

ISABELLA MARQUES VASCONCELOS

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE BIORREMEDIAÇÃO DE
FUNGOS FILAMENTOSOS EM POLIETILENO DE ALTA
DENSIDADE**

SÃO VICENTE – SP

2026

ISABELLA MARQUES VASCONCELOS

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE BIORREMEDIAÇÃO DE FUNGOS FILAMENTOSOS EM POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto
de Biociências, Câmpus do Litoral Paulista, para
obtenção do título de Bacharel em Ciências
Biológicas (Modalidade Biologia Marinha).

Orientadora: Profa. Dra. Cristiane Angélica Ottoni.

SÃO VICENTE – SP

2026

V331a

Vasconcelos, Isabella Maques

Avaliação do potencial de biorremediação de fungo filamentosos polietileno de alta densidade / Isabella Maques Vasconcelos. -- São Vicente, 2026
30 p.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Ciências Biológicas) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Biociências, São Vicente

Orientadora: Cristiane Angélica Ottoni

1. Microplásticos. 2. Polietileno de alta densidade. 3. Fungos filamentosos. 4. Biorremediação. 5. Rio dos Bugres. I. Título.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro concedido por meio do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), muito importante para a realização do trabalho.

À Profª Drª Cristiane Angélica Ottoni, pela orientação e ternura que dedicou a mim desde que me acolheu no laboratório. Você abriu meus horizontes e me ajudou a descobrir que ainda tinha muito da ciência para explorar. Obrigada pela paciência, direcionamento, cuidado e afeto de sempre.

Aos meus colegas de laboratório, pela relação de companheirismo e atmosfera divertida que alegrou muito os meus dias este ano.

Às meninas, Camila, Clara e Jessi, por terem aparecido nesse último semestre e tornado meus dias mais engraçados e calorosos.

Obrigada às amigas que me proporcionaram muitos momentos especiais ao longo desses últimos anos, em especial à Elfa, ou Ana Beatriz, adorei passar por esse processo com você desde o início do curso.

Aos meus amigos de São Paulo, Bianca, Clara, Gabriel, Luiza, Mathy, Mayane e Thalita, por nunca deixarem faltar carinho e se manterem presentes mesmo com a distância. Fico muito feliz de estarmos juntos a tanto tempo e poder dividir momentos especiais como esse com vocês.

À Ge, muito obrigada por ser a melhor companhia que eu poderia ter escolhido para dividir meus dias e meu espaço. É muito bom chegar em casa e ouvir sua música ou sua voz e saber que você está lá. Obrigada pela parceria e por me escolher também!

À Pucô, ou Laura, por ter chegado na minha vida em um momento em que nem sabia que precisava tanto dela, e permanecer aqui até hoje. Obrigada pelas risadas e conversas, pelos passeios de bicicleta até o Quebra-Mar, pelas trocas e pela confiança que sempre depositou em mim. Fico muito feliz de ter te encontrado e de te ter comigo.

Gostaria de agradecer à Ploti, ou Livia, por ser a amizade que sempre sonhei em ter. Muito obrigada pela companhia, pelas risadas e choros, colos e chamegos, pelas conversas

sérias e, também, as bobas, por estar comigo nos melhores momentos e presente pra me ajudar nos ruins também. Obrigada por tornar minha vida tão mais leve e divertida. Tenho muita sorte de ter te encontrado no começo da faculdade e poder ter vivido toda essa trajetória com você.

Um agradecimento especial aos meus pais e meu irmão. Obrigada por me apoiarem e me incentivarem a sempre ir atrás das coisas que desejo. Obrigada por serem tão incríveis a ponto de tornar as despedidas, mesmo que breves, tão difíceis e por sempre estarem presentes mesmo de longe, vocês são tudo pra mim! E a você, mãe, um agradecimento à parte, obrigada por ser minha pessoa neste mundo, por transbordar amor, cuidado e verdade, por ser o meu primeiro e melhor colo e me lembrar que tenho sempre para onde voltar.

A todos que de alguma forma fizeram parte desse meu caminho, muito obrigada!

RESUMO

A contaminação por microplásticos (MPs) em ambientes estuarinos representa um dos principais desafios ambientais da atualidade, sendo o polietileno de alta densidade (PEAD) um dos polímeros sintéticos de maior persistência no ambiente. Nesse contexto, a biorremediação mediada por fungos filamentosos (Ff) surge como uma alternativa sustentável aos métodos convencionais de descarte e tratamento desses resíduos. O presente estudo avaliou, macroscopicamente, a capacidade de interação de três linhagens fúngicas, duas isoladas do Rio dos Bugres, no Sistema Estuarino de Santos-São Vicente (1RB9 e RP4), e uma isolada de Manguezal (RMP5, *Nemania* sp.), com fibras de PEAD em dois meios de cultura de baixo teor nutritivo (MS1 e MS2), ao longo de 28 dias. Foram analisados o crescimento radial e o grau de colonização do polímero em intervalos semanais. Os resultados indicaram que as linhagens RMP5 e 1RB9 apresentaram maior capacidade de adesão direta ao PEAD, atingindo crescimento parcial sobre o polímero desde a primeira semana, enquanto o isolado RP4, apesar de exibir maior velocidade de expansão radial, se limitou ao crescimento ao redor do material. O isolado RMP5 demonstrou ainda resposta estimulada pela presença do polímero, apresentando crescimento superior ao do controle biológico. Os dados obtidos reforçam o potencial biotecnológico da micobiota local e apontam as linhagens RMP5 e 1RB9 como candidatas promissoras para estudos futuros de biodegradação de polímeros sintéticos em ambientes marinhos e estuarinos.

Palavras-chave: microplásticos; polietileno de alta densidade; fungos filamentosos; biorremediação; Rio dos Bugres.

ABSTRACT

Microplastic contamination in estuarine environments represents one of the main contemporary environmental challenges, with high-density polyethylene (HDPE) being one of the most persistent synthetic polymers in the environment. In this context, bioremediation mediated by filamentous fungi emerges as a sustainable alternative to conventional disposal and treatment methods for these wastes. The present study macroscopically evaluated the interaction capacity of three fungal strains—two isolated from the Rio dos Bugres, in the Santos–São Vicente Estuarine System (1RB9 and RP4), and one isolated from a Mangrove environment (RMP5, *Nemania* sp.)—with HDPE fibers in two low-nutrient culture media (MS1 and MS2) over 28 days. Radial growth and the degree of polymer colonization were analyzed at weekly intervals. The results indicated that strains RMP5 and 1RB9 exhibited greater capacity for direct adhesion to HDPE, reaching partial growth over the polymer from the first week, whereas isolate RP4, despite displaying higher radial expansion velocity, was limited to growth around the material. Isolate RMP5 also demonstrated a stimulated response to the presence of the polymer, showing higher growth compared to the biological control. The obtained data reinforce the biotechnological potential of the local mycobiota and point to strains RMP5 and 1RB9 as promising candidates for future studies on synthetic polymer biodegradation in marine and estuarine environments.

