluções contendo 1 e 4% de espuma, cujos picos formados representam o desvio amostral causado pela contaminação de microrganismos. .... 61

**Figura 21:** Espectro FTIR das Amostras que continham Acetona, cuja tal, foi recuperada através do rotaevaporador ..... 62

**Figura 22:** Estrutura Química da Acetona ..... 64

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Representa as condições pré-estabelecidas da aplicação do BS na espuma.....	35
<b>Tabela 1:</b> Representa as condições pré-estabelecidas da nova aplicação do BS na espuma.....	38
<b>Tabela 3:</b> Representa os valores obtidos através da equação 3 : .....	46
<b>Tabela 4:</b> Efeito da Temperatura e do pH na Tensão Superficial ao longo dos dias.....	51

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

1:1 - Proporção (1 parte para 1 parte)

1:3 - Proporção (1 parte para 3 partes)

AE – Altura Emulsificada

AT – Altura Total

BS - Biosurfactante

C1, C2, C3, C4, CN - Condições da Aplicação (C1, C2, etc. indicam diferentes condições de teste)

C=O - Ligação Carbono=Oxigênio

C-H - Ligação Carbono-Hidrogênio

C=C - Ligação Carbono=Carbono

COOH - Grupo Carboxila (Ácido Carboxílico)

DO - Densidade Óptica

DMAE - Departamento Municipal de Águas e Esgotos

ETE - Estação de Tratamento de Esgoto

FTIR - Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier

g/L - Gramas por Litro

g/mL - Gramas por Mililitro

h - Hora

IE - Índice de Emulsificação

mN/m - MilliNewton por Metro (unidade de tensão superficial)

pH - Potencial Hidrogeniônico

RPM - Revoluções por Minuto

TA – Tensão da Amostra

VP – Valor Padrão

VR – Valor Real da Amostra

YPD - Meio de Cultura (Yeast Extract Peptone Dextrose)

°C - Graus Celsius

v/v - Volume por Volume (proporção de volume)

V1.V2 = V2.V2 - Cálculo de Diluição (equação de proporcionalidade)

UASB - Upflow Anaerobic Sludge Blanket (Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente)

## SUMÁRIO

1. Introdução.....	16
2. Objetivos.....	18
2.1. Objetivo Geral .....	18
2.2. Objetivos Específicos .....	18
3. Revisão Bibliográfica .....	19
3.1. Departamento Municipal de Água e Esgoto.....	19
3.2. Reator UASB.....	19
3.3.Vantagens x Desvantagens dos reatores UASB .....	20
3.4. Espuma x Escuma.....	21
3.5. Biorremediação.....	21
3.6. Tensoativos.....	21
3.7. Biossurfactantes.....	22
3.8. Microbiologia .....	23
3.9. <i>Rhodotorula mucilaginosa</i> .....	23
3.10. Biotecnologia e Sustentabilidade.....	24
4. Métodos Experimentais .....	25
4.1. Produção do Biossurfacante .....	25
4.2. Análise do Pré-inóculo .....	26
4.3. Índice de Emulsificação .....	27
4.4. Colapso da gota .....	27
4.5. Espalhamento da gota.....	28
4.6. Massa Seca .....	28
4.7. Tensão superficial.....	29
4.8. Concentração Micelar Crítica (CMC) e Concentração Micelar Diuída (CMD) ....	29
4.9. Teste de estabilidade – Diferentes condições ao longo dos dias .....	30
4.10. Coleta de amostra da Escuma no DMAE .....	31

4.11. Análise e caracterização do resíduo obtido do tratamento de esgoto municipal...	33
4.12. Aplicação do BS na espuma .....	34
4.13. Aplicação do BS em condições otimizadas .....	35
4.14. Extra: Recuperação da Acetona.....	36
6. Resultados e Discussão.....	38
5.1. Produção do Biossurfactante .....	38
5.2. Análise do Pré-inóculo .....	39
5.3. Índice de Emulsificação.....	41
5.4. Colapso da gota .....	45
5.5. Espalhamento da gota.....	45
5.6. Massa Seca .....	46
5.7. Tensão superficial.....	47
5.8. Concentração Micelar Crítica (CMC) e a Concentração Micelar Dinâmica (CMD) .....	48
5.9. Teste de estabilidade: Análise dos resultados em diferentes Condições ao longo dos dias.....	50
5.10. Coleta de amostra da Espuma no DMAE .....	53
5.11. Análise e caracterização do resíduo obtido do tratamento de esgoto municipal...	53
5.12. Aplicação do BS na espuma .....	55
5.13. Aplicação do BS em condições otimizadas .....	58
5.14. Extra: Recuperação da Acetona.....	61
6. Conclusão .....	65
7. Referências .....	67



## 1. Introdução

A gestão eficiente de efluentes e o tratamento de esgoto são aspectos cruciais na preservação da qualidade da água e na saúde dos ecossistemas aquáticos. Muitas estações de tratamento de esgoto têm adotado o reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*). Uma das principais vantagens desse equipamento é a sua eficiência energética, já que ele não consome eletricidade para operar, pois é um reator anaeróbico que realiza o processo através da decomposição de matéria orgânica sem a necessidade de oxigênio. Isso o torna economicamente vantajoso em comparação com outros sistemas de tratamento de esgoto que demandam energia elétrica. Mas apresenta limitações quando se trata de atender aos rigorosos padrões de lançamento, ou seja, o limite permitido de poluentes liberados durante o processo. Dessa forma, é válido dizer que o tratamento resulta em problemas como odor e formação de espuma, cuja tal se acumular na superfície do reator UASB pode prejudicar o desempenho do sistema de várias maneiras, tornando necessário encontrar uma solução inovadora (Ponte, 2016; Senoidais, [s.d.]).

A espuma está associada à formação de bolhas de ar em líquidos, podendo ser natural, como as espumas de cachoeiras, ou causada por ações humanas, como a agitação de detergentes em água. Já a espuma representa uma camada de impurezas, poluentes ou matéria orgânica em decomposição que flutua na superfície da água, sinalizando a presença de contaminantes ou problemas no processo de tratamento. A espuma compromete a eficiência dos processos de tratamento e pode representar um risco ambiental, uma vez que pode conter substâncias prejudiciais (Ponte, 2016).

Para solucionar esse problema a biorremediação pode ser aplicada no tratamento de água, pois é uma técnica que utiliza organismos vivos, como microrganismos e plantas, para remover poluentes da água. Microrganismos degradam compostos nocivos, enquanto a fitorremediação envolve plantas que absorvem contaminantes. Essa abordagem é sustentável e eficaz, já que minimiza os impactos ambientais e melhora a qualidade da água, visando segurança para o consumo ou devolução para o meio ambiente (Coelho e Teixeira, 2020).

Nesse contexto é preciso explicar a importância dos BSs, substâncias produzidas por microrganismos, incluindo a levedura *Rhodotorula mucilaginosa*, que foi extraída na Antártica, com propriedades notáveis. Essas moléculas têm a capacidade distintiva

de reduzir a tensão superficial da água, impedindo assim a formação estável de bolhas de ar na superfície. Além disso, quando a espuma já se encontra presente, os BSs têm a capacidade de romper essas bolhas, dispersando eficazmente a camada de espuma e, como resultado, melhorando de forma substancial a eficiência do processo de tratamento (Fontes, Amaral e Coelho, 2008).

Os BSs, portanto, representam uma tecnologia ecologicamente consciente e versátil, proporcionando uma abordagem sustentável e eficaz para a mitigação da formação de espuma e a resolução dos desafios ambientais nas estações de tratamento de esgoto e efluentes. Além disso, essas moléculas têm demonstrado aplicações valiosas em diversos setores industriais, consolidando-se como uma solução promissora para questões ambientais e de eficiência em escala global (Desai e Banat, 1997).

Este trabalho visa o tratamento da espuma, cuja qual é formada como resíduo durante o processo, isso é possível pelo uso de processos biotecnológicos para a produção de BSs.

## 2. Objetivos

### 2.1. Objetivo Geral

Avaliar a eficiência do BS produzido a partir da levedura *Rhodotorula mucilaginosa* realizando aplicação na espuma contida nos reatores UASB do DMAE.

### 2.2. Objetivos Específicos

São objetivos específicos do trabalho:

- Determinar a massa seca para descobrir o rendimento obtido.
- Avaliar a tensão superficial do BS previamente extraído com acetona.
- Determinar a Concentração Micelar Crítica (CMC) e a Concentração Micelar Diluída (CMD) do BS produzido.
- Testar a estabilidade do BS em diferentes condições.
- Coletar uma amostra de espuma no DMAE.
- Analisar e caracterizar a espuma.
- Aplicar o BS na espuma para determinar a eficiência.
- Recuperar e reutilizar a acetona empregada no processo.

### **3. Revisão Bibliográfica**

#### **3.1. Departamento Municipal de Água e Esgoto**

O tratamento de esgoto e a gestão eficiente de efluentes são essenciais para preservar a qualidade da água e proteger os ecossistemas aquáticos. A DMAE (Departamento Municipal de Água e Esgoto) de Uberlândia é reconhecida como uma das melhores instituições de saneamento básico do Brasil e do mundo. Seu destaque se deve ao compromisso com a eficiência operacional e à inovação tecnológica na gestão dos recursos hídricos e no tratamento de esgoto.

A DMAE combina excelência em planejamento e execução de serviços com a preservação ambiental, garantindo alta qualidade na distribuição de água potável e no tratamento de efluentes. Com uma estrutura robusta e políticas voltadas à sustentabilidade, a DMAE mantém padrões rigorosos de operação, contribuindo significativamente para a saúde pública e a conservação dos ecossistemas locais. O modelo de gestão adotado pela instituição serve de referência nacional e internacional, consolidando Uberlândia como uma cidade modelo em saneamento básico e qualidade de vida (Silva, Oliveira e Bernardes, 2018).

#### **3.2. Reator UASB**

O reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), ou Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente, é projetado para o tratamento de esgoto bruto com eficiência e simplicidade operacional. O nome "fluxo ascendente" deriva do caminho percorrido pelo esgoto dentro do reator, já que o efluente bruto entra pela parte inferior e, devido à força da gravidade, sobe através do leito de lodo, onde ocorre a ação de bactérias anaeróbicas. Essas bactérias decompõem a matéria orgânica presente no esgoto, transformando-a principalmente em biogás e substâncias menos poluentes.

Na parte superior do reator, encontra-se um separador trifásico, que tem a função de separar o biogás, o efluente tratado e os sólidos sedimentáveis. O efluente tratado, ao alcançar o topo, é conduzido para fora do reator, enquanto os sólidos sedimentáveis retornam ao leito de lodo para manter sua densidade e promover a continuidade do processo de degradação. No entanto, a espuma, por ser menos densa que a água, pode

sair junto com o efluente tratado, representando um desafio adicional no tratamento posterior.

Essa configuração otimiza o uso da gravidade, o que elimina a necessidade de equipamentos mecânicos para movimentação do esgoto, economizando energia. Por fim, o biogás gerado no processo é coletado e pode ser aproveitado como fonte de energia, contribuindo para a sustentabilidade do sistema (Pontes, 2003; Rodrigues *et al.*, 2010; Silva, Oliveira e Bernardes, 2018).

### **3.3. Vantagens x Desvantagens dos reatores UASB**

Os reatores UASB apresentam diversas vantagens que os tornam atrativos para o tratamento de efluentes em estações de tratamento de esgoto. Uma das principais é a alta eficiência energética, pois não necessitam de oxigênio para o processo, reduzindo significativamente o consumo de energia elétrica. Esse tipo de reator utiliza microrganismos anaeróbicos que decompõem a matéria orgânica, gerando biogás como subproduto, que pode ser aproveitado como fonte de energia renovável. Além disso, os reatores UASB possuem custos de operação e manutenção relativamente baixos, ocupam menos espaço em comparação a outros sistemas e apresentam boa capacidade de adaptação a diferentes condições ambientais.

Embora o reator UASB ofereça vantagens notáveis, ele enfrenta desafios operacionais significativos. Um dos principais é a formação de espuma, que ocorre devido à presença de óleos, graxas e outros materiais flutuantes no esgoto. Essa espuma pode se acumular na superfície do reator, dificultando a liberação do biogás e reduzindo a eficiência do processo. Além disso, problemas como a emissão de odores desagradáveis e o acúmulo excessivo de sólidos no lodo podem comprometer o desempenho do sistema e gerar desconforto para as comunidades próximas. Outra limitação é a eficiência limitada na remoção de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, o que muitas vezes exige etapas adicionais de tratamento para atender aos padrões de qualidade do efluente final. Dessa forma, é válido dizer que é necessário encontrar uma solução inovadora (Pontes, 2003; Rodrigues *et al.*, 2010).

### 3.4. Espuma x escuma

Para melhor entendimento é necessário distinguir adequadamente a diferença de escuma e espuma. A espuma está associada à formação de bolhas de ar em líquidos, podendo ser natural, como as espumas de cachoeiras, ou causada por ações humanas, como a agitação de detergentes em água. Já a escuma representa uma camada de impurezas, poluentes ou matéria orgânica em decomposição que flutua na superfície da água, sinalizando a presença de contaminantes ou problemas no processo de tratamento. A escuma compromete a eficiência dos processos de tratamento e pode representar um risco ambiental, uma vez que pode conter substâncias prejudiciais (Bobade *et al.*, 2022; Ponte, 2016).

### 3.5. Biorremediação

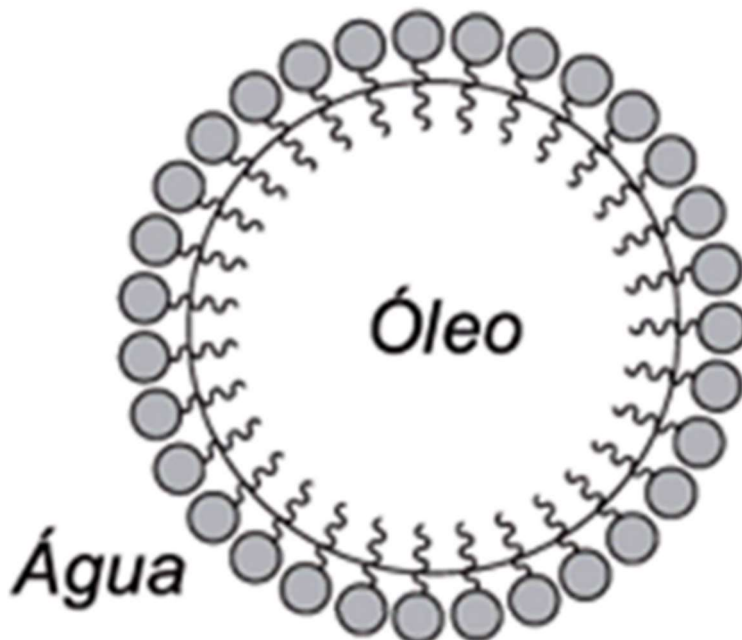
Para solucionar esse problema a biorremediação pode ser aplicada no tratamento de água, pois é uma técnica que utiliza organismos vivos, como microrganismos e plantas, para remover poluentes da água. Microrganismos degradam compostos nocivos, enquanto a fitorremediação envolve plantas que absorvem contaminantes. Essa abordagem é sustentável e eficaz, já que minimiza os impactos ambientais e melhora a qualidade da água, visando segurança para o consumo ou devolução para o meio ambiente (Coelho e Teixeira, 2020).

