

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a)
autor(a), o texto completo desta tese
será disponibilizado somente a partir
de **28/08/2027**.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Instituto de Biociências
Câmpus do Litoral Paulista



LAÍS ADRIELLE DE OLIVEIRA SANTOS

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS BIOLÓGICOS DE
MICROFIBRAS TÊXTEIS EM *Crassostrea gasar***

**São Vicente
Agosto/2025**

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
INSTITUTO DE BIOCIÊNCIAS
CÂMPUS DO LITORAL PAULISTA

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS BIOLÓGICOS DE MICROFIBRAS TÊXTEIS EM *Crassostrea gasar*

Laís Adrielle de Oliveira Santos

ORIENTADORA: Profa. Dra. Renata de Britto Mari

CO-ORIENTADOR: Dr. Caio Rodrigues Nobre

Dissertação apresentada ao Instituto de
Biociências, Câmpus do Litoral Paulista,
UNESP, para obtenção do título de Mestre
no Programa de Pós-Graduação em
Biodiversidade de Ambientes Costeiros.

São Vicente
2025

Instituto de Biociências - Câmpus do Litoral Paulista Praça Infante D. Henrique s/nº -
CEP 11330-900 - São Vicente (SP) – Brasil Tel. (13) 3569-7100 - Fax (13) 3569-7146 -
diretor.clp@unesp.br

S237a

Santos, Laís Adrielle de Oliveira

Avaliação dos efeitos biológicos de microfibras têxteis em
Crassostrea gasar / Laís Adrielle de Oliveira Santos. -- São Vicente,
2025

122 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Instituto de Biociências, São Vicente

Orientadora: Renata de Britto Mari

Coorientador: Caio Rodrigues Nobre

1. Ecotoxicidade. 2. Microfibras sintéticas. 3. Microfibras naturais.
4. Biomarcadores. 5. Ostras. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).

LAÍS ADRIELLE DE OLIVEIRA SANTOS

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS BIOLÓGICOS DE MICROFIBRAS TÊXTEIS EM *Crassostrea gasar*

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE LAÍS ADRIELLE DE OLIVEIRA SANTOS, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIODIVERSIDADE DE AMBIENTES COSTEIROS, DO INSTITUTO DE BIOCIÊNCIAS - CÂMPUS DO LITORAL PAULISTA.

Aos 28 dias do mês de agosto do ano de 2025, às 14h30min, no(a) Sala 04 do IB/CLP (modo híbrido), realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de LAÍS ADRIELLE DE OLIVEIRA SANTOS, intitulada **Avaliação dos efeitos biológicos de microfibras têxteis em *Crassostrea gasar***. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Profa. Dra. RENATA DE BRITTO MARI (Orientador(a) - Participação Presencial) do(a) Departamento de Ciências Biológicas e Ambientais / IBCLP - UNESP, Dra. GABRIELA PUSTIGLIONE MARINSEK (Participação Presencial) do(a) Universidade Santa Cecília, Profa. Dra. HELEN SADAUSKAS HENRIQUE (Participação Virtual) do(a) Universidade Santa Cecília. Após a exposição pela mestranda e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a discente recebeu o conceito final: Aprovada. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.


Profa. Dra. RENATA DE BRITTO MARI

RESUMO

A contaminação por microfibras têxteis (MFs) é uma preocupação crescente para ecossistemas aquáticos e a saúde humana, pois sua ingestão por organismos marinhos pode causar bioacumulação e biomagnificação. Este estudo avaliou os efeitos da exposição a microfibras de algodão convencional, poliéster, mistura e algodão orgânico em duas concentrações (0,11 e 1,00 mg.L⁻¹) nas brânquias e glândulas digestivas de *Crassostrea gasar* durante 7, 14 e 21 dias. Foram analisados biomarcadores de biotransformação, defesa antioxidante, estresse oxidativo, genotoxicidade, citogenotoxicidade, neurotoxicidade, além de alterações morfológicas, histopatológicas e acúmulo de MFs. Os resultados mostraram alterações bioquímicas nos dois órgãos, com aumento de GSH e GST, citogenotoxicidade, peroxidação lipídica e danos ao DNA. A glândula digestiva foi o principal local de acúmulo, especialmente de poliéster. Nas brânquias, houve redução do comprimento, da largura e do espaço interlamelar, indicando atrofia e comprometimento das funções respiratórias, filtrantes e imunológicas, além de aumento nos mucócitos. O índice de condição reduziu-se após sete dias de exposição, refletindo declínio na saúde e no estado nutricional. As análises histopatológicas revelaram lesões graves nas brânquias (ruptura, fusão, fibrose) e nos túbulos digestivos (hiperplasia, necrose). A exposição às MFs elevou os níveis de espécies reativas de oxigênio (ROS) de forma dependente do tempo e da concentração, com aumento de LPO e danos ao DNA, indicando depleção antioxidante. Houve ainda redução na taxa de sobrevivência em todos os tratamentos. Entre os tipos testados, o algodão orgânico foi o mais tóxico, causando alterações bioquímicas, celulares, teciduais e fisiológicas. Conclui-se que as MFs têxteis podem ser ingeridas e acumuladas em bivalves, comprometendo sua saúde e reforçando a necessidade urgente de ações legislativas para controlar sua liberação e mitigar os riscos ecológicos.