Keywords: microplastics; high-density polyethylene; filamentous fungi; bioremediation; Rio dos Bugres.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 OBJETIVOS	12
2.1 Objetivos específicos	12
3 METODOLOGIA	13
3.1 Linhagens fúngicas	13
3.2 Inóculo	14
3.3 Meios de cultura	14
3.4 Preparação das fibras de polietileno de alta densidade (PEAD)	15
3.5 Delineamento experimental	16
3.6 Avaliação experimental	17
4 RESULTADOS	18
4.1 Crescimento radial das linhagens fúngicas	18
4.2 Colonização do PEAD	20
4.3 Alterações visuais observadas no PEAD	21
4.4 Avaliação dos controles	22
5 DISCUSSÃO	23
6 CONCLUSÃO	25

1 INTRODUÇÃO

O plástico é um material amplamente utilizado no cotidiano desde a década de 1950, principalmente em razão de sua resistência e durabilidade. Essas características, associadas ao baixo custo, à elevada versatilidade e facilidade de produção, favoreceram sua ampla substituição a outros materiais em diferentes setores produtivos (KHATUA; SIMAL-GANDARA; ACHARYA, 2024; SALEHI et al., 2024).

De modo geral, os plásticos podem ser classificados quanto à sua origem e degradabilidade, incluindo polímeros sintéticos e alternativas de base biológica ou biodegradável, frequentemente denominadas bioplásticos. Enquanto algumas alternativas naturais são produzidas a partir de celulose, óleos vegetais e outros compostos orgânicos, os plásticos sintéticos possuem, em sua maioria, o petróleo como matéria-prima principal (EKANAYAKA et al., 2022).

Em escala global, é estimado que, dos aproximadamente 25 milhões de toneladas de plásticos sintéticos acumulados em ambientes costeiros, ao menos 8 milhões atinjam os oceanos anualmente (EKANAYAKA et al., 2022). Uma vez no ambiente, esses resíduos sofrem processos de fragmentação física, química e biológica, originando partículas com dimensões inferiores a 5 mm, denominadas microplásticos (MPs).

Essas partículas podem ser produzidas intencionalmente nessa escala ou resultar da degradação de itens plásticos maiores. Devido ao seu reduzido tamanho, os MPs podem ser ingeridos por organismos aquáticos, promovendo a bioacumulação ao longo da cadeia alimentar e desencadeando impactos ambientais e biológicos ainda não completamente compreendidos (EKANAYAKA et al., 2022; SALEHI et al., 2024).

A gravidade desse cenário é intensificada pelo fato de que cerca de 40% dos resíduos plásticos descartados são destinados à incineração, prática que pode ocasionar a liberação de substâncias tóxicas ao ambiente. Do restante, uma parcela significativa é encaminhada para aterros sanitários ou dispersa na natureza, enquanto apenas uma pequena fração é efetivamente reciclada (YANG et al., 2024).

A insuficiência das técnicas atualmente empregadas para o manejo e a destinação desses materiais contribui para o acúmulo de resíduos plásticos mal gerenciados, uma vez que os métodos convencionais ainda se mostram limitados ou pouco sustentáveis para resolver o

problema de forma eficaz (KHATUA; SIMAL-GANDARA; ACHARYA, 2024). Além disso, esses métodos podem gerar impactos ambientais secundários, como a liberação de gases tóxicos decorrente da exposição do plástico a altas temperaturas em processos de degradação química e térmica (SRIKANTH et al., 2022). Diante disso, torna-se necessário buscar e investir em estratégias de degradação ambientalmente seguras, entre as quais se destaca a biodegradação, uma rota sustentável e economicamente promissora na qual os microrganismos desempenham papel fundamental (KHATUA; SIMAL-GANDARA; ACHARYA, 2024).

Nesse contexto, o Sistema Estuarino de Santos–São Vicente, embora inserido em uma Área de Preservação Permanente (APP), sofre intensa pressão antrópica decorrente de atividades portuárias, ocupação irregular e presença de aterros sanitários e lixões, fatores que contribuem significativamente para sua degradação ecológica e econômica (DUCLERC FERNANDES et al., 2025).

O Rio dos Bugres, situado entre os municípios de Santos e São Vicente, nesta região estuarina, teve seus sedimentos analisados em estudo recente, revelando elevadas concentrações de MPs, classificando-o entre os ambientes mais contaminados do mundo, além de registrar a maior diversidade de polímeros entre as áreas avaliadas (DUCLERC FERNANDES et al., 2025).

O descarte inadequado de resíduos sólidos e esgoto provenientes das comunidades residentes em palafitas às margens do Rio dos Bugres, associado à rede de canais de drenagem urbana e à hidrodinâmica de baixa energia do estuário, favorece o acúmulo de resíduos plásticos e MPs na região. Como consequência, a ausência de correntes suficientemente intensas para transportar esses materiais em direção ao oceano contribui para sua retenção no interior do estuário e para sua deposição nos sedimentos, promovendo a formação de *hotspots* de contaminação (DUCLERC FERNANDES et al., 2025).

Entre os resíduos plásticos sintéticos produzidos e detectados no ambiente, aproximadamente 64% são constituídos por polietileno (PE) (SANGEETHA DEVI et al., 2015), um polímero formado por extensas cadeias hidrocarbônicas resultantes da polimerização do eteno (KONG et al., 2025). O PE pode ser classificado de acordo com seu peso molecular, estrutura da cadeia e processo de polimerização, características que influenciam diretamente sua resistência à degradação. Além disso, fatores ambientais como

pH, salinidade, temperatura, concentração de oxigênio e intensidade luminosa também afetam sua persistência no ambiente (KONG et al., 2025).

Nesse cenário, o polietileno de alta densidade (PEAD) destaca-se como um dos principais contribuintes para a poluição plástica de longo prazo, devido às suas propriedades estruturais e à elevada resistência à degradação (COWAN et al., 2021; SARDAR, 2025). Sua deterioração natural é extremamente lenta em razão da presença de longas cadeias poliméricas sintéticas, alto peso molecular e elevada hidrofobicidade.

Essa degradação lenta, associada ao aumento contínuo de sua produção e consumo, justifica o rápido acúmulo desse material no ambiente (EKANAYAKA et al., 2022). Por esse motivo, ensaios científicos envolvendo PEAD frequentemente utilizam processos de pré-tratamento capazes de modificar sua superfície, reduzir seu peso molecular ou aumentar sua afinidade com a água (SARDAR, 2025). Sabe-se que uma das etapas iniciais para a deterioração de polímeros como o PEAD é o desenvolvimento de biofilme sobre sua superfície, processo que favorece a colonização microbiana, o surgimento de poros e fissuras na matriz polimérica e, conseqüentemente, sua degradação.