### 3.6. Tensoativos

A emulsificação é o processo de formar uma mistura estável entre dois líquidos imiscíveis, como óleo e água, utilizando agentes chamados surfactantes ou tensoativos. Os tensoativos possuem uma estrutura molecular com uma parte hidrofóbica, que se liga ao óleo, e uma parte hidrofílica, que se liga à água, facilitando a formação de pequenas gotículas de óleo dispersas em água, criando uma emulsão. Quando os tensoativos se acumulam em torno das gotículas de óleo, formam estruturas esféricas chamadas micelas, que mantêm as gotículas dispersas na fase aquosa, evitando que se separem. O efeito detergente ocorre quando os tensoativos, além de emulsificar, ajudam a remover sujeiras e óleos das superfícies, reduzindo a tensão superficial e permitindo que as partículas de sujeira sejam suspensas em água e facilmente removidas. Esse efeito é

amplamente utilizado em produtos de limpeza e em processos industriais (Figura 1)(Medeiros, 2017).

**Figura 1:** Representação da formação de micelas



**Fonte:** Adaptado de <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/21648/1/PRODU%C3%87%C3%83OBIOSSURFACTANTEBAIXO.pdf>

### 3.7. Biossurfactantes

Nesse contexto é preciso explicar a importância dos BSs, substâncias produzidas por microrganismos, incluindo a levedura *Rhodotorula mucilaginosa*, que foi extraída na Antártica, com propriedades notáveis. Essas moléculas têm a capacidade distintiva de reduzir a tensão superficial da água, impedindo assim a formação estável de bolhas de ar na superfície. Além disso, quando a espuma já se encontra presente, os BSs têm a capacidade de romper essas bolhas, dispersando eficazmente a camada de espuma e, como resultado, melhorando de forma substancial a eficiência do processo de tratamento (Fontes, Amaral e Coelho, 2008).

### 3.8. Microbiologia

Dessa forma, é necessário entender o que é a microbiologia, cuja tal, envolve a análise de microrganismos como bactérias, vírus, fungos e protozoários, abrangendo suas características, interações e aplicações. Os fungos, em particular, desempenham um papel crucial em diversos contextos biológicos e industriais. Eles são eucariotos (possuem núcleo delimitado por membrana e organelas internas) e podem ser unicelulares, como as leveduras, ou multicelulares, como os bolores. Na natureza, os fungos são essenciais para a decomposição de matéria orgânica, contribuindo para o ciclo de nutrientes. No campo da biotecnologia, destacam-se aplicações como a produção de antibióticos (ex.: penicilina produzida por *Penicillium*), enzimas industriais, e alimentos fermentados, como pães, queijos e bebidas alcoólicas. Além disso, fungos têm potencial para biorremediação, sendo utilizados na degradação de poluentes, como petróleo e corantes industriais (Jawetz, 2011).

### 3.9. *Rhodotorula mucilaginosa*

As leveduras são fungos unicelulares e eucariotos que desempenham papéis essenciais em processos de fermentação, biotecnologia e em ecossistemas, principalmente na decomposição de matéria orgânica. A levedura em destaque é a *Rhodotorula mucilaginosa*, um gênero de levedura que se caracteriza por sua capacidade de produzir pigmentos, como carotenoides, e por sua tolerância a condições extremas. As leveduras da Antártica, como os isolados da coleção do CPQBA/Unicamp, representam uma variedade adaptada a ambientes severos. Com 100 isolados de diferentes habitats antárticos, tanto terrestres quanto marinhos, essas leveduras têm potencial biotecnológico único, dada sua resistência a baixas temperaturas e outros estresses ambientais. Elas podem ser exploradas em processos de biorremediação, produção de enzimas, e até mesmo na geração de compostos bioativos (Duarte *et al.*, 2013).



### **3.10. Biotecnologia e Sustentabilidade**

A biotecnologia é uma área da ciência que utiliza organismos vivos, células ou seus componentes para desenvolver ou criar produtos e processos com aplicações industriais, ambientais e de saúde. No tratamento de efluentes, a biotecnologia tem se mostrado uma alternativa eficaz e sustentável, com o uso de BS como uma das suas principais inovações. BSs são compostos tensoativos produzidos por microrganismos, como bactérias, fungos e leveduras, que possuem propriedades semelhantes aos surfactantes sintéticos. Eles têm a capacidade de reduzir a tensão superficial entre líquidos imiscíveis, como óleo e água, facilitando a formação de emulsões e promovendo a remoção de poluentes oleosos. A principal vantagem dos BSs em relação aos sintéticos é que os primeiros são biodegradáveis, menos tóxicos e mais sustentáveis, tornando-os uma solução mais ecológica para o tratamento de efluentes e a biorremediação de áreas contaminadas. A biorremediação, por sua vez, é o processo em que microrganismos ou seus produtos, como os BSs, são utilizados para degradar ou remover substâncias tóxicas e poluentes do meio ambiente, contribuindo para a recuperação de ecossistemas contaminados de forma mais eficiente e ambientalmente amigável (Andrade, Augusto e Jardim, 2010; DURVAL, 2017; Malajovich, 2016).

## 4. Métodos Experimentais

### 4.1. Produção do Biossurfacante

Inicialmente preparou-se o meio de cultura utilizando YPD e ágar para realizar repicagem da levedura *Rhodotorula mucilaginosa* (Figura 2).

**Figura 2:** Fotografia da reativação da Cepa, cuja tal, representa a levedura *Rhodotorula mucilaginosa*



Fonte: Acervo Próprio.

Na produção do pré-inóculo produziu-se o meio de YPD e adicionou-se 1 colônia, encubou-se no meio líquido e agitou-se a solução 120rpm em temperatura ambiente por 24 horas. Para a fermentação, inicialmente, realizou-se a leitura da densidade óptica (DO) do pré-inóculo em 600nm no espectrofotômetro. Posteriormente, preparou-se o extrato de abacaxi e produziu-se o meio de cultivo industrial contendo extrato de abacaxi, extrato de levedura, peptona, sulfato de amônio e água destilada. Além disso, o pH foi ajustado para 8 através da adição de uma solução salina. Em seguida, inseriu-se o volume calculado pela equação 1 e inoculou no erlenmeyer contendo o meio com abacaxi. A fermentação foi conduzida no agitador em 15°C com a rotação em 120 rpm por 24 horas. Além disso, 10h após o momento Inicial foi realizado a suplementação de 1,5mL de extrato de abacaxi com o objetivo de aumentar a concentração de glicose do meio. Após esse tempo, separou-se as células de levedura do caldo fermentado através da centrifúga (Avanti Centrifuge J-25), com rotação de 8000rpm durante 20 minutos.

Em sequência da centrifugação, obteve-se os metabólitos microbianos de interesse contendo o BS, tais substâncias estavam no sobrenadante. A partir do caldo fermentado, a acetona fria foi utilizada para extrair o BS produzido, sendo adicionada às amostras na proporção 1:3 (v/v). Após a precipitação do BS, ele foi ressuspenso com água destilada.

Em sequência disso, liofilizou-se para obter um BS puro, cujo tal, apresentou um aspecto de pó. Por fim, aferiu-se a massa resultante e calculou-se o valor de concentração considerando o volume adicionado de amostra inicial. A concentração obtida foi de 10,67g/L, sendo inferior à da literatura que foi 36g/L (Sousa, De, 2016).

#### **4.2. Análise do Pré-inóculo**

A análise na levedura refere-se à etapa inicial em que as leveduras são cultivadas em condições controladas antes de serem transferidas para o cultivo principal. Desse modo, é válido mencionar que a análise de tensão superficial (TS) no pré-incóculo de leveduras avalia a capacidade do meio de cultivo de interagir com a superfície de líquidos. Essa análise pode indicar se há produção de BSs pelas leveduras e ajudar a otimizar as condições de cultivo, ajustando pH, temperatura e nutrientes.

A densidade óptica (DO), por sua vez, também pode ser chamada de absorbância ou turbidez por ser capaz de indicar a concentração de células presentes na amostra. Ela é usada para monitorar o crescimento celular, pois mede a turbidez do meio, que aumenta conforme a concentração de células viáveis já que as células dispersam a luz que passa através da amostra. Em outras palavras, quanto maior a concentração de células no meio, maior será a absorção e dispersão da luz, resultando em uma maior DO.

Para a análise de DO, o espectrofotômetro (Genesys 180) foi utilizado aplicando o comprimento de onda 600nm para a quantidade de luz absorvida ou dispersada pela amostra (Galo e Colombo, 2009).

Já para a TS utilizou-se o tensímetro K6, cujo fio de torção está ligado ao anel de medição. Esse anel foi imerso lentamente na amostra do BS livre de células previamente centrifugados e foi lentamente puxado para fora. A TS provocou uma tensão no fio, cuja deflexão é apresentada por meio de um ponteiro de arraste que apontou o valor de TS obtido (Abd El-Lateef, Abo-Riya e Tantawy, 2016).

### 4.3. Índice de Emulsificação

O índice de emulsificação é uma medida que avalia a capacidade de uma substância formar e estabilizar uma emulsão, ou seja, uma mistura estável de líquidos imiscíveis, como óleo e água. Esse índice é calculado com base no volume de emulsão formado e na sua estabilidade ao longo do tempo. Quanto maior o índice de emulsificação, maior é a capacidade do surfactante de estabilizar a emulsão, impedindo a separação dos componentes. É um indicador importante da eficiência do surfactante, especialmente em aplicações industriais e ambientais.

Para essa análise uma solução aquosa livre de células, ou seja, o sobrenadante obtido após a centrifugação do caldo fermentativo foi misturada com querosene, óleo de soja ou óleo de motor na proporção de 1:1. A mistura foi agitada vigorosamente em um vórtex por dois minutos à temperatura ambiente e, em seguida, deixada em repouso na bancada por 24 horas (Ferreira da Silva *et al.*, 2017). A taxa de emulsificação foi calculada pela equação 2:

$$IE = \frac{AE}{AT} \times 100\% \quad (2)$$

Sendo:

IE= Índice de Emulsificação

AE= Altura da Emulsificação

AT= Altura Total

### 4.4. Colapso da gota

O teste de colapso da gota é considerado qualitativo, utilizado para avaliar a eficiência de BS na redução da tensão superficial de líquidos. Esse teste ajuda a determinar a capacidade do BS de interagir com a superfície e diminuir a tensão superficial, o que é relevante para processos como emulsificação, detergência e remediação.

Sobre uma superfície lisa, adicionou-se uma pequena quantidade da solução contendo o BS (sobrenadante) antes de ser precipitado com acetona e, em seguida, uma gota de óleo de soja foi cuidadosamente depositada sobre essa solução. Caso houvesse a observação do colapso da gota isso indicaria um resultado positivo para a presença de atividade BS (Ferreira da Silva *et al.*, 2017).

#### 4.5. Espalhamento da gota

O teste de espalhamento de óleo é caracterizado como um teste qualitativo, ele foi realizado em placas de Petri contendo 10 mL de água destilada. Sobre a superfície da água, adicionou-se 1 mL de óleo de soja, seguido pela aplicação de uma gota do sobrenadante da cultura. A avaliação foi realizada visualmente: se o óleo permanecesse intacto, o resultado seria classificado como negativo; se o óleo se espalhasse, o resultado seria considerado positivo, indicando a presença de atividade BS no sobrenadante (Decaro, 2018).

#### 4.6. Massa Seca

O experimento de massa seca é uma técnica utilizada para quantificar a quantidade de material sólido presente em uma amostra, após a remoção de toda a umidade ou solventes. No contexto de BSs, o objetivo é determinar a concentração do BS presente na solução, avaliando o material precipitado ou sedimentado. Isso é feito pesando o recipiente antes e depois do processo de secagem, permitindo calcular a massa do BS de forma precisa e objetiva (Bruneel *et al.*, 2010).

Esse procedimento foi utilizado para determinar a massa seca do BS (BS) e seguiu as etapas descritas abaixo. Inicialmente, o precipitado do BS foi obtido pela adição de 155 mL de solução contendo o BS com 465 mL de acetona, visando precipitar o BS. A acetona foi utilizada para concentrar o BS, uma vez que esse solvente favorece a precipitação do produto. Após a precipitação, o BS foi ressuspensionado em 30 mL de água destilada para solubilizar o BS novamente, facilitando a análise subsequente.

A solução obtida foi dividida em 4 placas de Petri, e cada uma delas foi levada à estufa a 100°C para secagem, durante 24 horas. Após a secagem completa, o peso final de cada placa foi registrado. A massa seca foi determinada pela diferença de peso da placa de Petri antes e após a adição do precipitado, e a concentração do BS na solução foi calculada utilizando a equação 3:

$$\text{Concentração de BS} = \frac{\text{Massa Seca}}{\text{Volume ressuspensionado}}$$

A ressuspensão do precipitado em água e a secagem do material são etapas essenciais para a avaliação do rendimento e da qualidade do BS, permitindo a quantificação do produto obtido após a precipitação e purificação (Nocente *et al.*, 2019; Pagnussatt *et al.*, 2014).

#### 4.7. Tensão superficial

A tensão superficial das amostras foi determinada utilizando o método do anel de Noüy, empregando um tensiômetro modelo K6 à temperatura ambiente. Para a calibração do equipamento, foi utilizada uma solução de 5 mL de álcool etílico, cuja tensão superficial a 20°C é conhecida como 22 mN/m (Abd El-Lateef, Abo-Riya e Tantawy, 2016; Abd El-Lateef e Tantawy, 2016; Rezende, 2020).

Após a calibração, 5 mL da amostra do BS previamente extraído com acetona foi transferida para o recipiente de medição do tensiômetro. O anel metálico do tensiômetro foi cuidadosamente imerso no líquido até a posição inicial, garantindo que sua superfície estivesse limpa e sem resíduos que pudessem interferir na medição.

Durante a análise, o anel foi lentamente elevado pelo equipamento, formando uma película de líquido entre o anel e a amostra. A tensão necessária para romper essa película foi registrada automaticamente pelo tensiômetro em mN/m ou 10<sup>-3</sup>N/m de acordo com a equação 4:

$$TS = \frac{VP}{VR} \times TA (\text{mN/m}) \quad (4)$$

Sendo:

TS= Tensão Superficial

VP= Valor Padrão do álcool etílico na literatura

VR= Valor da amostra

TA= Tensão da amostra

#### 4.8. Concentração Micelar Crítica (CMC) e Concentração Micelar Diuída (CMD)

A Concentração Micelar Crítica (CMC) representa a menor concentração de surfactante em solução necessária para a formação de micelas, estruturas agregadas compostas por um núcleo hidrofóbico e uma capa hidrofílica. Abaixo da CMC, o surfactante atua apenas na redução da tensão superficial (TS) entre duas fases, como óleo e água, promovendo a formação de emulsões, espumas ou detergência. Acima da CMC, o surfactante torna-se mais eficiente na solubilização de substâncias hidrofóbicas, encapsulando-as no interior das micelas, o que é fundamental em processos de limpeza e remoção de resíduos hidrofóbicos, como óleos ou gorduras.

A Concentração Micelar Diluída (CMD) é a concentração mínima de surfactante em que a redução da tensão superficial (TS) atinge um platô, ou seja, mesmo que a concentração de BS aumente, a TS não diminui significativamente. Esse parâmetro reflete a capacidade do surfactante de dispersar ou emulsificar substâncias insolúveis, como óleos ou gorduras, em solução aquosa. A CMD é particularmente importante em sistemas complexos, como na limpeza de resíduos oleosos e em processos de biorremediação, indicando a eficiência do surfactante em solubilizar compostos hidrofóbicos. Assim, enquanto a CMC está associada à formação de micelas e à eficiência na redução inicial da TS, a CMD está mais relacionada à estabilização da emulsificação e dispersão de substâncias hidrofóbicas, sendo essencial para aplicações como o tratamento de espuma (Deepika *et al.*, 2016).

Nesse contexto, realizou uma sequência de análises através de diluições da amostra inicial. Assim, aferiu-se a tensão superficial em diferentes concentrações que foram de 200 a 0,078 g.L<sup>-1</sup>. Para isso, iniciou-se pela solução contendo 200g L<sup>-1</sup> e foi diluindo e medindo os valores das tensões obtidas em cada ponto até o valor da TS ficar constante. Depois plotou-se um gráfico para descobrir a menor concentração necessária de BS para diminuir significativamente a TS (CMC) e a menor concentração de surfactante necessária para que a redução da tensão superficial (TS) alcance um nível estável (CMD).

#### **4.9. Teste de estabilidade – Diferentes condições ao longo dos dias**

A metodologia para o teste de estabilidade do BS envolveu a preparação de soluções com a concentração de 1CMD, cujo o resultado obtido anteriormente foi de 60 g/L de BS (Dubey *et al.*, 2012). Para as análises, foi realizada a dissolução da quantidade apropriada de BS em água destilada, resultando em uma solução de 1CMD,

com concentração de 60 g/L. Cada solução foi dividida em tubos Falcon para as análises subsequentes. As amostras foram então submetidas a diferentes estresses, incluindo variação de temperatura e pH, para avaliar a estabilidade do BS ao longo dos dias (Costa *et al.*, 2014; Lange, Heberlé e Milão, 2009).

No teste de estabilidade térmica, as amostras foram submetidas a duas temperaturas distintas: 4°C, em geladeira, e 30°C, à temperatura ambiente. Para a análise da estabilidade em relação ao pH, as amostras foram ajustadas para três valores de pH distintos: 4,5, 6,6 e 8,5, utilizando soluções tampão adequadas para manter o pH constante ao longo das análises. As amostras de BS, em suas respectivas concentrações, foram submetidas aos estresses por um período de 30 dias.

Após os estresses, as medições de tensão superficial foram realizadas utilizando a metodologia (Nouy, Du, 1925). As medições foram feitas em cada uma das amostras submetidas aos estresses térmicos e de pH. Além disso, é válido dizer que a amostra mantida temperatura ambiente foi utilizada como controle já que não passou por nenhum estresse. Os resultados obtidos permitiram avaliar a estabilidade do BS em diferentes condições de temperatura e pH, além de fornecer informações sobre os efeitos das concentrações de BS sobre sua estabilidade.

#### **4.10. Coleta de amostra da Escuma no DMAE**

Para realizar a coleta da Escuma, inicialmente foi apresentado a estrutura e o funcionamento do tratamento do efluente no Departamento Municipal de Água e Esgoto. A partir disso, explicou-se uma sequência de etapas físicas, químicas e biológicas para remover sólidos, areia, matéria orgânica e outros poluentes do esgoto bruto. Desse modo ficou claro que O objetivo final é a obtenção de um efluente tratado que esteja dentro dos padrões ambientais.

Inicialmente foi apresentado as Grades Grossas e Finas que podem ser consideradas como parte do pré-tratamento. Nesse passo o esgoto bruto passa inicialmente por grades grossas, responsáveis por reter materiais volumosos como plásticos, panos, garrafas e galhos, evitando entupimentos e danos nos equipamentos. Em seguida, o esgoto atravessa grades finas, que removem resíduos menores, como folhas e pequenos detritos sólidos. O material capturado é constantemente retirado por peneiras e descartado em caçambas, sendo destinado para descarte em aterros sanitários ou incineração.



Em seguida, foi apresentada a etapa de desarenação, o esgoto passa por tanques onde ocorre a separação de materiais inorgânicos pesados, como a areia. A remoção ocorre por decantação gravitacional, uma vez que a areia, por ser mais densa, se deposita no fundo do tanque. Com isso o material sedimentado é removido através de bombas de sucção e em seguida, armazenado em caçambas para descarte. Esse processo evita o desgaste dos equipamentos e o acúmulo de materiais abrasivos nas tubulações.

Posteriormente foi mencionada a etapa de interesse do projeto que é o Reator UASB, conhecido pela eficiência no tratamento de efluentes através da digestão anaeróbia com fluxo ascendente. Após a remoção de sólidos e areia, o esgoto é conduzido ao Reator UASB. Nesse sistema, ocorre a degradação da matéria orgânica por microrganismos anaeróbicos. O efluente entra pela parte inferior do reator e flui para cima devido à diferença de pressão, criada pela produção de biogás durante a digestão anaeróbia. A maior pressão ocorre na base do reator, enquanto a parte superior apresenta uma pressão próxima à atmosférica, facilitando o fluxo ascendente. Na parte inferior do reator, forma-se o leito de lodo, composto por uma biomassa ativa de microrganismos anaeróbicos e sólidos em suspensão. Esse leito é fundamental para a degradação da matéria orgânica.

Para melhor esclarecimento foi explicado que o reator foi inoculado com lodo anaeróbico proveniente de outro reator em operação que contém os microrganismos necessários para iniciar o processo de digestão. À medida que a matéria orgânica proveniente do esgoto é decomposta, os microrganismos se multiplicam e formam uma comunidade densa e estável, reciclada continuamente com o fluxo do esgoto. Além disso, durante a digestão anaeróbia, os microrganismos metabolizam a matéria orgânica, gerando biogás (principalmente metano e dióxido de carbono), que sobe para a parte superior do reator e pode ser captado e utilizado como fonte de energia. Durante o processo, gorduras, resíduos flutuantes e materiais menos densos acumulam-se na superfície, formando-se espuma que é o material de estudo que deve ser removida para evitar bloqueios no sistema. A espuma juntamente com a água sai pela parte superior do reator para a próxima etapa de tratamento. O efluente é direcionado para os PACs (Postos de Aplicação de Coagulantes), com capacidades de vazão de 1400 L/s e 800 L/s (dados apresentados na visita). O polímero coagulante promove a aglomeração das partículas em suspensão, formando flóculos maiores e mais densos, facilitando a separação de sólidos. Em seguida o sistema conta com tubos misturadores que são responsáveis por manter o lodo em suspensão e evitar a decantação prematura antes da etapa de flotação. Esse movimento garante a uniformidade do processo e evita o

acúmulo de sólidos no fundo. Posteriormente a isso, ocorre a etapa de flotação, fazendo com que parte do efluente tratado seja bombeado para uma câmara de saturação, onde é misturado com ar comprimido fornecido por compressores. O processo gera microbolhas de ar dissolvido, que são injetadas no fundo dos tanques de flotação. Essas microbolhas aderem às partículas de lodo e sólidos suspensos, formando flocos fazendo com que subam à superfície devido à redução de densidade. Esse processo, chamado flotação, é eficiente na remoção de lodo leve e materiais flutuantes, como a espuma. A espuma, formada principalmente por gorduras, sólidos flutuantes e resíduos biológicos, é coletada da superfície dos tanques de flotação.

Por fim, esse material é direcionado para unidades de tratamento específicas ou para descarte apropriado, mas poderia ser reaproveitada como fertilizantes, na produção de biogás entre outros. Isso seria uma boa ideia para um novo projeto que visa a sustentabilidade.

Uma observação interessante foi sobre os ventiladores que possuem formato de caracóis que são instalados na superfície dos tanques para garantir que o lodo não fique parado. Eles sopram e movimentam o lodo, facilitando sua remoção de maneira contínua e uniforme. Uma segunda observação foi sobre a necessidade de remoção periódica da espuma para manter a eficiência do sistema e evitar acúmulos excessivos. Aqui está a etapa de interesse, pois o objetivo do projeto é reduzir a necessidade de desligamento dos reatores para a retirada da espuma, aumentando assim a vida útil do equipamento (Silva, Oliveira e Bernardes, 2018).

Tendo isso em vista, fomos até a parte superior do reator UASB e recolhemos uma amostra contendo aproximadamente 7 litros de espuma. A espuma foi recolhida para a realização de análises físico-químicas e para testar a aplicação do BS. Logo, essa coleta tem por finalidade promover melhorias no processo do DMAE.

#### **4.11. Análise e caracterização do resíduo obtido do tratamento de esgoto municipal**

Para a realização dessa análise é válido saber que na amostra coletada a espuma apresentou duas fases, uma contendo resíduos sólidos e outra a parte líquida. Além disso, é importante mencionar que se realizou todas as seguintes análises em temperatura ambiente. A primeira análise realizada foi a partir de um pHmetro calibrado, onde foram realizadas medições de pH tanto no sobrenadante da espuma

quanto na amostra agitada no vórtex por 2 minutos para garantir uma homogeneização completa antes da medição. Em seguida, a determinação da tensão superficial (TS) foi realizada. Para isso, foi utilizado um tensiômetro, para determinar a tensão superficial das amostras. Mediu-se a TS tanto no sobrenadante da espuma quanto na amostra agitada no vórtex. Essa determinação foi realizada para avaliar as interações superficiais do resíduo nas diferentes condições de agitação e os valores obtidos foram expressos em mN/m, ou seja, miliNewtons por metro. A densidade óptica (DO) é uma medida da intensidade de absorção de luz pela amostra, mas pode ser usada para estimar a concentração da amostra. Sabendo-se disso, realizou-se a medição da densidade óptica (DO) através do espectrofotômetro (Genesys 180). As medições de DO foram feitas tanto no sobrenadante da espuma quanto na amostra agitada no vórtex. A água foi utilizada como padrão, ou seja, o branco para as leituras. Ademais, a densidade foi medida utilizando uma amostra contendo tanto sólidos quanto líquidos (sobrenadante). A medição foi realizada com o auxílio de uma proveta. Os valores de densidade foram calculados a partir da relação entre a massa da amostra e o volume (50 mL), sendo apresentados em g/mL (Colet e Uasb, 2018; Flórez, 2016; Souza, 2006). Para avaliar o método inicialmente aferiu-se a densidade da água a partir da equação 5:

$$Densidade = \frac{massa\ (g)}{volume\ (mL)} \quad (5)$$

#### 4.12. Aplicação do BS na espuma

A espuma é um subproduto gerado em reatores de tratamento de efluentes, e seu acúmulo pode prejudicar o funcionamento do sistema, causando obstrução e comprometendo a eficiência do tratamento. No presente estudo, foi investigado o efeito do BS na espuma, com foco na alteração de suas propriedades, como a tensão superficial, e na avaliação do crescimento microbiano da levedura.

A biorremediação em Estações de Tratamento de Efluentes (ETE) é uma técnica que utiliza microrganismos, enzimas ou outros agentes biológicos para degradar ou remover poluentes presentes nas águas residuais. Essa abordagem é especialmente eficaz no tratamento de compostos orgânicos e nutrientes, como óleos, gorduras, detergentes e substâncias químicas presentes nos efluentes industriais e domésticos. Nos processos de biorremediação em ETE, microrganismos como bactérias, fungos e leveduras são empregados para decompor os poluentes, transformando-os em

substâncias menos tóxicas ou até inofensivas. Nesse caso o microrganismo utilizado para produzir o BS foi a levedura *Rhodotorula Mucilaginosa*. A utilização de BSs como este, pode potencializar a degradação de substâncias hidrofóbicas, facilitando a remoção de contaminantes mais difíceis de tratar. Essa técnica oferece uma alternativa sustentável e econômica para o tratamento de efluentes, contribuindo para a preservação dos recursos hídricos e a redução da poluição (Jacques *et al.*, 2007).

O objetivo do estudo foi avaliar os efeitos do BS na biorremediação de espuma. Os experimentos foram realizados utilizando tubos falcons nos quais foram adicionados 5 mL de solução contendo espuma em diferentes concentrações (1% e 4%), juntamente com o BS 1CMD a 60 g/L e levedura. Os frascos foram incubados a 120 rpm e 20°C durante 25 dias e as análises foram realizadas nos dias 0, 1, 5, 7, 13, 21, 25. As condições experimentais foram divididas entre controles e tratamentos específicos com o BS e a levedura. O controle consistiu apenas de espuma e meio industrial nas suas devidas concentrações. A tensão superficial das amostras foi medida no início e no final do experimento para verificar o efeito do BS na modificação das propriedades da espuma. O crescimento da levedura foi monitorado por meio da medição de absorbância ao longo do tempo, com o objetivo de verificar a evolução do número de células microbianas na espuma (Almeida *et al.*, 2021; Santos *et al.*, 2017). As condições aplicadas aos testes estão representadas na Tabela 1, é válido lembrar que realizou-se análises para 1 e 4% de espuma.

**Tabela 2:** Representa as condições pré-estabelecidas da aplicação do BS na espuma

Condições	Composição
C1	Meio Industrial + Espuma
C2	Meio Industrial + Espuma + Levedura
C3	Meio Industrial + Espuma + Levedura + BS
C4	Meio Industrial + Espuma + BS
Controle Negativo	Meio Industrial + Espuma (sem incubação)

#### 4.13. Aplicação do BS em condições otimizadas

Considerando que a aplicação anterior não foi tão eficiente uma nova aplicação foi testada. Para melhor funcionalidade foram utilizadas as condições otimizadas do BS, sendo elas, o pH=6,6 e a T=30°C. Desse modo, a solução utilizada como branco foi solução tampão contendo 0,2M de Fosfato Monopotássico combinado com o 0,2M de

Hidróxido de sódio e as outras condições estão na Tabela 2. As análises foram feitas tanto para 1% e% de espuma numa solução de 50mL ao longo dos dias. Além disso, a concentração utilizada de BS foi a CMC=20g/L, quando as micelas começaram a se formam e abaixaram significativamente a TS. Ademais além do BS foi adicionado peróxido de hidrogênio, já que algumas aplicações envolvem a oxidação para a degradação da matéria orgânica (Massai, 2016).

**Tabela 2:** Representa as condições pré-estabelecidas da nova aplicação do BS na espuma

Condições	Composição
C1	Solução Tampão + Escuma
C2	Solução Tampão+ Escuma + 10% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
C3	Solução Tampão + Escuma + 50% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
C4	Solução Tampão + Escuma + BS
C5	Solução Tampão + Escuma + 10% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + BS

#### 4.14. Extra: Recuperação da Acetona

A metodologia aplicada para a recuperação de acetona utilizada no processo de precipitação do sobrenadante foi pensada com foco na sustentabilidade do trabalho. Para precipitar as células livres, foi utilizado uma proporção de 1 parte de sobrenadante para 3 partes de acetona. No entanto, devido ao alto consumo de solvente, uma abordagem mais sustentável foi adotada: a recuperação da acetona por meio de um rotaevaporador. Após a precipitação, o sobrenadante foi separado, e o precipitado de interesse, contendo as células livres, foi reservado para as etapas subsequentes. Em seguida, a acetona utilizada no processo, juntamente com os resíduos provenientes da precipitação (como o material celular e possíveis contaminantes), foi coletada para ser rotaevaporada. O processo de rotaevaporação foi realizado a 56°C, com o objetivo de recuperar a acetona em sua forma pura, tornando-a reutilizável. Para garantir a eficácia e a pureza do solvente recuperado, o procedimento foi repetido duas vezes, assegurando maior pureza e segurança no reuso da acetona nas próximas etapas do trabalho.

Além disso, para analisar a pureza da acetona recuperada e verificar o quão eficiente foi o processo de recuperação, foi realizada uma análise de espectroscopia no infravermelho (FTIR). A espectroscopia FTIR foi utilizada para identificar os grupos funcionais presentes na acetona recuperada, comparando-os com o espectro de uma

acetona pura. A análise FTIR permitiu avaliar a presença de contaminantes e confirmar a pureza do solvente, garantindo que a acetona estivesse adequadamente recuperada e pronta para reutilização no processo (Chang *et al.*, 2009; Cheng, 2003; Jiang, Ramsay e Ramsay, 2006; Neves-Brito *et al.*, 2021).