Como o PE consiste em uma cadeia extensa de carbono com elevada estabilidade química, a utilização desse carbono pelos microrganismos tende a ser favorecida à medida que a hidrofobicidade do plástico é reduzida pela formação do biofilme (KONG et al., 2025). Adicionalmente, microrganismos capazes de degradar o PE frequentemente apresentam elevada hidrofobicidade da superfície celular (CSH), característica que favorece sua adesão à superfície do material, minimizando o contato entre ambos e a água sob uma perspectiva termodinâmica (KONG et al., 2025).

A biorremediação destaca-se como uma estratégia ambiental promissora, fundamentada na utilização de organismos vivos ou de seus metabólitos para remover, transformar, transferir ou reduzir contaminantes, o que a torna uma alternativa significativamente mais sustentável em comparação aos métodos físico-químicos convencionais (EKANAYAKA et al., 2022; KHATUA; SIMAL-GANDARA; ACHARYA, 2024).

Entre os microrganismos aplicados nesses processos, os fungos são frequentemente considerados mais eficientes que as bactérias na degradação do PE. Essa superioridade está relacionada à maior capacidade de adesão à superfície do material e à secreção de enzimas

extracelulares envolvidas na modificação e fragmentação da matriz polimérica, tornando esses organismos agentes promissores para processos de despoluição (KONG et al., 2025).

Os fungos filamentosos (Ff), de modo específico, caracterizam-se pelo crescimento em estruturas tubulares denominadas hifas, as quais se ramificam e se entrelaçam, formando uma rede conhecida como micélio. Além desse desenvolvimento, esses organismos apresentam elevada capacidade de secreção enzimática extracelular, o que viabiliza a degradação de compostos complexos no ambiente (LU et al., 2024). Essas características tornam os Ff candidatos propícios para a biorremediação de polímeros sintéticos, sendo a origem das cepas um fator determinante para sua eficácia.

Destaca-se, portanto, a importância da origem das cepas utilizadas em estudos de biorremediação. Microrganismos isolados de ambientes contaminados estão sujeitos a uma pressão seletiva contínua exercida pelos próprios poluentes, o que favorece o desenvolvimento de mecanismos metabólicos capazes de degradá-los de forma mais eficiente, tornando-as possivelmente agentes de biorremediação potencialmente mais eficazes do que linhagens sem contato prévio com tais condições (PIRES et al., 2024). Dessa forma, linhagens microbianas ambientais representam uma fonte promissora de microrganismos com capacidade de biodegradação superior àqueles já conhecidos, justificando a investigação de isolados provenientes de ambientes estuarinos impactados por resíduos plásticos.

Diante do cenário de elevada contaminação por MPs no Sistema Estuarino de Santos–São Vicente, particularmente no *hotspot* crítico do Rio dos Bugres, torna-se urgente o desenvolvimento de estratégias biotecnológicas capazes de mitigar o acúmulo desses polímeros sintéticos, como o PEAD, sem gerar novos impactos negativos ao ecossistema. Nesse contexto, os Ff surgem como agentes promissores, em razão de sua capacidade de adesão, crescimento micelial e potencial de secreção de enzimas extracelulares associadas à modificação e degradação de materiais poliméricos.

Assim, este trabalho propõe investigar o potencial de biorremediação e biodegradação de Ff frente aos MPs, contribuindo para o desenvolvimento de alternativas sustentáveis voltadas à mitigação da contaminação plástica em ambientes estuarinos.

2 OBJETIVOS

Avaliar, por análise macroscópica, a capacidade de interação de Ff com o PEAD, visando à seleção de linhagens com potencial para biodegradação.

2.1 Objetivos específicos

- Comparar o crescimento de diferentes fungos filamentosos em dois meios de cultura na presença de fibras de PEAD.
- Avaliar macroscopicamente a capacidade de colonização das fibras de PEAD pelos isolados fúngicos.
- Selecionar linhagens de fungos filamentosos com potencial para aplicação em estudos de biodegradação de polímeros sintéticos.

3 METODOLOGIA

3.1 Linhagens fúngicas

Conforme apresentado na Figura 1, foram selecionadas três linhagens fúngicas pertencentes à Coleção de Culturas do Laboratório de Micologia e Aplicações Biotecnológicas e Nanotecnológicas do Instituto de Biociências do Câmpus do Litoral Paulista (IB/CLP-UNESP) para o desenvolvimento deste estudo. As linhagens 1RB9 e RP4 foram isoladas, respectivamente, de sedimento e de rede de pesca coletados no Rio dos Bugres, São Vicente, São Paulo. Como linhagem controle, foi utilizada *Nemania sp.* (RMP5), isolada de folhas de mangue-vermelho (*Rhizophora mangle*) provenientes do Parque Ézio Dall'Acqua, localizado no município de Praia Grande, São Paulo.

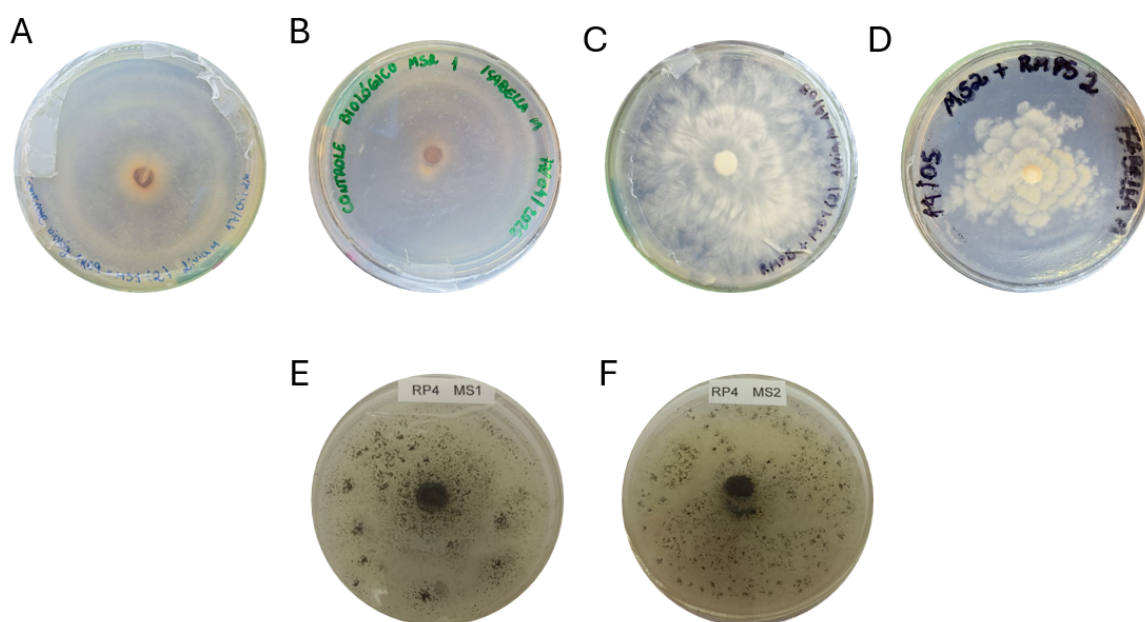


Figura 1. Aspecto macroscópico das linhagens fúngicas utilizadas no presente estudo, cultivadas nos meios de cultura Meio Salino 1 (MS1) e Meio Salino 2 (MS2). Em cada par de imagens, a fotografia à esquerda corresponde ao cultivo em MS1 e a da direita ao cultivo em MS2. (A-B) linhagem 1RB9; (C-D) linhagem RMP5 (*Nemania sp.*); e (E-F) linhagem RP4.