## 5. Resultados e Discussão

### 5.1. Produção do Biossurfactante

Nessa etapa, calculou-se o volume do pré-inóculo requerido para ser utilizado no meio industrial através da equação 1:

$$C1.V1=C2.V2 \quad (1)$$

Onde:

C1 é a concentração inicial de DO do pré-inóculo (entre 0,8 e 1,2),

V1 é o volume de pré-inóculo que será adicionado,

C2 é a concentração de DO desejada no meio industrial (0,1),

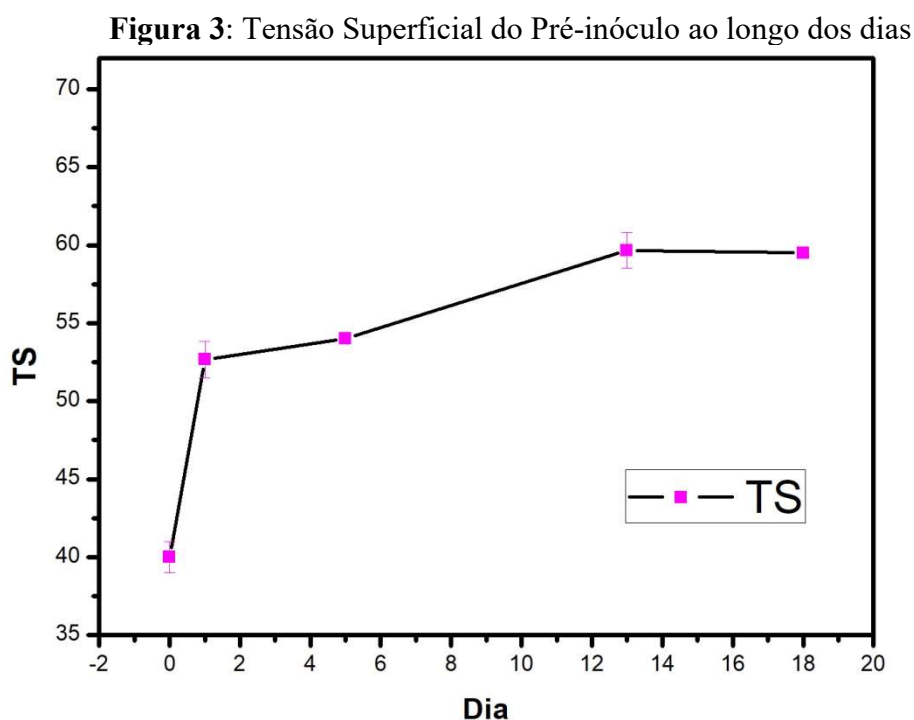
V2 é o volume total do meio industrial (150 mL).

O intervalo de DO entre 0,8 e 1,2 para o pré-inóculo garante que as células estejam na concentração ideal para um bom crescimento no meio industrial. Se o DO estiver abaixo de 0,8, pode haver poucas células para um crescimento eficiente; se estiver acima de 1,2, as células podem estar em uma concentração excessiva, prejudicando a oxigenação e o metabolismo celular. Esse intervalo ajuda a otimizar a inoculação e maximizar a produção de BSs. Por isso utilizou-se um valor de  $V1=20\text{mL}$  como volume padrão, pois mesmo com variações menores nos cálculos, foi possível garantir que o pré-inóculo atingisse a concentração muito próxima ao valor desejado no meio industrial ( $C2 = 0,1\text{g/L}$ ), mantendo a simplicidade e a precisão no processo de inoculação.

Após a liofilização, a concentração das células foi de  $10,66\text{ g/L}$ , valor consideravelmente inferior ao encontrado na literatura, que reporta uma concentração de  $36\text{ g/L}$  para condições ideais. Essa diferença pode ser atribuída a vários fatores, como a eficiência do processo de liofilização, a viabilidade celular, as condições de crescimento durante a cultura ou a precisão no método de quantificação utilizado. O valor mais baixo obtido pode indicar alguma perda de células ou uma eficiência reduzida no processo de secagem, o que não é incomum em processos de liofilização, que podem resultar em uma redução da concentração celular em comparação com os dados ideais encontrados na literatura (Sousa, 2016a).

## 5.2. Análise do Pré-inóculo

O pré-inóculo da *Rhodotorula mucilaginosa* foi avaliado com o objetivo de verificar sua viabilidade, comportamento de crescimento e influência na tensão superficial (TS) antes da aplicação nos experimentos de biorremediação. A TS foi analisada para identificar possíveis alterações relacionadas à produção de metabólitos com propriedades surfactantes (Figuras 3).



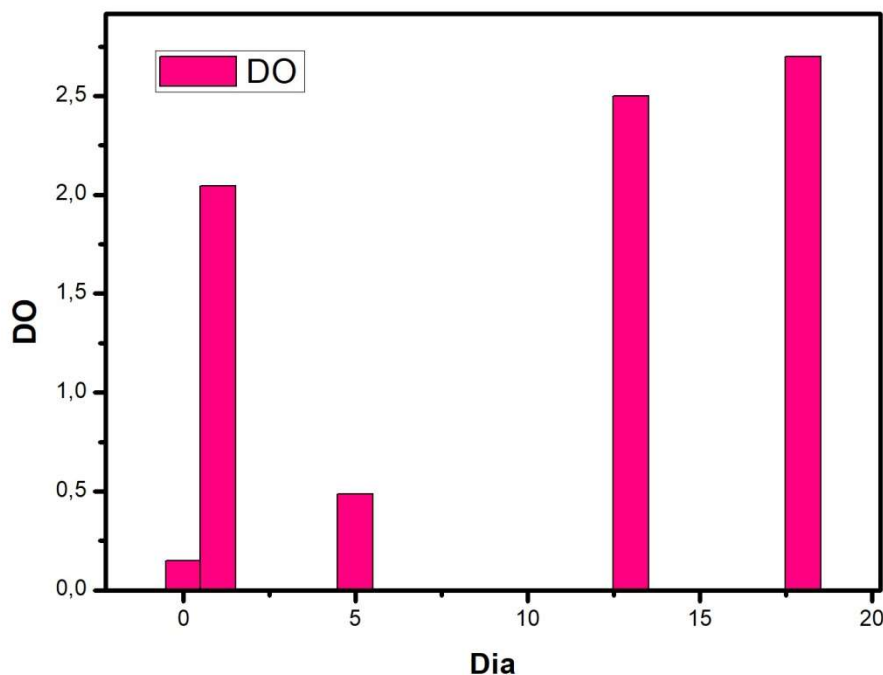
Fonte: Acervo Próprio

Com esses valores de Tensão Superficial (TS) ao longo dos dias (0, 1, 5, 13 e 18), foi possível analisar a tendência de adaptação da levedura e o comportamento da TS ao longo do tempo. No dia 0, a tensão superficial (TS) inicial foi de 40 mN/m, representando o ponto de partida antes da adaptação da *Rhodotorula mucilaginosa* ao meio. No dia 1 ao 13, a TS aumentou mostrando que a levedura estava iniciando sua adaptação. Por fim, no dia 18, a TS registrou um valor de 59,5 mN/m, similar ao observado no dia 13, referindo-se que a levedura havia estabilizado sua adaptação ao meio, mas sem apresentar produção expressiva de BS.

Já a densidade óptica foi monitorada ao longo do tempo, fornecendo informações sobre a adaptação do microrganismo ao meio de cultivo (Figura 4).



**Figura 4:** Densidade Ótica (DO) do pré-inóculo contendo o meio YPD com a levedura *Rhodoturula mucilaginosa* ao longo dos dias representado em gráfico de barras



Fonte: Próprio Acervo

A partir do gráfico é válido dizer que o dia 18 apresentou o ápice de crescimento da população de células, isso ocorreu devido a adaptação ao meio. Apesar disso, o dia 1 foi escolhido por apresentar um valor ótimo de DO já que o objetivo do experimento é viabilizar a sustentabilidade e a economia.

A partir do resultado é possível firmar que no dia 0, o valor de  $DO=0,15$  indicou uma quantidade muito baixa de células, o que é esperado, pois nesse momento o pré-inóculo ainda não foi fermentado, ou seja, as células de levedura ainda não estão se multiplicando de forma significativa. Esse período corresponde à fase lag, ou fase de adaptação, onde as células começam a se ajustar ao novo ambiente e se preparam para a multiplicação, sem mostrar crescimento visível. Já no dia 1, com um valor de  $DO=2,045$ , houve um aumento significativo, o que indicou que as células começaram a crescer e se multiplicar de forma mais acelerada, utilizando os nutrientes presentes no meio. Esse aumento sugere que a levedura entrou na fase log ou fase exponencial, onde o crescimento celular ocorre de forma rápida e contínua. Durante essa fase, as células se multiplicam em ritmo acelerado, resultando em um aumento expressivo na biomassa. Enquanto no dia 5, o valor de DO caiu para 0,485, o que representou uma desaceleração no crescimento das células. Isso pode ser causado pelo consumo dos nutrientes disponíveis ou pelo acúmulo de subprodutos tóxicos que interferiram no crescimento

das células. Esse valor indicou o início da transição para a fase estacionária, onde o crescimento desacelera e as células começam a atingir um equilíbrio entre a taxa de crescimento e a taxa de morte celular, resultando em uma estabilização na quantidade de células. Mas nos dias posteriores a este, a densidade ótica aumentou novamente, chegando a 2,5 no dia 13 e 2,7 no dia 18, sendo esse o maior valor obtido nessa análise. Esses valores indicam que o cultivo alcançou um estágio mais estável e contínuo de crescimento, com a levedura consumindo os nutrientes de maneira constante e aumentando sua biomassa. Esse aumento de DO comprova que a levedura adaptou-se ao ambiente e continuou seu crescimento apresentando um exponencial dentro da fase estacionária (Abd El-Lateef, Abo-Riya e Tantawy, 2016; Galo e Colombo, 2009).

Portanto, ao analisar os resultados, é válido dizer que o dia 18 apresentou o ápice de crescimento da população de células, o que ocorreu devido a uma adaptação das células ao meio. Apesar disso, o dia 1 foi escolhido como ponto de partida para o cultivo, pois apresentou um valor ótimo de DO, que é relevante para a sustentabilidade e a economia do processo, já que o objetivo era garantir um crescimento eficiente da levedura de forma sustentável, sendo assim, o dia 1 foi correspondente a isso.

### **5. 3. Índice de Emulsificação**

Os dados obtidos para o índice de emulsificação (IE) foram analisados com base em diferentes solventes e uma concentração padrão de BS e os resultados que foram obtidos a partir da equação 2 foram estes:

Óleo girassol = 65%

Azeite = 63%

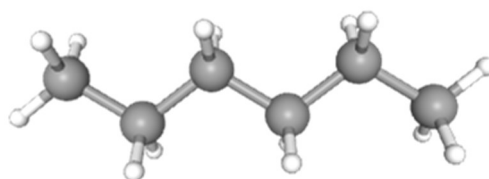
Hexano = 62%

É válido saber que quanto maior a porcentagem de emulsificação, melhor é o desempenho do BS como agente emulsificante para aquele solvente ou óleo específico. Isso indica que o BS conseguiu estabilizar a mistura testada, formando uma emulsão mais eficiente. Uma porcentagem alta sugere que o BS tem boa afinidade e capacidade

de interação com o solvente/óleo usado, mostrando que ele é eficiente na redução da tensão interfacial e estabilização da emulsão (Ferreira da Silva *et al.*, 2017).

Para entender esses valores é válido estudar a estrutura química de cada um deles. O hexano é formado uma cadeia carbônica curta, composta por átomos de carbono e hidrogênio (Figura 5).

**Figura 5:** Estrutura Química do Hexano

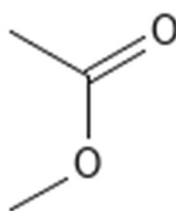


Fonte: Puchem, 2025

As ligações entre carbono e hidrogênio são simétricas, com eletronegatividade semelhante entre esses átomos, resultando em uma molécula apolar. Sendo apolar, o hexano interage principalmente com outras moléculas apolares através de forças de dispersão de London. A estrutura simples e simétrica do hexano limita a interação com a parte hidrofílica do BS, que possui características anfifílicas. Embora a parte apolar do BS interaja com a parte apolar do hexano, a interação total é menos eficaz devido à falta de complexidade na estrutura do hexano, resultando em uma emulsificação menos eficiente.

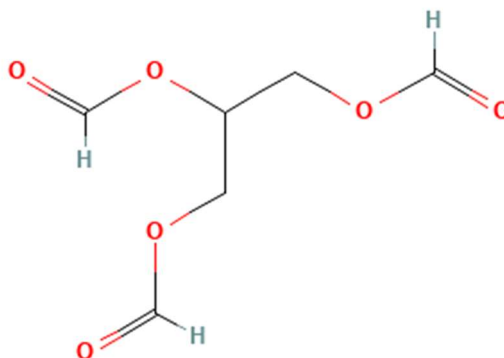
Em sequência disso, as figuras a seguir representam a estrutura do éster (Figura 6) presente no ácido graxo, cujo tal ao reagir com glicerol, forma o triglicerídeo que é a principal fonte de energia no corpo (Figura 7).

**Figura 6:** Representa a estrutura do éster



Fonte: Acervo Próprio.

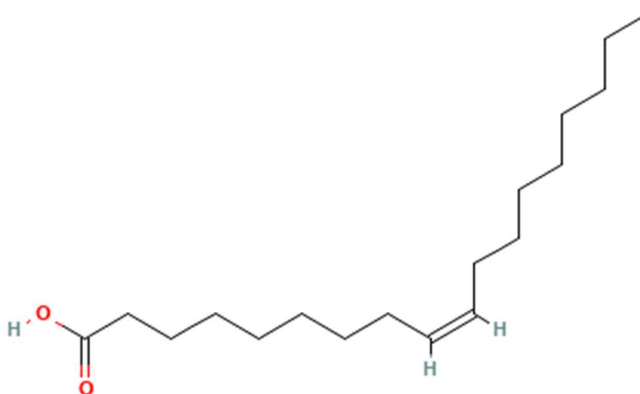
**Figura 7:** Representa formação de um triglicerídio a partir da combinação do ácido graxo com álcool.



**Fonte:** Pubchem, 2025.

A partir disso, é válido mencionar as estruturas que apresentam as principais diferenças entre o azeite e o óleo girassol, cujos tais apresentam ácidos graxos em suas estruturas. Sendo o ácido oleico ( $C_{18}H_{34}O_2$ ) presente no azeite (Figura 8).

**Figura 8:** Representa a estrutura química do Ácido Oleico.

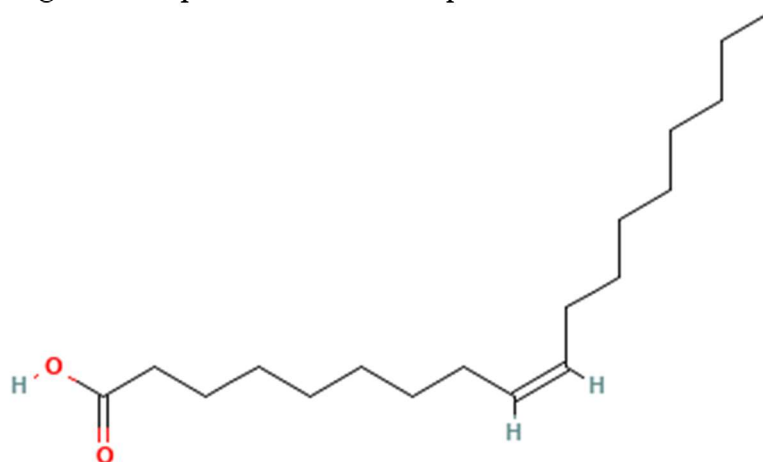


**Fonte:** Pubchem, 2025.

O azeite é rico em ácido oleico, que possui uma única dupla ligação e um grupo carboxila ( $-COOH$ ) na extremidade da cadeia de carbono. Embora o azeite seja mais polar que o hexano devido à presença do grupo carboxila, sua menor fluidez, causada pela única dupla ligação, faz com que sua interação com o BS seja mais limitada do que no óleo de girassol, mas ainda assim mais eficiente do que no hexano. O ácido oleico tem uma capacidade intermediária de formar emulsões com o BS.