O isolado RMP5 (*Nemania sp.*) foi incluído neste trabalho como linhagem controle, em função de seu desempenho previamente documentado na degradação de polietileno (PE). Furtado (2026) demonstrou que esse Ff apresentou capacidade enzimática oxidativa e reduziu

a massa de microplásticos de PEBD em cultivos líquidos de 28 dias, validando sua utilização como referência de comparação no presente trabalho.

A viabilidade das linhagens fúngicas foi mantida por criopreservação em solução de glicerol a 40% (v/v), sob armazenamento a -80 °C. Para reativação, as linhagens 1RB9 e RP4 foram inoculadas em placas de Petri de 90 mm contendo meio Batata Dextrose Ágar (BDA) suplementado com 5% (m/v) de NaCl, enquanto a linhagem RMP5 (*Nemania* sp.) foi cultivada em BDA sem suplementação salina. As culturas foram incubadas por 7 dias. Posteriormente, foram mantidas a 4 °C, com repiques mensais para preservação da viabilidade.

3.2 Inóculo

A preparação do inóculo fúngico foi realizada com adaptações da metodologia descrita por Eichlerová et al. (2025). Para esse procedimento, as linhagens 1RB9 e RP4 foram cultivadas em meio Batata Dextrose Ágar (BDA) suplementado com 5% (m/v) de NaCl, a fim de reproduzir as condições salinas do ambiente de origem dos isolados. A linhagem RMP5 (*Nemania* sp.), utilizada como controle, foi cultivada em BDA sem suplementação salina. Os fungos foram inoculados em placas de Petri de 90 mm de diâmetro e incubados a 30 °C por 7 dias, período suficiente para o desenvolvimento das colônias utilizadas na preparação do inóculo.

3.3 Meios de cultura

Os ensaios foram conduzidos utilizando dois meios de cultura distintos, denominados Meio Salino 1 (MS1) e Meio Salino 2 (MS2), cujas composições químicas estão apresentadas na Tabela 1. Esses meios foram formulados com diferentes composições nutricionais, visando avaliar o crescimento fúngico sob distintas condições de cultivo. Antes da esterilização, o pH de ambos os meios foi ajustado para 7,0 e, posteriormente, os meios foram esterilizados em autoclave a 121 °C por 15 min.

A utilização de duas formulações minerais teve como objetivo investigar a influência da disponibilidade de nutrientes sobre o crescimento das linhagens fúngicas e sua interação com o polietileno de alta densidade (PEAD). Considerando a ausência de fontes orgânicas de carbono nos meios de cultura, buscou-se avaliar o potencial dos isolados em utilizar o PEAD como fonte de carbono, bem como verificar o efeito do aporte de nutrientes minerais sobre a

velocidade de crescimento radial das colônias e a capacidade de adesão e cobertura das fibras plásticas ao longo do período experimental.

Tabela 1. Composição química dos meios de cultura Meio Salino 1 (MS1) e Meio Salino 2 (MS2). Adaptado de Mohamed *et al.* (2022) e Spina *et al.* (2021).

Componente	Fórmula química	MS1 (g/L)	MS2 (g/L)
Cloreto de cálcio di-hidratado	$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0,02	0,05
Cloreto férrico	FeCl_3	0,05	-
Sulfato ferroso heptahidratado	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	-	0,05
Fosfato dipotássico	K_2HPO_4	1,0	2,5
Fosfato monopotássico	KH_2PO_4	1,0	0,2
Sulfato de magnésio heptahidratado	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,2	0,1
Nitrato de amônio	NH_4NO_3	1,0	-
Sulfato de amônio	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	-	1,0
Cloreto de sódio	NaCl	-	0,5
Ágar		15	15
Água destilada		*q.s.p. 1000 mL	*q.s.p. 1000 mL

*quantidade suficiente para: q.s.p.

3.4 Preparação das fibras de polietileno de alta densidade (PEAD)

A Figura 2 ilustra o procedimento de preparação das fibras de PEAD. As fibras foram padronizadas para aproximadamente 5 cm de comprimento e massa de 0,002 g. Em seguida, foram desinfetadas por imersão em etanol 70% (v/v), expostas à radiação ultravioleta (UV) por 30 minutos e secas em estufa a 30 °C, sob condições assépticas.

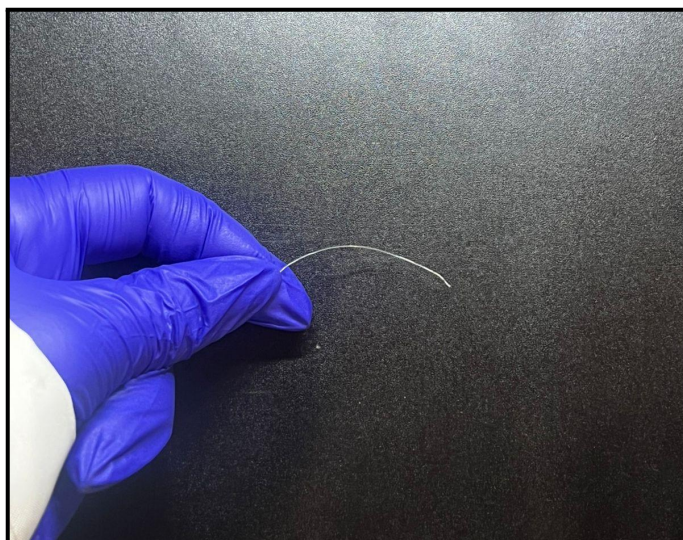


Figura 2. Fibra de polietileno de alta densidade (PEAD) após padronização para utilização nos ensaios experimentais.

3.5 Delineamento experimental

Os ensaios foram conduzidos em placas de Petri (90 mm) estéreis contendo os meios de cultura MS1 ou MS2. Em cada placa, cinco fibras de PEAD foram distribuídas sobre a superfície do meio, sendo posteriormente inoculado, na região central, um disco micelial de cada linhagem fúngica.

Os tratamentos contendo fungo e fibras de PEAD, bem como os respectivos controles abióticos (meio de cultura e fibras de PEAD) e biológicos (meio de cultura e fungo), foram estabelecidos para os meios de cultura MS1 e MS2, conforme descrito na Tabela 2.

Após a inoculação, as placas foram vedadas com parafilme e incubadas em estufa a 30 °C por 28 dias. As avaliações foram realizadas aos 7, 14, 21 e 28 dias de incubação. Todos os tratamentos foram realizados em triplicata.

Tabela 2. Delineamento experimental e descrição dos tratamentos utilizados no estudo.