Enquanto o ácido linoleico ( $C_{18}H_{32}O_2$ ) presente no óleo de girassol (Figura 9).

**Figura 9:** Representa a estrutura química do Ácido Linoleico



Fonte: Pubchem, 2025.

O óleo de girassol é rico em ácido linoleico, um ácido graxo insaturado com duas duplas ligações em sua cadeia de carbono. Embora seja em grande parte apolar, o grupo carboxila ( $-COOH$ ) na extremidade da cadeia de carbono introduz uma leve polaridade. A presença das duplas ligações e do grupo carboxila confere alguma fluidez e polaridade ao óleo, permitindo que ele interaja de forma mais eficiente com a parte hidrofílica do BS. A fluidez maior, devido às duplas ligações, facilita a interação com a parte apolar do BS, resultando em uma emulsão mais estável.

Tendo em vista as estruturas presentes em cada amostra analisada, os resultados obtidos para o índice de emulsificação (IE) com diferentes solventes e óleos revelaram importantes informações sobre a interação entre o BS e os solventes testados. A análise dos dados de emulsificação mostrou que óleos vegetais (óleo de girassol e azeite) obtiveram os melhores resultados e o hexano foi o menor. Essa ordem está diretamente relacionada à estrutura e propriedades dos solventes, que influenciam na interação com o BS.

Embora o óleo de girassol seja composto em sua maior parte por triglicerídeos, que possuem grupos ésteres e carboxila, conferindo uma certa polaridade à sua estrutura, a presença de duplas ligações nos ácidos graxos faz com que ele seja relativamente mais fluído e com maior capacidade de interação com o BS. A parte polar do BS interage com os grupos funcionais polares no óleo, enquanto a parte apolar se associa com a parte hidrofóbica do óleo. Essa combinação de polaridade e apolaridade proporciona uma emulsificação eficaz.

O azeite, rico em ácido oleico, apresentou resultados semelhantes ao óleo de girassol, com uma emulsificação boa. O ácido oleico, com uma única dupla ligação, torna o azeite menos fluido do que o óleo de girassol, o que pode explicar sua capacidade ligeiramente inferior de formar emulsões estáveis com o BS. Embora o azeite tenha grupos ésteres e carboxila, como o óleo de girassol, sua menor fluidez pode limitar a interação eficiente com o BS, resultando em emulsões um pouco menos estáveis.

O hexano, um solvente apolar de cadeia curta e não ramificada, apresentou o menor índice de emulsificação. Sua estrutura simples e rígida, sem ramificações, limita significativamente suas interações com o BS. Embora o hexano seja apolar, sua estrutura não flexível não permite uma interação eficiente com a parte apolar do BS. Como o hexano não possui grupos funcionais polares, sua capacidade de formar emulsões é muito limitada, resultando em um índice de emulsificação significativamente mais baixo em comparação com os óleos minerais e vegetais.

Esses resultados sugerem que o BS deve ter uma estrutura anfifílica, com uma parte apolar longa para interagir de maneira ideal com solventes apolares de cadeia longa e uma parte polar para garantir a estabilidade da emulsão.

#### **5.4. Colapso da gota**

Para a análise do colapso da gota, foram utilizadas placas de Petri, nas quais foi adicionado o sobrenadante da cultura da levedura, seguido de uma gota de óleo de soja. Os resultados foram positivos para a produção de BS, pois ocorreu o colapso da gota de óleo. Esse fenômeno indicou a presença de BSs capazes de reduzir a tensão superficial entre a gota de óleo e o sobrenadante, permitindo que a gota se dispersasse. Os testes foram realizados em duplicatas para garantir a precisão dos resultados (Bodour e Miller-Maier, 1998).

#### **5.5. Espalhamento da gota**

Inicialmente, 10 mL de água destilada foram adicionados em placas de Petri, seguidos de 1 mL de óleo de soja. Uma gota do sobrenadante da cultura foi então depositada sobre a superfície do óleo. Nos testes realizados, o resultado foi considerado positivo quando a gota de sobrenadante causava a dispersão do óleo, indicando a

presença de BS, que reduz a tensão superficial e permite o espalhamento do óleo. Caso o óleo mantivesse sua forma, o teste seria classificado como negativo. No experimento realizado, a observação do óleo se espalhando na presença do sobrenadante confirmou a produção de BS pela cultura, resultando em um teste positivo (Rocha e Silva *et al.*, 2014).

## 5.6. Massa Seca

A análise da massa seca foi realizada para avaliar a eficiência da produção de BS. Ao comparar a massa seca obtida com o volume inicial do cultivo, foi possível calcular a produtividade do BS, expressa em g/L. Além disso, a massa seca também foi utilizada para verificar a qualidade do BS produzido, já que a presença de impurezas, como resíduos de meio ou células, pode interferir na pureza do produto. A avaliação da massa seca permitiu, ainda, avaliar o crescimento celular ao longo do processo de produção, proporcionando uma visão mais detalhada da dinâmica do cultivo. A determinação precisa da massa seca foi essencial para otimizar o processo de produção do BS, facilitando ajustes no meio de cultivo e nas condições operacionais para maximizar a eficiência do processo. A avaliação da massa seca, portanto, foi fundamental para entender tanto a quantidade quanto a qualidade do BS produzido no processo.

**Tabela 2:** Representa os valores obtidos através da equação 3:

Amostras	[BS]
1	0,042
2	0,044
3	0,044
4	0,043

Os resultados obtidos para a concentração de BS nas amostras apresentaram valores próximos. Esses valores indicam uma produção estável de BS, com pequenas variações entre as amostras.

No geral, a faixa de concentração de 0,042 a 0,044 g/L pode ser considerada baixa comparada ao valor da literatura que foi de 2,13g/L. A avaliação dessa

concentração também deve levar em conta outros fatores, como a cepa, ou seja, uma linhagem específica da *Rhodothurula mucilaginosa* com características particulares. Entre as condições do meio de cultivo que apresentava variações, houve o tempo de fermentação e as características do substrato empregado. Embora a produção tenha ocorrido de forma estável, se o objetivo for otimizar a produção de BS, pode ser necessário ajustar o processo de fermentação ou explorar diferentes condições experimentais para alcançar concentrações mais altas. Para facilitar o estudo nos próximos experimentos foi utilizado o BS em pó obtido através do liofilizador (Sousa, 2016b).

### 5.7. Tensão superficial

A análise da TS do BS mostrou um comportamento inesperado durante o processo de precipitação e ressuspensão. Inicialmente, o sobrenadante apresentou uma TS de 45 mN/m. No entanto, ao ser precipitado em acetona e posteriormente ressuspensionado em água, a TS aumentou para 55 mN/m. Esse aumento pode ser explicado por vários fatores que influenciaram a eficácia do BS após a purificação.

Primeiramente, é possível que algumas impurezas não tenham sido completamente removidas durante a precipitação com acetona. Impurezas residuais, como proteínas ou outros componentes não tensoativos, podem ter permanecido no BS, afetando sua capacidade de reduzir a tensão superficial. Essas impurezas podem ter interferido na interação das moléculas de BS com a interface da água, resultando em um aumento na TS.

Além disso, o processo de precipitação e ressuspensão pode ter levado à formação de agregados ou micelas maiores do BS. Esses agregados podem ter dificultado a ação do BS sobre a interface de água, já que moléculas individuais ou agregados menores de BS seriam mais eficientes na redução da TS. A formação de grandes estruturas agregadas pode ter diminuído a atividade tensoativa do BS, o que explicaria o aumento observado na TS.

Outro fator a ser considerado é a concentração final de BS no sobrenadante ressuspensionado. Embora o processo de precipitação em acetona tenha teoricamente purificado o BS, a concentração de BS após ressuspensão em água pode não ter sido suficiente para reduzir significativamente a TS. Isso pode indicar que, apesar da



purificação, a quantidade de BS disponível para atuar na interface água-ar foi menor do que o ideal, impactando negativamente a redução da tensão superficial.

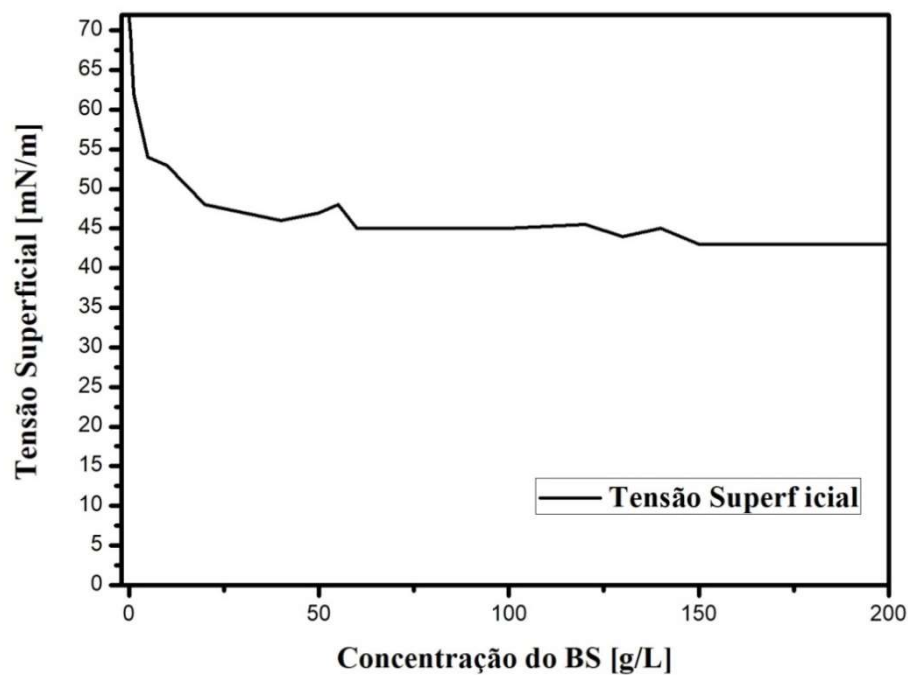
Por fim, é importante considerar que o BS pode ter sofrido mudanças nas suas propriedades físico-químicas durante o processo de precipitação e ressuspensão. Alterações na conformação das moléculas de BS ou na sua solubilidade podem ter interferido na sua eficácia, resultando em uma TS mais alta após a ressuspensão em água. Mudanças nas interações entre as moléculas de BS e a água também podem ter contribuído para o aumento observado na TS (Mendonça, De, Raetano e Mendonça, De, 2007).

Portanto, o aumento da tensão superficial após o processo de precipitação e ressuspensão sugere que, apesar de o BS ter sido purificado, outros fatores, como impurezas residuais, agregação de moléculas ou uma concentração subótima do BS, podem ter interferido em sua eficiência. Esses resultados indicam a necessidade de otimizar o processo de purificação para garantir que o BS seja mais eficiente na redução da tensão superficial, com impactos diretos na eficácia do tratamento da escuma.

### **5.8. Concentração Micelar Crítica (CMC) e a Concentração Micelar Dinâmica (CMD)**

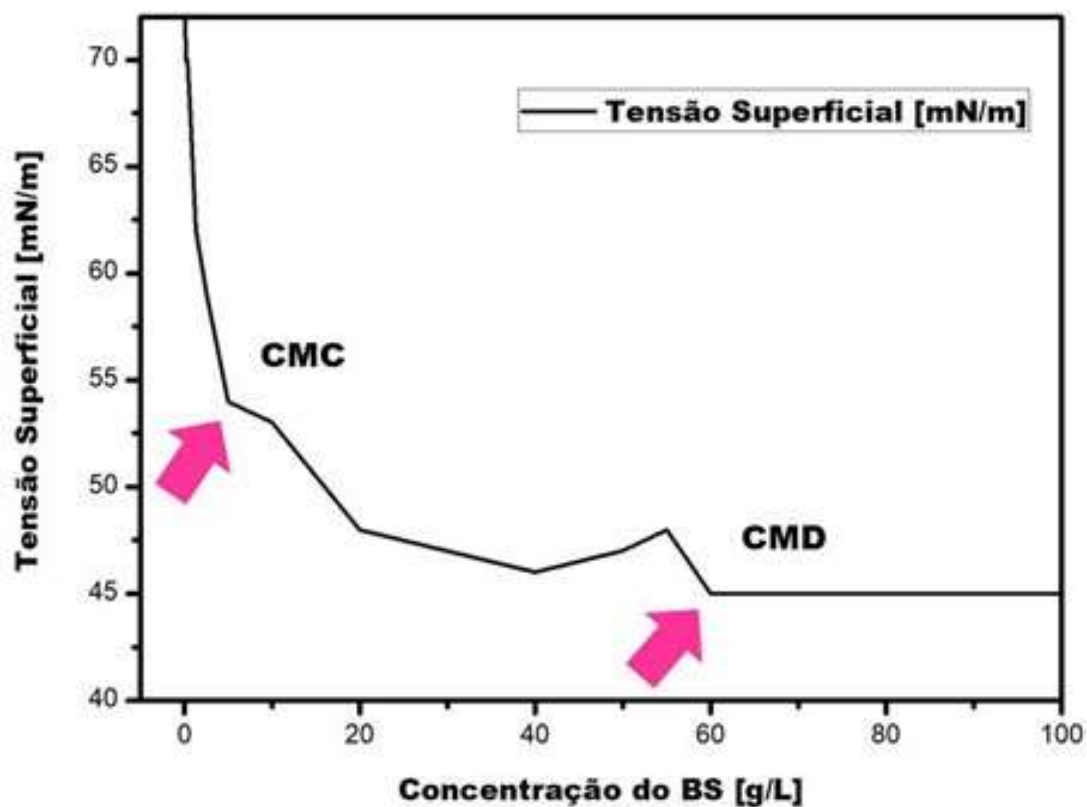
Foram realizadas medições para determinar a Concentração Micelar Crítica (CMC) e a Concentração Micelar Dinâmica (CMD) do BS. A CMC foi determinada para identificar a concentração mínima em que ocorre a formação de micelas, enquanto a CMD foi medida para avaliar a estabilidade dinâmica do BS. Os resultados obtidos fornecem informações importantes sobre a eficácia e as possíveis aplicações do BS, especialmente em processos como a remediação. A seguir, apresenta-se a Figura 10 que aponta a curva da tensão superficial em diferentes concentrações e a Figura 11 que apresenta os pontos críticos da curva.

**Figura 10:** Representa a variação da TS de acordo com aumento da [BS].



Fonte: Acervo Próprio.

**Figura 11:** Representa os pontos de CMC e CMD referentes s diluições do BS produzido.



Fonte: Acervo Próprio.

O gráfico indicou a variação da TS em relação a concentração do BS na solução. À medida que a concentração aumentou de 0,078 g/L até 200 g/L, a tensão superficial diminuiu de 72 para 43 mN/m, até que atingiu um ponto de estabilização. Esse comportamento indicou que, quanto maior foi a concentração, menor foi a tensão superficial até um limite, após o qual a mudança na tensão superficial não foi mais tão significativa. Isso é típico do comportamento de surfactantes, que, após atingir uma determinada concentração crítica, saturam a superfície e não podem reduzir ainda mais a tensão.

Sabendo-se disso, a partir dos dados foi possível determinar os pontos críticos da curva. Um desses foi a concentração micelar crítica (CMC), cuja tal, indicou a concentração mínima de surfactante necessária para que as micelas começassem a se formar e a reduzir significativamente a tensão superficial. Antes da CMC, a tensão superficial diminui de forma mais gradual, mas a partir da CMC, essa diminuição se torna mais acentuada, pois o surfactante começa a formar micelas e a reduzir ainda mais a tensão superficial.

A Concentração Micelar Crítica foi em 5 g/L, a partir desse ponto, a queda da tensão superficial desacelerou significativamente, indicando que as micelas começaram a se formar, esse valor foi próximo ao da literatura, cujo tal, apresentou o valor de 2g/L, ou seja, ambos iniciaram a formação de micelas com concentrações semelhantes. Enquanto a Concentração Micelar Diluída (CMD) é a concentração em que o aumento adicional de surfactante não resulta em uma diminuição significativa da tensão superficial. Ou seja, é o ponto onde a tensão superficial começa a se estabilizar, e adicionar mais surfactante não traz mais benefícios na redução da tensão. A partir de 60 g/L, a tensão superficial estabilizou-se e não diminuiu mais significativamente, independentemente do aumento da concentração, assim como ocorreu na literatura. (Mulligan, Yong e Gibbs, 2001; Rocha e Silva *et al.*, 2014).

### **5.9. Teste de estabilidade: Análise dos resultados em diferentes Condições ao longo dos dias**

A Tabela 3 e a Figura 12 apresentam os resultados do efeito da variação da temperatura (4°C e 30°C) e do pH (4,5; 6,6; e 8,6) sobre a tensão superficial (TS) ao longo de 30 dias de análise. Os dados foram coletados em diferentes intervalos de tempo. É válido mencionar que o dia 1 na Tabela 3 foi considerado como tempo 0. O

gráfico subsequente ilustra a variação desses parâmetros ao longo do período experimental.

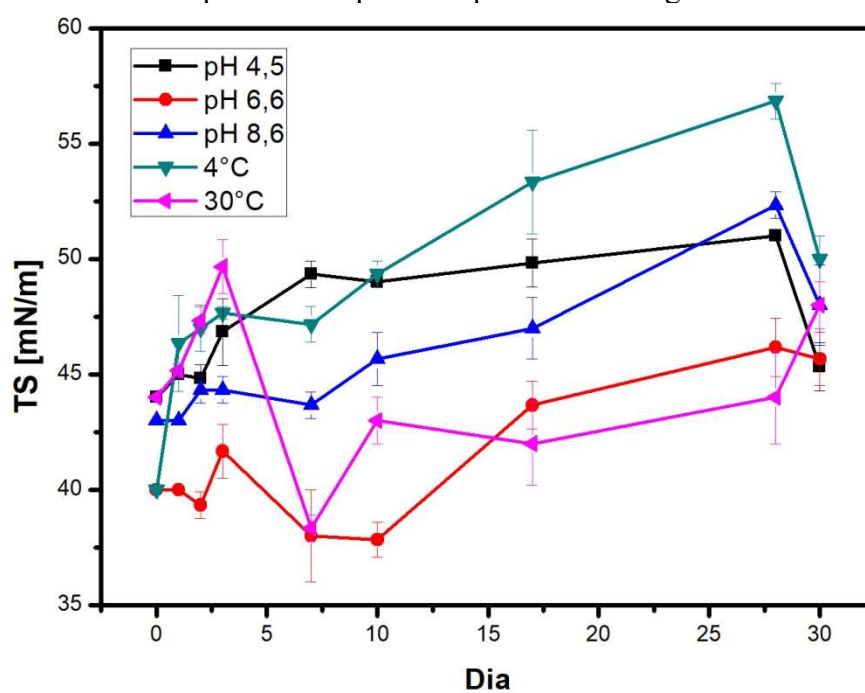
**Tabela 3:** Efeito da Temperatura e do pH na Tensão Superficial ao longo dos dias

Dia	4°C	30°C	pH 4,5	pH 6,6	pH 8,6
1	40	44	44	40	43
2	44	45,5	45	40	43
3	47	47	44,5	39	44
4	47,5	49	47	42	44
7	47	38	49	38	44
10	49	43	49	38	46
17	53,5	42	50	43,5	47
28	57	44	51	46	52
30	50	48	45	46	48

Fonte: Próprio Acervo

Considerou-se o dia 1 como tempo 0, dia 2 após 24h e assim sucessivamente. Os valores mencionados na tabela são referentes a média da avaliação em triplicata.

**Figura 12:** Teste de Estabilidade do [BS]=1CMD em diferentes condições físico-químicas de pH e temperatura ao longo dos dias.



Fonte: Acervo Próprio.

A partir dos dados obtidos, foi possível observar que a temperatura e o pH influenciaram a TS das amostras de forma distinta. Para a temperatura, a TS aumentou com o passar dos dias, especialmente para a amostra mantida a 4°C, que apresentou uma tendência crescente, atingindo 57mN/m no dia 28. Em contraste, a amostra a 30°C, considerada como controle, apresentou uma variação mais suave e menos pronunciada, atingindo 48 no dia 30. Esses resultados sugerem que a estabilidade do BS em 30°C foi mais favorável, mantendo a TS em níveis mais baixos, o que é desejável para a estabilidade do BS.

Em relação ao pH, foi observada uma tendência de aumento da TS para pH 4,5, especialmente após o dia 4, com o pico atingido no dia 28 (TS de 51). Já as amostras com pH 6,6 e 8,6 apresentaram flutuações menores, com valores mais constantes ao longo dos dias. Esses achados indicam que o pH ácido (4,5) favorece um aumento na TS, o que não é ideal, uma vez que, para BS, quanto menor a TS, maior é a sua eficiência. Por outro lado, as condições de pH mais neutro e básico (6,6 e 8,6) resultaram em maior estabilidade, com variações menos intensas na TS.

Os melhores desempenho foram observados na amostra mantida a 30°C e na amostra com pH 6,6, ambas no dia 8 apresentaram a TS=38mN/m, sendo estes os menores picos de TS. Este valor é considerado o mais estável ao longo do experimento, o que indica que, para otimizar a estabilidade do BS, condições de temperatura ambiente (30°C) e pH neutro são preferíveis.

Esses resultados demonstram que tanto a temperatura quanto o pH afetam significativamente a TS do BS, sendo as condições de temperatura ambiente (30°C) e pH neutro as mais favoráveis para manter a estabilidade do BS. Isso sugere que, para otimizar a eficácia do BS, condições mais amenas, em termos de temperatura e pH, são preferíveis, mantendo a TS em níveis mais baixos e estáveis ao longo do tempo. Logo, pode-se considerar esses resultados como condições vantajosas para o objetivo do projeto, pois permitem a redução da TS sem a necessidade de utilizar soluções tampões e sem a regulação e monitoramento de temperatura, o que contribui para a sustentabilidade do processo, ao minimizar o uso de produtos químicos e reduzir a complexidade do controle de condições experimentais (Lange, Heberlé e Milão, 2009; Nouy, Du, 1925).

### 5.10. Coleta de amostra da Escuma no DMAE

A coleta da espuma foi realizada diretamente do reator UASB, conforme ilustrado na Figura 13. A espuma, formada durante o tratamento anaeróbio, foi retirada manualmente utilizando ferramentas adequadas para facilitar. Esse procedimento permitiu a obtenção de uma amostra representativa do material acumulado na superfície do reator.

**Figura 13:** Coleta da amostra de espuma na superfície do reator UASB contido no DMAE



Fonte: Acervo pessoal (2024).

A formação da espuma está diretamente relacionada à geração de biogás e à presença de sólidos suspensos leves que aderem às bolhas, levando-os à superfície. A coleta eficiente da espuma é essencial para evitar obstruções e minimizar a necessidade de desligamento do reator para limpeza, contribuindo para o aumento da vida útil do sistema e a eficiência do tratamento.

Além disso, a caracterização da espuma obtida possibilita compreender suas propriedades físico-químicas, fundamentais para determinar alternativas sustentáveis de tratamento ou reaproveitamento (Colet e Uasb, 2018).

### 5.11. Análise e caracterização do resíduo obtido do tratamento de esgoto municipal

A análise do pH do sobrenadante e da amostra agitada revelou valores de 5,5 e 6, respectivamente. O pH ligeiramente mais ácido do sobrenadante pode ser atribuído à presença de compostos orgânicos que influenciam a acidez do efluente, o que é

esperado em sistemas de tratamento de esgoto devido à decomposição de matéria orgânica. O aumento no pH da amostra agitada pode ser resultado da maior interação dos componentes presentes, promovida pela agitação no vórtex, que pode ter favorecido a neutralização parcial de substâncias ácidas. Esse comportamento sugere que a agitação não afeta drasticamente a acidez do sistema, mas pode ter uma influência sutil na estabilização do pH.

A determinação da Tensão Superficial (TS) nas amostras mostrou valores de 45 mN/m para o sobrenadante e 40 mN/m para a amostra agitada. A Tensão Superficial mais alta observada no sobrenadante pode ser indicativa de maior presença de substâncias solúveis ou finas partículas suspensas que aumentam a interação entre a superfície do líquido e as moléculas de água. Já a diminuição da TS na amostra agitada pode refletir uma maior dispersão das partículas e uma possível redução na formação de bolhas ou formação de flocos devido à agitação. Esses resultados indicam que a agitação ajudou a reduzir a tensão superficial do sistema, promovendo uma maior homogeneização do material, mas sem eliminar a presença de substâncias que favorecem a formação de flocos.

Enquanto na Densidade Óptica (DO), os valores obtidos foram de 2,8 para o sobrenadante e 4 para a amostra agitada. A maior Densidade Óptica na amostra agitada sugere que a agitação no vórtex aumentou a concentração de substâncias presentes na amostra, o que foi evidenciado pelo maior valor de DO. A DO está correlacionada com a concentração de sólidos e outras substâncias em suspensão que podem absorver luz, e o aumento deste valor após a agitação pode indicar uma maior concentração de compostos orgânicos ou sólidos no efluente, evidenciando-se assim que a matéria orgânica se concentra na fase sólida da amostra.

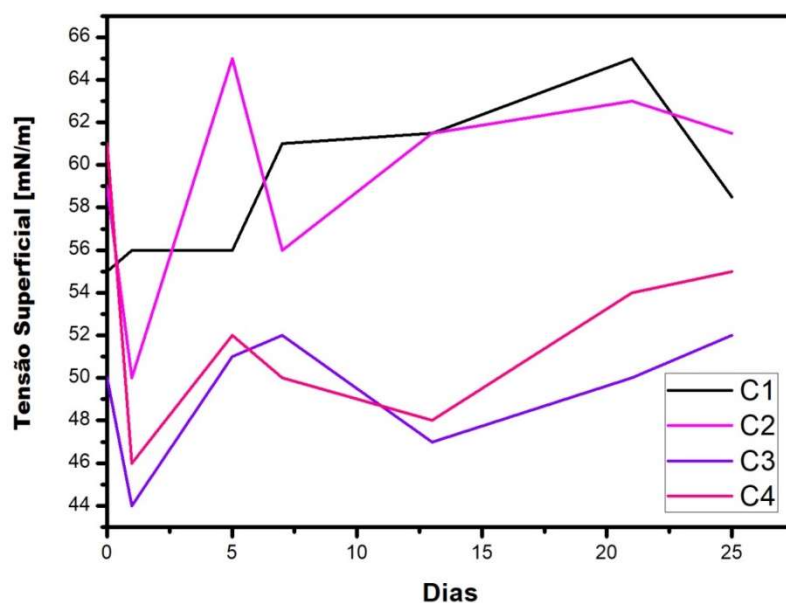
Na análise de densidade iniciou-se aferindo o resultado da água, cujo tal foi de acordo com a literatura (Oliveira, 2022). Os resultados mostram uma variação muito pequena entre as amostras, com a densidade variando de 0,984 g/mL a 0,992 g/mL. A maior densidade foi observada na terceira medição, que contém uma quantidade maior de lodo, como esperado, já que o lodo é mais denso do que a água. Essa ligeira diferença nas medições pode ser atribuída à quantidade variável de lodo presente em cada amostra. A média das três medições de densidade foi de 0,987 g/mL. Essa média sugere que, apesar da pequena variação entre os valores, a densidade das amostras de espuma analisadas é relativamente constante, o que pode indicar uma composição homogênea da espuma no geral, com uma leve tendência ao aumento da densidade conforme a concentração de lodo aumenta. Esses resultados indicam que o lodo

presente na espuma é um componente mais denso, o que pode ter implicações no tratamento de efluentes, influenciando aspectos como a separação e a floculação, além de sugerir que o lodo tem um impacto significativo na densidade geral da espuma.

### 5.12. Aplicação do BS na espuma

A aplicação de BS, como o produzido pela levedura *Rhodotorula mucilaginosa*, tem mostrado grande potencial na biorremediação de compostos hidrofóbicos presentes em espuma, devido à sua capacidade de modificar as propriedades físicas da substância e facilitar a remoção de contaminantes. No presente estudo, foi investigado o efeito do BS na espuma, com foco na alteração de suas propriedades, como a tensão superficial, e na avaliação do crescimento microbiano da levedura. Os experimentos foram realizados com diferentes concentrações de espuma, sendo 1% e 4%, e os resultados foram analisados ao longo de um período de 25 dias como representado na Figura 14. As medições de tensão superficial e absorbância foram monitoradas para verificar o progresso da biorremediação (Andrade, Augusto e Jardim, 2010; Pereira, 2007)

**Figura 14:** Variação da Tensão Superficial durante a aplicação do BS em soluções contendo 1% de espuma em diferentes condições ao Longo de 25 Dias

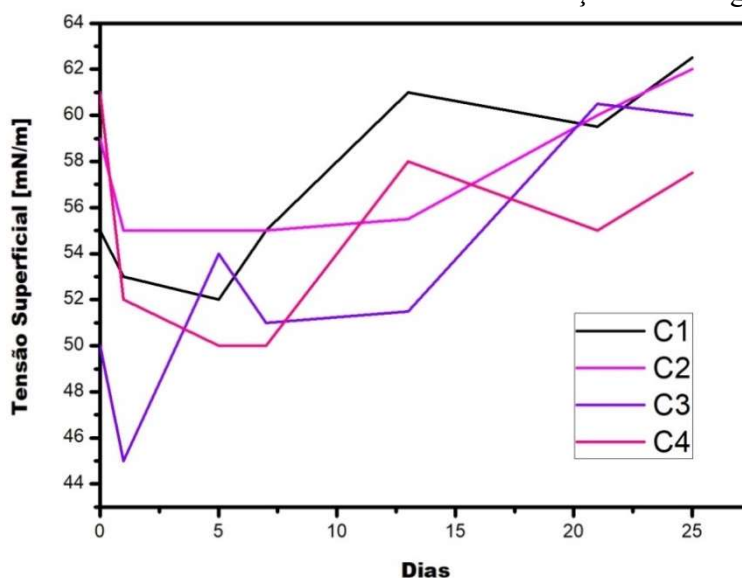


Fonte: Acervo Próprio

Isso foi realizado para as amostras contendo 4% de espuma (Figura 15).