Meio	Fibra de PEAD	Condição Experimental	Repetições
MS1	Sim	Fungo + MS1 + PEAD	3
MS2	Sim	Fungo + MS2 + PEAD	3
MS1	Não	Controle biológico (Fungo + MS1)	3
MS2	Não	Controle biológico (Fungo + MS2)	3

MS1	Sim	Controle abiótico (MS1 + PEAD)	3
MS2	Sim	Controle abiótico (MS2 + PEAD)	3

3.6 Avaliação experimental

As avaliações foram realizadas aos 7, 14, 21 e 28 dias de incubação, por meio de análises qualitativas e quantitativas, considerando o crescimento fúngico, a interação com as fibras de PEAD, as alterações visuais do polímero e a integridade do meio de cultura. Os parâmetros avaliados e seus respectivos critérios de análise estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros avaliados durante o experimento e respectivos critérios de análise.

Parâmetro	Descrição	Tipo de dado	Critério/Escala
Crescimento radial da colônia	Medição do diâmetro total da colônia	Quantitativo	mm
Colonização das fibras de PEAD	Presença e extensão do crescimento fúngico sobre as fibras	Qualitativo	(1) Ausência de crescimento; (2) Crescimento ao redor da fibra; (3) Crescimento parcial sobre a fibra; (4) Colonização total
Alteração visual das fibras de PEAD	Alterações de cor, opacidade ou fragmentação das fibras	Qualitativo	Ausente, moderada ou intensa
Integridade do meio de cultura	Presença de ressecamento, rachaduras ou contaminação	Qualitativo	Normal ou alterado

4 RESULTADOS

4.1 Crescimento radial das linhagens fúngicas

A Figura 3 apresenta o crescimento radial das linhagens fúngicas cultivadas nos meios MS1 e MS2 ao longo dos 28 dias de incubação. O isolado RP4 apresentou o maior crescimento radial em ambos os meios, atingindo o diâmetro máximo da placa (90 mm) já aos sete dias de incubação (D7) e permanecendo estável até o final do experimento (D28).

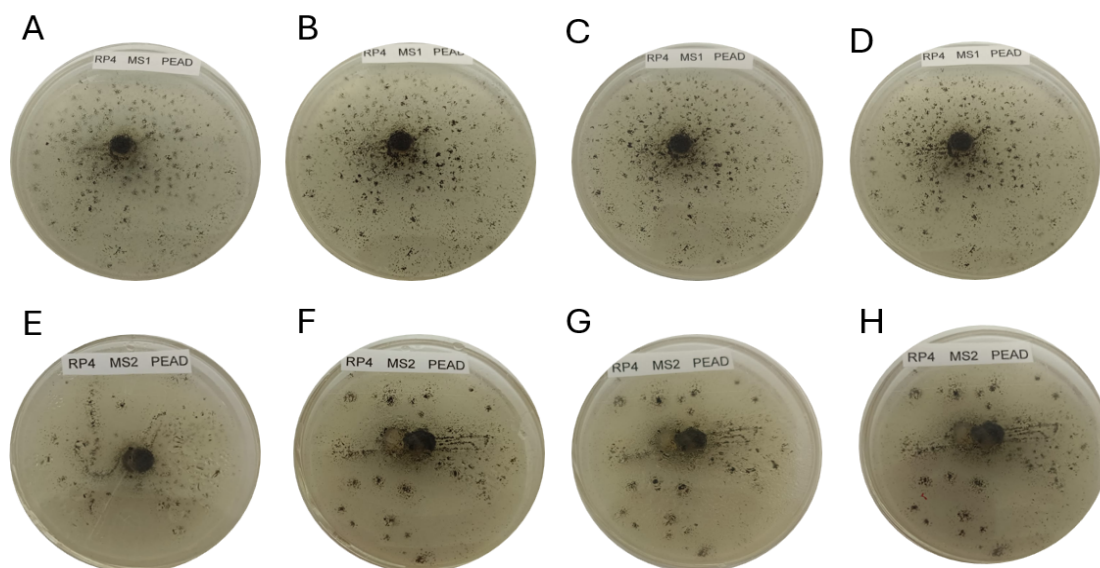


Figura 3. Verso do isolado RP4 cultivado na presença de PEAD. A: D7, MS1; B: D14, MS1; C: D21, MS1; D: D28, MS1; E: D7, MS2; F: D14, MS2; G: D21, MS2; H: D28, MS2.

O isolado RMP5 apresentou crescimento progressivo ao longo do período experimental. No meio MS1, o diâmetro médio da colônia aumentou de 41 mm em D7 para 77,67 mm em D14, atingindo 88 mm ao final do ensaio. No meio MS2, também foi observado crescimento contínuo, porém com valores inferiores aos registrados no MS1 durante parte do período de incubação (Figura 4).

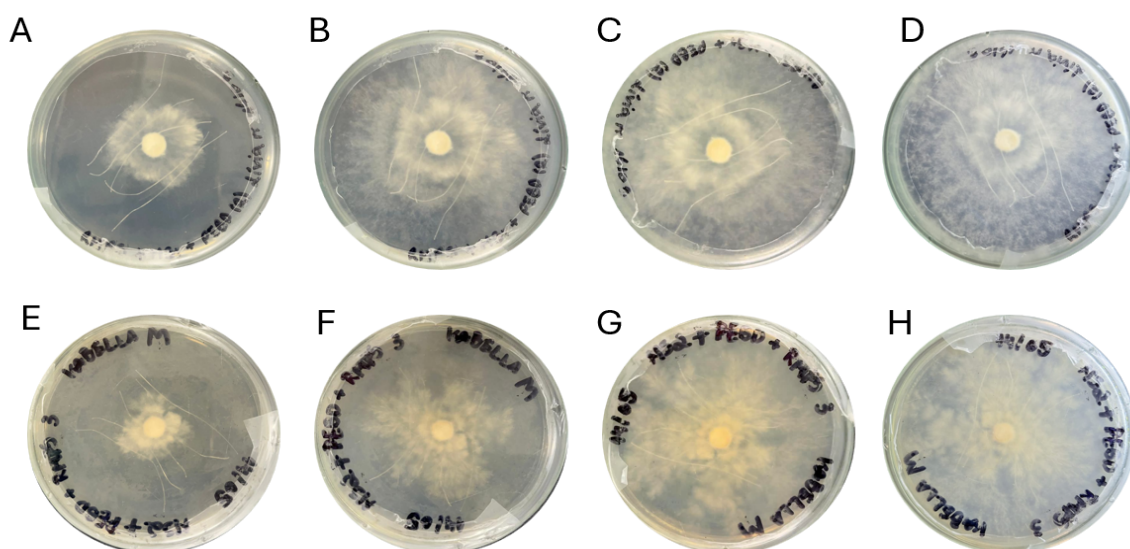


Figura 4. Verso do isolado RMP5 cultivado na presença de PEAD. A: D7, MS1; B: D14, MS1; C: D21, MS1; D: D28, MS1; E: D7, MS2; F: D14, MS2; G: D21, MS2; H: D28, MS2.