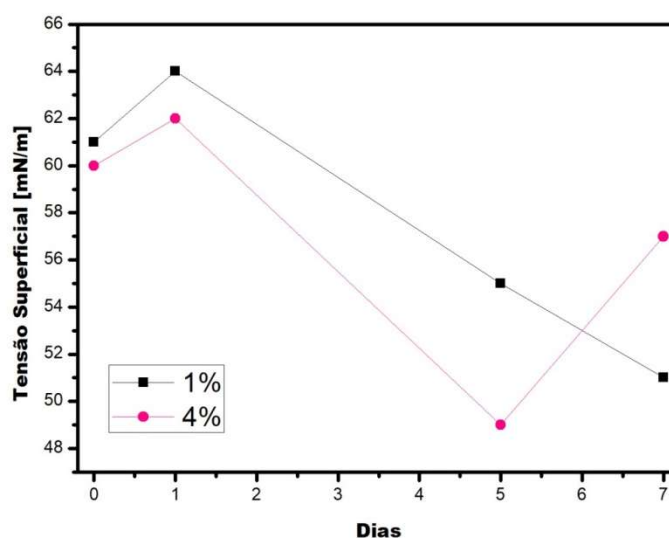
**Figura 15:** Variação da Tensão Superficial durante a aplicação do BS em soluções contendo 4% de espuma em diferentes condições ao Longo de 25 Dias



Fonte: Acervo Próprio

Já a análise da tensão superficial no controle negativo ao longo de 7 dias foi realizada para estabelecer uma referência e compreender o comportamento natural da espuma em condições sem interferência de BSs ou fermentação. Esse controle permite verificar se houve mudanças na tensão superficial decorrentes apenas do tempo ou de fatores externos, garantindo que os efeitos observados nos tratamentos sejam atribuídos exclusivamente às condições experimentais aplicadas, como o uso de BS e leveduras (Figura 16).

**Figura 16:** Tensão Superficial no Controle Negativo ao Longo de 7 Dias



Fonte: Acervo Próprio

Tendo em vista os dados obtidos, é válido afirmar que a queda e subsequente aumento na TS observada no controle negativo, mesmo sem a adição de BS ou levedura, pode ser explicada por alterações nas propriedades da espuma ao longo do tempo devido à interação com o meio industrial. A espuma, sendo um material hidrofóbico, pode ter sua estrutura alterada pela interação com os componentes do meio, como o extrato de abacaxi, a peptona e outros nutrientes. Inicialmente, a espuma foi dispersando-se parcialmente, resultando em uma leve diminuição na TS. No entanto, com o tempo, a espuma pode ter começado a reestruturar-se ou estabilizar-se, o que causou o aumento da TS nas amostras. A variação observada na TS, tanto para as concentrações de 1% quanto de 4%, reflete esse processo dinâmico de rearranjo e estabilização das moléculas da espuma, sem a presença de agentes modificadores como o BS ou a levedura.

Nas amostras de C1, onde a espuma foi apenas misturada com o meio industrial, os resultados mostraram uma leve alteração na TS ao longo do tempo, tanto para a concentração de 1% quanto para a de 4%. Nas amostras da condição C2, onde a levedura foi adicionada ao meio industrial com espuma, a TS também não apresentou uma diminuição significativa.

Já na condição C3, onde foi adicionado o BS junto com a levedura no meio industrial com espuma, observou-se uma redução significativa na TS. Esse efeito foi especialmente notável nas amostras de espuma a 1%. A TS inicial foi de 50 mN/m, caiu para 44 mN/m no primeiro dia, o ponto mais baixo, e subiu para 61,5 mN/m no dia 25. Para a espuma a 4%, a TS foi de 51 mN/m no início e estabilizou em 57 mN/m no final do experimento. Esses resultados confirmam a eficácia do BS combinado com a levedura, que favoreceu a redução da tensão superficial. O aumento da TS no final pode ser explicado pela interação do BS e da espuma com o meio industrial, o que pode ter levado a uma estabilização das interações e a um aumento da TS após a redução inicial.

Por fim, na condição C4, onde apenas o BS foi adicionado ao meio industrial com a espuma 1%, a TS apresentou variações significativas, já que começou em 61 mN/m e caiu para 48 mN/m no dia 21 e voltou a subir nos dias seguintes, alcançando 58 mN/m no final. Para a concentração de 4%, a TS variou entre 44 e 58 mN/m ao longo do experimento, indicando que o BS teve um efeito considerável na redução da TS, mas sem alcançar uma redução estável.

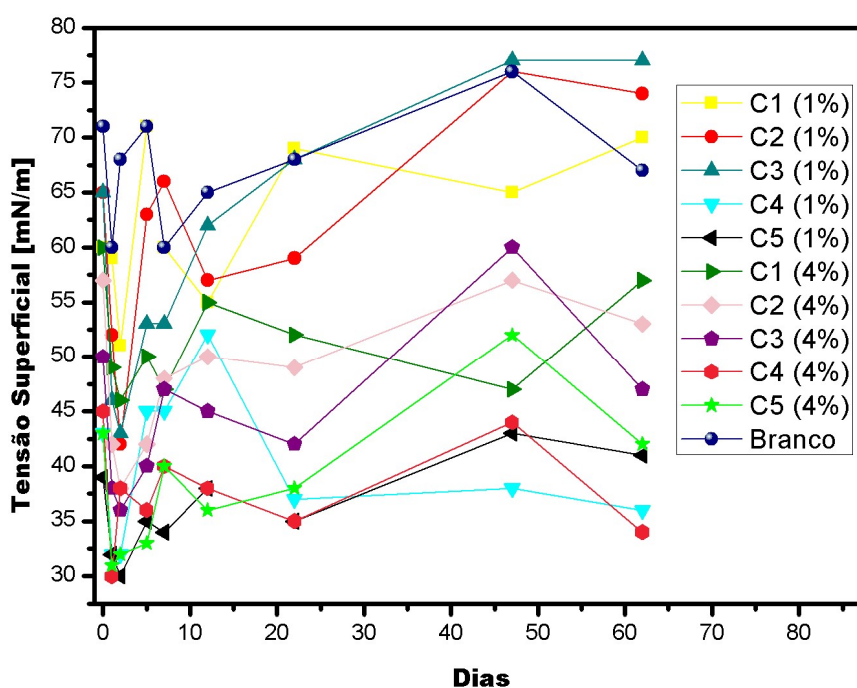
Em conclusão, a presença do BS foi fundamental para a redução da TS da espuma, especialmente quando combinado com a levedura. Esse tratamento mostrou ser o mais eficiente na modificação das propriedades da espuma, facilitando sua remoção e

degradação, embora a estabilidade do efeito diminua com o tempo. A levedura, por sua vez, não foi capaz de promover mudanças tão significativas nas propriedades da espuma sem a presença do BS. Logo, mais investigações serão necessárias para compreender completamente sua estabilidade e eficácia no longo prazo (Pereira, 2007).

### 5.13. Aplicação do BS em condições otimizadas

Os valores de tensão superficial (TS) ao longo dos dias mostraram variações importantes entre as condições testadas com diferentes concentrações de espuma (1% e 4%) ao longo dos 62 dias de análises (Figura 17).

**Figura 17:** Variação da TS durante a aplicação do [BS]= 4 CMC com pH=6,6 e T=30°C em soluções com diferentes condições contendo concentrações 1 ou 4% de espuma



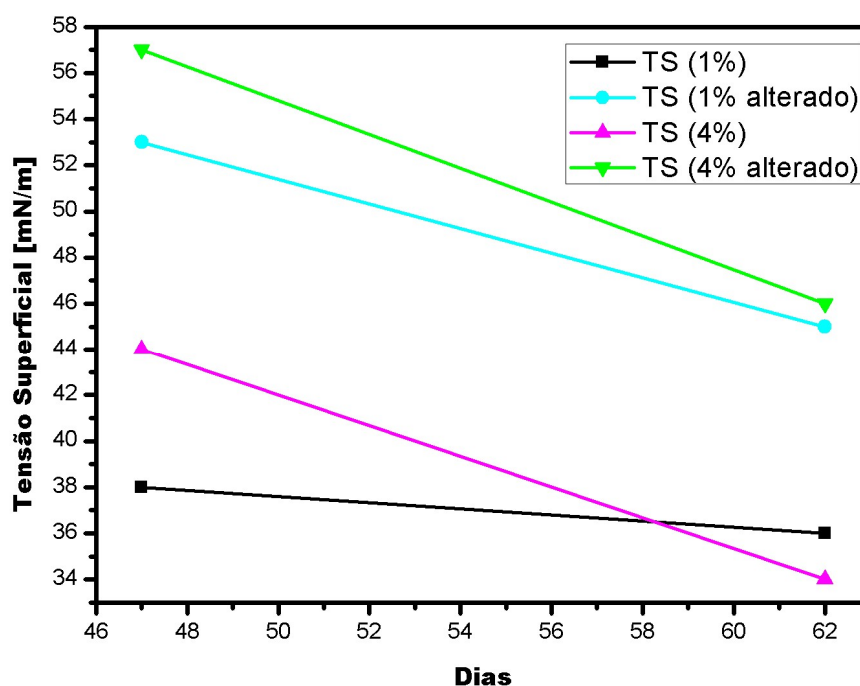
Fonte: Acervo Próprio

As amostras contendo BS (C4) e a combinação de BS com peróxido de hidrogênio (C5) apresentaram uma redução significativa da TS, indicando que esses tratamentos foram eficazes na degradação da espuma, já que a diminuição da tensão superficial reflete a ação do BS na quebra dos compostos superficiais. Por outro lado, as amostras controle (C1) não apresentaram redução, como o esperado, pois não continha agente oxidante nem tensoativos presentes nas amostras. Ademais aquelas contendo apenas peróxido (C2 e C3) apresentaram reduções sutis, sugerindo menor eficiência na

degradação isolada. O branco, composto apenas pela solução tampão, apresentou valores estáveis e mais altos, o que confirma que a variação da TS está relacionada à presença e ação dos agentes degradantes na espuma. As variações observadas nas amostras C4 tanto com 1% quanto 4% de espuma ocorreram devido a um desvio amostral que será representado a seguir. Esses resultados indicaram que o BS é capaz de reduzir a tensão superficial, mas o peróxido de hidrogênio não favoreceu significativamente a degradação da espuma.

Durante esse experimento, observou-se que duas amostras de C4, sendo uma delas contendo 1% e outra 4% de espuma apresentaram, de forma isolada, aumento nos valores de tensão superficial e alteração na coloração para amarelado (Figura 18).

**Figura 18:** Desvio das amostras na condição C4 durante a aplicação do [BS] = 4 CMC tanto em soluções com 1% quanto nas com 4% de espuma



Fonte: Acervo Próprio

As amostras que apresentaram desvio amostral apresentaram coloração amarelada (Figura 19).

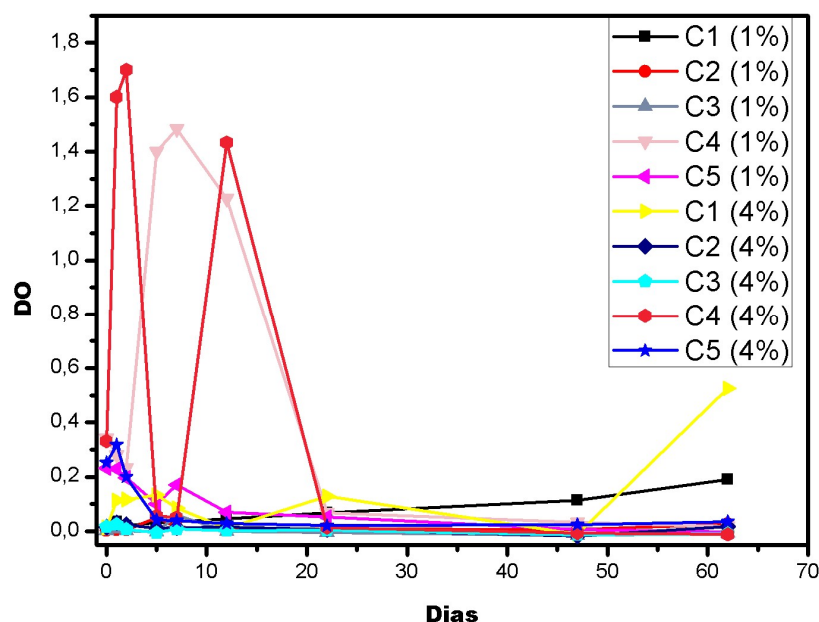
**Figura 19:** Diferença da coloração das amostras na condição C4 sendo uma delas a amostra contaminada e a outra não, representando então o desvio amostral ocorrido durante a aplicação do  $[BS] = 4 \text{ CMC}$  tanto em soluções com 1% quanto nas com 4% de espuma



Fonte: Acervo Próprio

Considerando que o experimento foi conduzido por 62 dias, é plausível que essas amostras tenham sido contaminadas simultaneamente durante algum manuseio, possivelmente no momento de abertura dos erlenmeyers, expondo-as ao oxigênio atmosférico e a microrganismos presentes no ambiente. Entre os mecanismos que podem causar essa alteração, destaca-se a oxidação, na qual compostos sensíveis do BS podem sofrer reações com o oxigênio, levando à quebra de cadeias hidrofóbicas, perda de grupos funcionais ou formação de subprodutos menos ativos na interface, o que compromete a redução da tensão superficial. Além disso, há a hidrólise que é um processo em que, na presença prolongada de água e sob agitação, as ligações éster, peptídicas ou glicosídicas do BS podem se romper, reduzindo sua atividade superficial. Por fim, a contaminação microbiológica é o que ocorreu, visto que microrganismos presentes no ar podem colonizar essas amostras específicas, metabolizando parcialmente o BS, resultando na diminuição de sua concentração efetiva e na produção de metabólitos, como pigmentos, que explicam a coloração amarelada observada. Esse cenário reflete um evento pontual e não sistemático, visto que as demais amostras permaneceram estáveis, descartando falhas no preparo das soluções ou na formulação do tampão. A Figura 20 comprova que as amostras que foram contaminadas apresentaram maior pontos de turbidez.

**Figura 20:** Densidade óptica da aplicação do [BS]=4 CMC com pH=6,6 e T=30°C em diferentes condições nas soluções contendo 1 e 4% de espuma, cujos picos formados representam o desvio amostral causado pela contaminação de microrganismos.



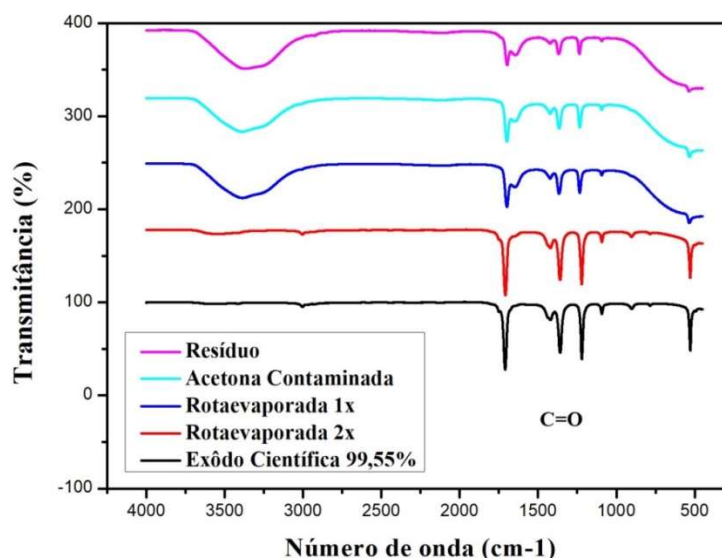
Fonte: Acervo Próprio

O maior valor de densidade óptica nesse caso, referiu-se a presença de microrganismos, pois a leitura foi realizada em 600nm. É válido ressaltar que a água não absorve luz nesse comprimento e sabendo que maior parte da solução era composta por água foi possível afirmar que a variação desses valores de DO foi devido a uma contaminação justificada por microrganismos indesejáveis que causam turbidez na solução.

#### 5.14. Extra: Recuperação da Acetona

Foi realizada uma análise de FTIR (Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier) para identificar as alterações químicas ocorridas no material após o tratamento. Essa técnica permitiu avaliar as modificações estruturais no composto, fornecendo dados importantes sobre a presença de grupos funcionais específicos e as interações entre o BS e a espuma. A Figura 21 a seguir representa os dados obtidos durante a análise, ilustrando as principais características observadas nas amostras analisadas.

**Figura 21:** Espectro FTIR das Amostras que continham Acetona, cuja tal, foi recuperada através do rotaevaporador



Fonte: Acervo Próprio.