O isolado 1RB9 apresentou um crescimento mais gradual entre os três avaliados. No meio MS1, o crescimento aumentou de 25 mm em D7 para 77 mm em D28. No meio MS2, foi observado comportamento semelhante, com crescimento de 27,33 mm em D7 para 82,67 mm ao final do experimento (Figura 5).

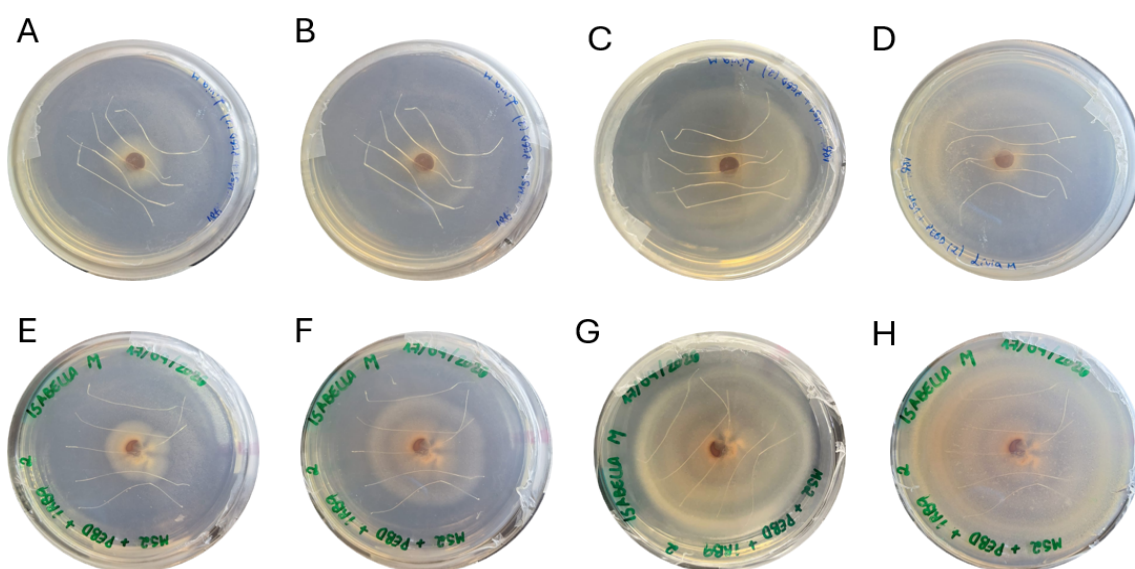


Figura 5. Verso do isolado 1RB9 cultivado na presença de PEAD. A: D7, MS1; B: D14, MS1; C: D21, MS1; D: D28, MS1; E: D7, MS2; F: D14, MS2; G: D21, MS2; H: D28, MS2.

As Figuras 6 e 7 apresentam os valores médios de crescimento radial das linhagens fúngicas cultivadas nos meios MS1 e MS2.

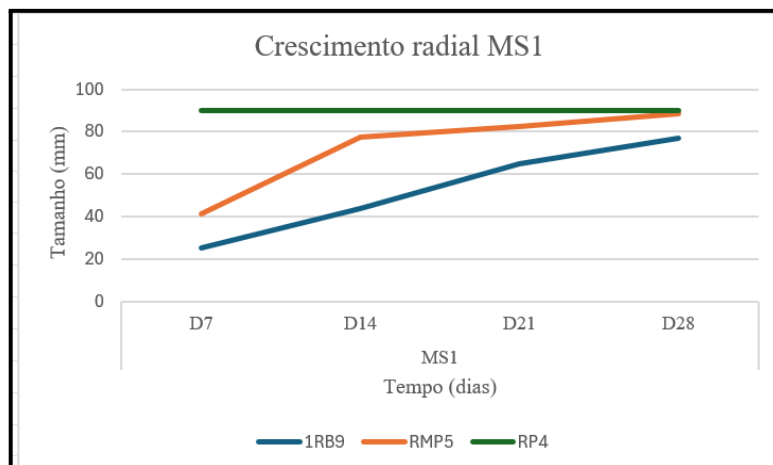


Figura 6. Valores médios de crescimento radial das linhagens fúngicas cultivadas no meio MS1.

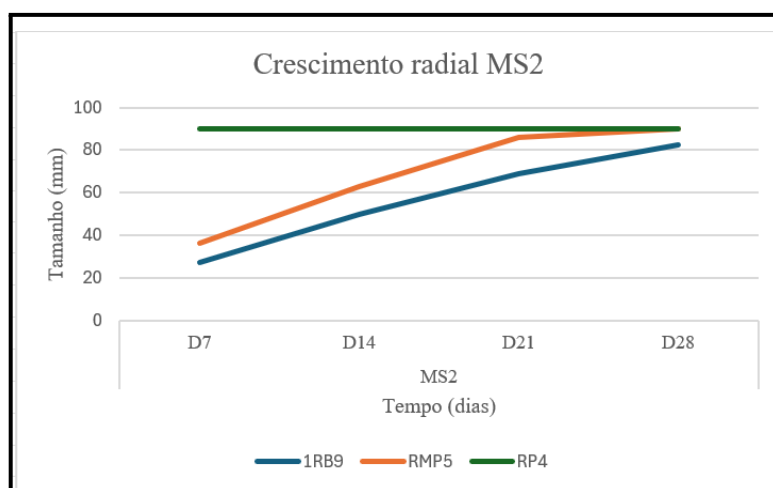


Figura 7. Valores médios de crescimento radial das linhagens fúngicas cultivadas no meio MS2.

4.2 Colonização do PEAD

Diferenças no padrão de colonização das fibras de PEAD foram observadas entre as linhagens fúngicas avaliadas. Os isolados RMP5 e 1RB9 apresentaram crescimento parcial sobre as fibras (Grau 3) desde a primeira semana de incubação (D7), mantendo esse padrão até o final do período experimental (D28). Esse comportamento evidencia uma interação direta entre o micélio e a superfície do polímero.

Em contraste, o isolado RP4 apresentou crescimento predominantemente ao redor das fibras de PEAD (Grau 2) durante todo o período de incubação, sem evidências de colonização parcial de sua superfície. Embora tenha apresentado maior velocidade de crescimento radial, esse isolado exibiu menor capacidade de colonização das fibras quando comparado aos isolados RMP5 e 1RB9.

Os escores de colonização das fibras de PEAD pelas linhagens fúngicas nos meios MS1 e MS2 estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Escore de colonização das fibras de PEAD pelas linhagens fúngicas durante o período experimental.

Linhagem fúngica	Meio de cultura	Tempo de incubação (dias)			
		D7	D14	D21	D28
1RB9 	MS1	3	3	3	3
	MS2	3	3	3	3
RMP5 	MS1	3	3	3	3
	MS2	3	3	3	3
RP4 	MS1	2	2	2	2
	MS2	2	2	2	2

Nota: Escore de colonização das fibras de PEAD: **(1)** ausência de crescimento; **(2)** crescimento ao redor da fibra; **(3)** crescimento parcial sobre a fibra; **(4)** colonização total da fibra.