A análise espectroscópica FTIR revelou comportamentos distintos entre as amostras puras e contaminadas de acetona recuperada. Nas amostras puras que passaram pelo processo de rotaevaporação duas vezes, foi observado um pico bem definido e estreito em torno de  $1750\text{ cm}^{-1}$ , que está associado à vibração de estiramento da ligação C=O (carbonila) de compostos carbonílicos, semelhante a amostra da Acetona Êxodo Científica 99,55%. Este pico intenso e estreito indica que a acetona foi purificada eficazmente, com mínima interferência de outras substâncias. Na região em torno de  $500\text{ cm}^{-1}$ , as amostras puras apresentaram um pico único e bem definido, sugerindo a presença de estruturas simples e mais homogêneas, possivelmente indicando a ausência de outros grupos funcionais contaminantes. Nessa região em torno de  $500\text{ cm}^{-1}$ , os picos únicos e bem definidos observados nas amostras puras podem ser atribuídos às vibrações de deformação fora do plano (out-of-plane bending) de ligações C-H presentes em compostos simples, como a acetona pura. Esse comportamento indica a ausência de grupos funcionais contaminantes que poderiam gerar absorções adicionais ou interferências nesta região.

Por outro lado, nas amostras que passaram apenas uma vez pelo processo de rotaevaporação, bem como nas amostras contaminadas, os resultados foram mais complexos. Essas amostras apresentaram picos mais largos, especialmente em torno de  $1750\text{ cm}^{-1}$ , o que também está relacionado à vibração de estiramento (movimento de alongamento e encurtamento da ligação entre o átomo de carbono e o oxigênio em

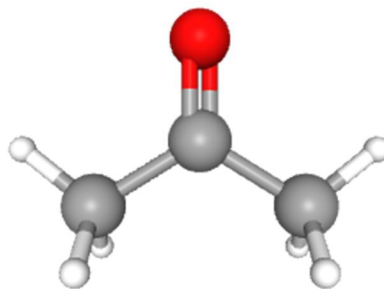
grupos carbonila) da ligação C=O, mas com maior largura, sugerindo a presença de impurezas ou subprodutos. A largura desses picos pode ser atribuída à diversidade dos grupos carbonílicos presentes nas amostras não purificadas, indicando que os compostos carbonílicos estão mais distribuídos. Além disso, na região entre 1500 e 1000  $\text{cm}^{-1}$ , todas as amostras, tanto puras quanto contaminadas, exibiram dois picos, o que pode estar relacionado à vibração de ligações C-H e C=C. As amostras puras apresentaram esses picos de forma mais intensa e estreita, indicando que essas ligações estavam presentes de forma mais definida. O fato de todas as amostras exibirem picos nessa faixa indica que as vibrações de C-H (deformação) são intrínsecas à acetona, confirmando sua presença em todas as amostras, sejam puras ou contaminadas. Nas amostras contaminadas e nas de rotaevaporação 1x, esses picos foram mais largos, o que pode sugerir a presença de mais tipos de ligações ou impurezas interferindo nas vibrações dessas ligações.

Na região abaixo de 500  $\text{cm}^{-1}$ , as amostras puras permaneceram retas, sem apresentar absorções significativas, enquanto as amostras contaminadas e as de rotaevaporação 1x começaram a formar uma onda antes desse ponto, indicando a presença de substâncias adicionais ou contaminantes que alteraram as propriedades espectrais da acetona. Essa diferença sugere que o processo de purificação realizado foi eficaz, mas as amostras não completamente purificadas contêm resíduos que afetam suas características moleculares, como demonstrado pelas alterações nos picos FTIR.

Por fim, na região em torno de 3250  $\text{cm}^{-1}$ , as amostras contaminadas apresentaram um pico largo, enquanto as amostras puras não exibiram nenhum sinal significativo. Essa região é característica de vibrações de estiramento das ligações N-H ou O-H, associadas a aminas, álcoois, ou à presença de água residual. O pico largo nas amostras contaminadas sugere a existência de compostos polares capazes de formar ligações de hidrogênio, como água ou resíduos contendo grupos funcionais hidroxila. A ausência desse pico nas amostras puras demonstra que o processo de purificação por rotaevaporação foi eficiente na eliminação desses contaminantes, indicando maior pureza na acetona recuperada. A ausência desse pico nas amostras puras indica que o processo de purificação por rotaevaporação foi eficaz na remoção desses compostos, resultando em acetona de maior pureza e sem interferências de grupos hidroxila. A Figura 22 afirma estas ligações citadas no texto.



**Figura 22:** Estrutura Química da Acetona



**Fonte:** Pubchem, 2025

Esses resultados confirmam que o processo de rotaevaporação foi eficaz na purificação da acetona, mas as amostras que passaram por esse processo uma vez não alcançaram o mesmo nível de pureza. As diferenças nos picos FTIR, associados às ligações C=O, C-H e C=C, indicam que os contaminantes presentes causaram alterações nas vibrações das ligações, afetando a qualidade da acetona recuperada (Coronado *et al.*, 2003).

## 6. Conclusão

O presente estudo investigou a aplicação do BS produzido pela levedura *Rhodotorula* no tratamento da espuma em reatores UASB, focando na otimização dos parâmetros operacionais, como pH e temperatura, e na recuperação de acetona. O rendimento obtido na produção do BS foi de 10,66 g/L. Ademais, analisou-se os diferentes comportamentos ao longo das fases de crescimento da levedura a partir da análise de densidade óptica, cuja tal, no dia 0 (fase lag) obteve-se 0,15 g/L; no dia 1 (fase log), o rendimento foi 2,015 g/L, destacando-se como o melhor ponto em termos de eficiência e sustentabilidade do processo; no dia 5 (fase estacionária), o valor foi 0,485 g/L; e no dia 13, durante a adaptação dentro da fase estacionária, obteve-se 2,15 g/L e aumentou nos dias seguintes.

Os resultados de índice de emulsificação (IE) mostraram que o BS foi eficaz na formação de emulsões, com óleo de girassol (65%), azeite (63%), e hexano (62%), sendo o óleo de girassol o melhor, isso aconteceu devido a estrutura do óleo e do azeite apresentarem um grupo de ácido carboxílico oferecendo uma polaridade a estrutura, além disso ambas apresentam pelo menos uma ligação dupla, enquanto o hexano é uma cadeia carbônica curta. Ocorreu o colapso e o espalhamento da gota confirmando assim a presença do BS. A massa seca obtida foi 0,044 g/L, considerada baixa, tornando o uso do liofilizador uma opção mais vantajosa para a concentração do BS. Além disso, o estudo identificou que a concentração micelar crítica (CMC) foi de 5 g/L e a concentração micelar dissolvida (CMD) foi de 60 g/L.

O teste de estabilidade do BS revelou que o melhor ponto de desempenho ocorreu no dia 7, com 30°C e com o pH 6,6, onde a tensão superficial (TS) foi de 38 mN/m para ambos. Quanto à análise da espuma, os testes mostraram que o pH foi de 6 para a amostra agitada e 5,5 para o sobrenadante, a TS das amostras agitadas foi 40 mN/m, enquanto os sobrenadantes apresentaram 45 mN/m. A densidade óptica foi de 2,8 para o sobrenadante e 4,0 para a amostra agitada, confirmando que a amostra agitada tem maior quantidade de matéria orgânica. Além disso, a densidade da espuma foi de 0,987, confirmando ser mais leve que a água já que essa apresenta densidade igual a 0,998g/L.

A aplicação do BS em diferentes concentrações de espuma, apresentou os melhores desempenhos no Dia 0 com C4 (4%), apresentando TS = 44 mN/m, e no dia 1, o melhor desempenho foi com C3 (1%), C3 (4%), e C4 (1%), apresentando TS de 44

mN/m, 45 mN/m, e 46 mN/m, respectivamente. Nos dias subsequentes a estes os valores da tensão superficial aumentaram consideravelmente.

Por fim, a recuperação da acetona foi eficiente, contribuindo para a sustentabilidade do processo ao purificar o solvente, o que também minimizou os impactos ambientais associados à metodologia.

Embora os resultados obtidos até o momento sejam promissores, especialmente em termos de eficiência e sustentabilidade, mais experimentos e análises são necessários para confirmar a aplicabilidade do BS no tratamento da espuma em reatores UASB, além de validar a eficiência do processo como uma alternativa viável e sustentável ao longo prazo.

## 7. Referências

ABD EL-LATEEF, H. M.; ABO-RIYA, M. A.; TANTAWY, A. H. Empirical and quantum chemical studies on the corrosion inhibition performance of some novel synthesized cationic gemini surfactants on carbon steel pipelines in acid pickling processes. **Corrosion Science**, v. 108, p. 94–110, 2016.

ABD EL-LATEEF, H. M.; TANTAWY, A. H. Synthesis and evaluation of novel series of Schiff base cationic surfactants as corrosion inhibitors for carbon steel in acidic/chloride media: Experimental and theoretical investigations. **RSC Advances**, v. 6, n. 11, p. 8681–8700, 2016.

ALMEIDA, D. G. *et al.* Application in decontamination of petroleum pollutants. **Processes**, v. 9, n. 885, p. 1–18, 2021.

ANDRADE, J. D. A.; AUGUSTO, F.; JARDIM, I. C. S. F. Biorremediação de solos contaminados por petróleo e seus derivados. **Ecletica Química**, v. 35, n. 3, p. 17–43, 2010.

BOBADE, V. *et al.* Formation mechanisms and mechanical properties of anaerobic lagoon scum. **Science of the Total Environment**, v. 843, n. April, p. 156907, 2022.

BODOUR, A. A.; MILLER-MAIER, R. M. Application of a modified drop-collapse technique for surfactant quantitation and screening of biosurfactant-producing microorganisms. **Journal of Microbiological Methods**, v. 32, n. 3, p. 273–280, 1998.

BRUNEEL, C. *et al.* The impact of the protein network on the pasting and cooking properties of dry pasta products. **Food Chemistry**, v. 120, n. 2, p. 371–378, 2010.

CHANG, Y. M. *et al.* Elevated pressure and temperature effects on flammability hazard assessment for acetone and water solutions. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 95, n. 2, p. 525–534, 2009.

CHENG, C. C. Recovery of polycyclic aromatic hydrocarbons during solvent evaporation with a rotary evaporator. **Polycyclic Aromatic Compounds**, v. 23, n. 3, p. 315–325, 2003.

COELHO, R. S.; TEIXEIRA, M. C. Bioremediation of arsenic-contaminated soil through soil washing using biosurfactants. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 25, n. 4, p. 543–553, 2020.

COLET, E.; UASB, N. E. A. R. **Informação para formação Coletânea de Notas Técnicas**. [s.l: s.n.]. v. 66

CORONADO, J. M. *et al.* Dynamic phenomena during the photocatalytic oxidation of ethanol and acetone over nanocrystalline TiO<sub>2</sub>: Simultaneous FTIR analysis of gas and surface species. **Journal of Catalysis**, v. 219, n. 1, p. 219–230, 2003.

COSTA, F. F. *et al.* Efeito da temperatura das amostras de leite na concentração de cálcio solúvel e de beta-caseína: Interferência no teste de estabilidade frente ao etanol. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 66, n. 2, p. 573–578, 2014.

DECARO, R. A. Espalhamento de gotas de fungicidas em associação com adjuvantes sobre superfícies vegetais e artificiais. p. 76, 2018.

DEEPIKA, K. V. *et al.* Optimization of rhamnolipid biosurfactant production by mangrove sediment bacterium *Pseudomonas aeruginosa* KVD-HR42 using response surface methodology. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 5, p. 38–47, 2016.

DESAI, J. D.; BANAT, I. M. Microbial production of surfactants and their commercial potential. **Microbiology and Molecular Biology Reviews**, v. 61, n. 1, p. 47–64, 1997.

DUARTE, A. W. F. *et al.* Taxonomic assessment and enzymes production by yeasts isolated from marine and terrestrial Antarctic samples. **Extremophiles**, v. 17, n. 6, p. 1023–1035, 2013.

DUBEY, K. V. *et al.* Surface-active potential of biosurfactants produced in curd whey by *Pseudomonas aeruginosa* strain-PP2 and *Kocuria turfanensis* strain-J at extreme environmental conditions. **Bioresource Technology**, v. 126, p. 368–374, 2012.

DURVAL, I. J. B. Estudo de um biossurfactante produzido por espécies de bacillus isoladas de água do mar e seu potencial para biorremediação de derramamento de petróleo. **Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Biotecnologia Industrial da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Biotecnologia Industrial**, 2017.

FERREIRA DA SILVA, F. S. *et al.* Produção De Biossurfactantes Por Cepas Bacterianas De Origem Marinha Utilizando Querosene Como Fonte De Carbono. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 11, n. 1, p. 07, 2017.

FLÓREZ, C. A. D. Avaliação De Protocolos De Descarte E Desidratação Da Escuma Acumulada No Interior De Separadores Trifásicos De Reatores Uasb. p. 83, 2016.

FONTES, G. C.; AMARAL, P. F. F.; COELHO, M. A. Z. Biosurfactants

production by yeasts. **Quimica Nova**, v. 31, n. 8, p. 2091–2099, 2008.

GALO, A. L.; COLOMBO, M. F. Espectrofotometria de longo caminho óptico em espectrofotômetro de duplo-feixe convencional: uma alternativa simples para investigações de amostras com densidade óptica muito baixa. **Química Nova**, v. 32, n. 2, p. 488–492, 2009.

JACQUES, R. J. S. *et al.* Biorremediação de solos contaminados com hidrocarbonetos aromáticos policíclicos. **Ciência Rural**, v. 37, n. 4, p. 1192–1201, 2007.

JAWETZ, M. Y A. **Microbiología médica**. 25. ed. Cidade do México: Mc Graw Hill, 2011.

JIANG, X.; RAMSAY, J. A.; RAMSAY, B. A. Acetone extraction of mcl-PHA from *Pseudomonas putida* KT2440. **Journal of Microbiological Methods**, v. 67, n. 2, p. 212–219, 2006.

LANGE, M. K.; HEBERLÉ, G.; MILÃO, D. Avaliação da estabilidade e atividade antioxidante de uma emulsão base não-iônica contendo resveratrol. **Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences**, v. 45, n. 1, p. 145–151, 2009.

MALAJOVICH, M. **BIOTECNOLOGIA**. 2. ed. Rio de Janeiro: BIOTECNOLOGIA, 2016.

MASSAI, L. R. M. E L. R. D. OXIDAÇÃO TÉRMICA DO EFLUENTE SANITÁRIO APLICÁVEL À PEQUENAS COMUNIDADES. v. 4, n. 1, p. 1–23, 2016.

MEDEIROS, D. M. C. Prospecção tecnológica no setor de tensoativos da indústria de cosméticos. p. 69, 2017.

MENDONÇA, CRISTINA G. DE; RAETANO, C. G.; MENDONÇA, CRISTIANE G. DE. Surface tension of mineral oils and vegetable oils. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. SPEC. ISS., p. 16–23, 2007.

MULLIGAN, C. N.; YONG, R. N.; GIBBS, B. F. Surfactant-enhanced remediation of contaminated soil: A review. **Engineering Geology**, v. 60, n. 1–4, p. 371–380, 2001.

NEVES-BRITO, B. S. *et al.* Influência da temperatura de rotaevaporação e do tipo de resíduo na extração de compostos bioativos de jamelão (*Syzygium cumini*). **Research, Society and Development**, v. 10, n. 2, p. e16210212272, 2021.

NOCENTE, F. *et al.* Upcycling of brewers' spent grain by production of dry pasta with higher nutritional potential. **Lwt**, v. 114, n. April, p. 108421, 2019.

NOUY, P. L. DU. SURFACE TENSION OF SERUM. **The Journal of General**