4.3 Alterações visuais observadas no PEAD

Durante o período experimental, não foram observadas alterações macroscópicas visíveis nas fibras de PEAD em nenhum dos tratamentos avaliados.

4.4 Avaliação dos controles

A comparação entre os tratamentos contendo fibras de PEAD e os respectivos controles biológicos revelou diferenças no comportamento das linhagens fúngicas avaliadas (Figuras 6 e 7). Para o isolado 1RB9, os valores de crescimento radial observados na presença das fibras de PEAD foram semelhantes aos registrados nos respectivos controles biológicos em ambos os meios de cultura. No meio MS1, o crescimento final foi de 77 mm na presença do PEAD e de 82 mm no controle, enquanto no MS2 os valores finais foram de 82,67 mm e 85 mm, respectivamente. O isolado RMP5 apresentou diferenças entre os tratamentos. No meio MS1, o crescimento radial na presença do PEAD foi superior ao controle em D14, embora ambos tenham atingido valores semelhantes ao final do período experimental. No meio MS2, o tratamento contendo PEAD apresentou maior crescimento radial durante todo o período de incubação, atingindo o diâmetro máximo da placa (90 mm) em D28, enquanto o controle biológico alcançou 73,33 mm. Para o isolado RP4, também foram observadas diferenças entre os tratamentos contendo PEAD e os respectivos controles biológicos. Na presença das fibras, o crescimento radial atingiu o diâmetro máximo da placa (90 mm) já aos sete dias de incubação (D7), permanecendo estável até D28 em ambos os meios de cultura. Em contraste, os controles biológicos apresentaram menores valores de crescimento ao longo de todo o período experimental. Ao final das avaliações, a diferença entre os tratamentos contendo PEAD e os respectivos controles foi de aproximadamente 30 mm.

De modo geral, os tratamentos contendo fibras de PEAD apresentaram respostas distintas entre as linhagens avaliadas. O isolado 1RB9 apresentou crescimento semelhante ao observado nos respectivos controles biológicos, enquanto os isolados RMP5 e RP4 exibiram maior crescimento radial nos tratamentos contendo PEAD, sendo a diferença mais pronunciada para o isolado RP4.

5 DISCUSSÃO

Os resultados de crescimento radial revelam diferenças nos perfis metabólicos e adaptativos entre os microrganismos avaliados. O isolado RP4 apresentou crescimento rápido, atingindo 90 mm de diâmetro ainda na primeira semana de incubação, o que sugere elevada tolerância às condições experimentais, independentemente das diferenças nutricionais entre os meios MS1 e MS2. Por outro lado, as variações observadas para os isolados RMP5 e 1RB9 entre os meios de cultura demonstram que a velocidade de expansão das hifas e, possivelmente, os mecanismos envolvidos na interação com PEAD podem ser influenciados pela disponibilidade de nutrientes e cofatores presentes no meio.

Os resultados obtidos para o RP4 exibiram uma relação inversa entre o crescimento radial do fungo e sua capacidade de adesão à superfície do material. Embora tenha apresentado rápida expansão micelial, sua interação com o PEAD limitou-se ao perímetro do polímero, permanecendo no Grau 2 de colonização durante todo o período experimental. Esse comportamento pode indicar uma menor capacidade de estabelecimento sobre a superfície plástica quando comparado aos demais isolados avaliados.

As linhagens RMP5 e 1RB9, embora tenham apresentado uma expansão radial mais moderada, demonstraram maior aptidão para estabelecer crescimento parcial diretamente sobre o PEAD (Grau 3) desde a primeira semana de incubação (D7). Esse resultado indica uma interação mais estreita entre o micélio e o polímero, condição frequentemente apontada na literatura como etapa importante para a formação de biofilmes e para o estabelecimento de processos microbianos associados à biodegradação.

As diferenças observadas no perfil de adesão das linhagens avaliadas, em que dois fungos atingiram o Grau 3 de colonização sobre o material enquanto um permaneceu restrito ao Grau 2, podem ser parcialmente explicadas pelas propriedades de interface discutidas por Ghatge *et al.* (2020). O PEAD apresenta uma superfície lisa e de alta hidrofobicidade, características que atuam como barreiras naturais à colonização microbiana. Dessa forma, a permanência do isolado RP4 no Grau 2 pode estar relacionada a uma menor capacidade de adesão à superfície do polímero. Em contrapartida, os fungos que atingiram o Grau 3 demonstraram maior capacidade de superar essa barreira inicial e estabelecer contato direto com o material, condição considerada favorável para o início do processo de biodegradação.

A observação de que o isolado RMP5 apresentou crescimento superior ao respectivo controle biológico na presença do PEAD encontra respaldo na literatura. A classe Sordariomycetes tem sido apontada por análises filogenéticas como um dos grupos fúngicos com maior potencial para interação e biodegradação de materiais plásticos. Segundo Ekanayaka *et al.* (2025), representantes desse grupo apresentam capacidade de produzir enzimas hidrolíticas e oxidativas, como lacases, peroxidases e esterases, frequentemente associadas à degradação de compostos poliméricos. Embora o presente estudo não tenha avaliado diretamente a atividade enzimática ou a degradação do PEAD, o desempenho observado para o isolado RMP5 reforça seu potencial biotecnológico e justifica sua seleção para investigações futuras envolvendo mecanismos de biodegradação de polímeros sintéticos.

6 CONCLUSÃO

O presente estudo demonstrou que Ff isolados do Sistema Estuarino de Santos-São Vicente apresentam capacidade de interação com o PEAD, evidenciando o potencial biotecnológico da microbiota local para aplicação em estudos voltados à biorremediação de resíduos plásticos.

Os resultados indicaram que a velocidade de crescimento radial não constitui, isoladamente, um indicador suficiente do potencial de colonização do polímero, reforçando a importância da avaliação da adesão e do estabelecimento de crescimento sobre a superfície do substrato como critérios complementares na seleção de linhagens com potencial para estudos de biodegradação.

Dentre os isolados avaliados, RMP5 e 1RB9 destacaram-se por apresentarem maior capacidade de colonização do PEAD, enquanto o RP4, apesar de seu rápido crescimento radial, demonstrou crescimento predominantemente ao redor das fibras poliméricas.

Os resultados obtidos indicam que RMP5 e 1RB9 constituem candidatos promissores para investigações futuras envolvendo a biodegradação de PEAD. Nesse contexto, estudos complementares devem incluir análises bioquímicas e moleculares, como a caracterização enzimática, a quantificação da perda de massa do polímero e a avaliação da formação de biofilmes por microscopia eletrônica, a fim de verificar a ocorrência de processos biodegradativos e aprofundar a compreensão dos mecanismos envolvidos. Tais avanços poderão contribuir para o desenvolvimento de estratégias sustentáveis voltadas à mitigação da contaminação por resíduos plásticos em ambientes estuarinos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- COWAN, A. R.; COSTANZO, C. M.; BENHAM, R.; LOVERIDGE, E. J.; MOODY, S. C. Fungal bioremediation of polyethylene: challenges and perspectives. *Journal of Applied Microbiology*, 2021. DOI: 10.1111/jam.15203.
- DEUS, B. C. T.; COSTA, T. C.; ALTOMARI, L. N.; BROVINI, E. M.; BRITO, P. S. D.; CARDOSO, S. J. Coastal plastic pollution: a global perspective. *Marine Pollution Bulletin*, v. 203, p. 116478, 2024.
- DUCLERC FERNANDES, P.; GIMILIANI, G. T.; DOS SANTOS, J. L.; WETTER, N. U.; SCHEPIS, W. R.; BERECKZI, A.; COTRIM, M. E. B. Microplastics in Santos São Vicente estuarine – hotspot in sediments caused by low energy hydrodynamic events in strongly populated areas. *Marine Pollution Bulletin*, v. 207, p. 117286, 2025. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2024.117286.
- EICHLEROVÁ, I. The latest trends in cryopreservation of fungi. *Mycological Progress*, v. 24, n. 1, p. 1-18, 2025.
- EKANAYAKA, A. H.; TIBPROMMA, S.; DAI, D.; XU, R.; SUWANNARACH, N.; STEPHENSON, S. L.; DAO, C.; KARUNARATHNA, S. C. A review of the fungi that degrade plastic. *Journal of Fungi*, v. 8, p. 772, 2022.
- KHATUA, S.; SIMAL-GANDARA, J.; ACHARYA, K. Myco-remediation of plastic pollution: current knowledge and future prospects. *Biodegradation*, 2024.
- KONG, Y.; WANG, R.; ZHOU, Q.; LI, J.; FAN, Y.; CHEN, Q. Recent progresses and perspectives of polyethylene biodegradation by bacteria and fungi: a review. *Journal of Contaminant Hydrology*, v. 269, p. 104499, 2025. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2025.104499.
- LU, Z.; LI, X.; ZHANG, Y.; LIU, J.; CHEN, X. Morphological engineering of filamentous fungi: research progress and perspectives. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 34, n. 6, p. 1197–1205, 2024. DOI: 10.4014/jmb.2402.02007.
- MOHAMED, H. et al. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 38, p. 10, 2022. DOI: 10.1007/s11274-021-03197-x.
- SALEHI, M.; PINCUS, L. N.; DENG, B.; PETERS, C. A. Microplastics: from intrinsic properties to environmental fate. *Environmental Engineering Science*, v. 41, n. 8, p. 425–435, 2024. DOI: 10.1089/ees.2024.0232.
- SANGEETHA DEVI, R.; RAJESH KANNAN, V.; NIVAS, D.; KANNAN, K.; CHANDRU, S.; ROBERT ANTONY, A. Biodegradation of HDPE by *Aspergillus* spp. from marine ecosystem of Gulf of Mannar, India. *Marine Pollution Bulletin*, v. 96, n. 1-2, p. 32-40, 2015. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2015.05.050.
- SARDAR, R. K. Identification and biodegradation characterization of high-density polyethylene using marine bacteria isolated from the coastal region of the Arabian Sea, at Gujarat, India. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 41, p. 74, 2025. DOI: 10.1007/s11274-025-04283-0.
- SPINA, F. et al. *Environmental Pollution*, v. 274, p. 116548, 2021. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.116548.

- SRIKANTH, M.; SANDEEP, T. S. R. S.; SUCHARITHA, K. et al. Biodegradation of plastic polymers by fungi: a brief review. *Bioresources and Bioprocessing*, v. 9, p. 42, 2022.
- YANG, W. K.; GONG, Z.; WANG, B. T.; HU, S.; ZHUO, Y.; JIN, C. Z.; JIN, L.; LEE, H. G.; JIN, F. J. Biodegradation of low-density polyethylene by mixed fungi composed of *Alternaria* sp. and *Trametes* sp. isolated from landfill sites. *BMC Microbiology*, v. 24, n. 1, p. 321, 2024. DOI: 10.1186/s12866-024-03477-0.
- GHATGE, S.; YANG, Y.; AHN, J. H. et al. Biodegradation of polyethylene: a brief review. *Applied Biological Chemistry*, v. 63, p. 27, 2020. DOI: 10.1186/s13765-020-00511-3.
- EKANAYAKA, A. H.; DE SILVA, N. T.; TARAFDER, E. et al. Linking the metabolic activity of plastic-degrading fungi to their taxonomy and evolution. *Journal of Fungi*, v. 11, n. 5, p. 378, 2025. DOI: 10.3390/jof11050378.
- PIRES, C. S.; COSTA, L.; BARBOSA, S. G.; SEQUEIRA, J. C.; CACHETAS, D.; FREITAS, J. P.; MARTINS, G.; MACHADO, A. V.; CAVALEIRO, A. J.; SALVADOR, A. F. Microplastics biodegradation by estuarine and landfill microbiomes. *Microbial Ecology*, v. 87, p. 88, 2024. DOI: 10.1007/s00248-024-02399-8.
- FURTADO, K. F. Potencial de colonização e biodegradação de filmes e microplásticos de polietileno de baixa densidade utilizando uma abordagem micogênica. 2026. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2026.

Declaração sobre uso de inteligência artificial.

Durante a elaboração deste trabalho, foi utilizada a ferramenta de inteligência artificial Google Gemini exclusivamente para auxílio na revisão gramatical, aprimoramento da redação e organização textual. Todas as decisões relacionadas ao conteúdo científico, interpretação dos resultados, análises, conclusões e versão final do manuscrito foram realizadas pela autora que assume integral responsabilidade pelo conteúdo apresentado.

PARECER FINAL DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Discente: ISABELLA MARQUES VASCONCELOS

Título: "Potencial biodegradador de fungos filamentosos do Rio dos Bugres sobre polímeros sintéticos"

Orientador: Profa. Dra. Cristiane Angélica Ottoni

Curso/Habilitação: Bacharelado em Ciências Biológicas/Biologia Marinha

COMISSÃO EXAMINADORA	CONCEITO
Profa. Dra. Cristiane Angélica Ottoni	<i>Aprovado</i>
MSC. Arthur Pérez Aguiar	<i>Aprovada</i>
Dra. Roberta Alves Merguizo Chinellato	<i>Aprovada</i>

PARECER:

Trabalho foi aprovado e a banca sugeriu algumas alterações pontuais

CONCEITO FINAL:

A Comissão Examinadora abaixo assinada conclui que a discente **Isabella Marques Vasconcelos** obteve o seguinte conceito:

☒ APROVADO

☐ REPROVADO

São Vicente, 19 de junho de 2026.

Cristiane Angélica Ottoni
Profa. Dra. Cristiane Angélica Ottoni

Arthur Pérez Aguiar
MSC. Arthur Pérez Aguiar

Roberta Alves Merguizo Chinellato
Dra. Roberta Alves Merguizo Chinellato