Palavras-chave: microfibras têxteis; orgânico; efeitos subletais; histopatologia; mortalidade.

ABSTRACT

Textile microfiber (MF) contamination has become an increasing concern for aquatic ecosystems and human health, as their ingestion by marine organisms can lead to bioaccumulation and biomagnification. This study assessed the effects of exposure to microfibers from conventional cotton, polyester, a mixture of both, and organic cotton at two concentrations (0.11 and 1.00 mg·L⁻¹) on the gills and digestive glands of *Crassostrea gasar* over 7, 14, and 21 days. Biomarkers related to biotransformation, antioxidant defense, oxidative stress, genotoxicity, cytogenotoxicity, neurotoxicity, as well as morphometric, histopathological alterations, and MF accumulation were analyzed. Results showed biochemical alterations in both organs, including increased GSH and GST levels, cytogenotoxicity, lipid peroxidation, and DNA damage. The digestive gland was the main site of MF accumulation, especially polyester fibers. In the gills, significant reductions in filament length, width, and interlamellar space indicated atrophy, impairing respiration, filtration, osmoregulation, and immune functions, along with an increase in mucocyte density. The condition index decreased after only seven days of exposure, reflecting a rapid decline in health and nutritional status. Histopathological analyses revealed severe gill lesions (epithelial lifting, rupture, fusion, fibrosis) and digestive tubule pathologies (hyperplasia, necrosis). Exposure to MFs increased reactive oxygen species (ROS) levels in a time- and concentration-dependent manner, along with increased lipid peroxidation (LPO) and DNA damage, suggesting depletion of antioxidant defenses. Survival rates declined across all treatments. Among the MF types tested, organic cotton was the most harmful, causing biochemical, cellular, tissue, and physiological alterations. It is concluded that textile microfibers can be ingested and accumulate in bivalves, compromising their health and highlighting the urgent need for legislation to control microfiber release and mitigate ecological risks.

Keywords: textile microfibers; organic; sublethal effects; histopathology; mortality.

“São as perguntas que não sabemos responder que mais nos ensinam. Elas nos ensinam a pensar. Se você dá uma resposta a um homem, tudo que ele ganha é um fato qualquer. Mas, se você lhe der uma pergunta, ele procurará suas próprias respostas”.

Trecho de O nome do Vento, por Patrick Rothfuss.

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha sogra, Neiva Rodrigues Facioli, que me ensinou o que é a bondade e gentileza ao próximo, sem medir esforços. Por ter acreditado em mim quando mais precisei e por ter me concedido forças quando não tinha de onde tirar.

Obrigada.

Agradecimentos

Agradeço aos meus amigos e colegas que fiz durante esse mestrado, Letícia Silva, Alexandre Gonçalves, Isabelly Oliveira, Gabriela Marinsek, Beatriz Lopes, Julia Duz, Francisco dos Santos, Yuri Gabriel, Thiago Camargo, Danielle Garcia, Thais Oliveira, João Rampazo, Milton Cardoso. Vocês foram essenciais tanto para a realização e concretização desta pesquisa, quanto para a minha motivação a continuar. Agradeço aos professores Paloma Gusso-Choueri e Rodrigo Choueri pelas orientações e ajuda durante esta pesquisa, vocês também foram essenciais.

Aos meus orientadores Renata Mari e Caio Nobre, agradeço primeiramente pela oportunidade que me deram de realizar este sonho. Agradeço não somente as orientações para melhorar o trabalho, mas orientações que deram para a minha vida, com palavras gentis e acolhedoras em momentos vulneráveis que tive. Irei levar cada uma dessas palavras comigo sempre. Saibam que são pessoas e orientadores maravilhosos, e desejo que todos os estudantes tenham a oportunidade de aprender, trabalhar e pesquisar ao lado de pessoas incríveis como vocês.

À minha família, minha avó Dona Clarice, que criou e cuidou de mim desde que nasci, agradeço por tudo o que fez e faz por mim. Sem você, não teria chegado aonde estou e nem onde um dia pretendo estar. A senhora é minha maior inspiração de vida e desejo um dia, ser 1/3 do que você é. Ao meu sogro, Dimas Facioli, por sempre estar preocupado e disposto a ajudar. E ao meu namorado e companheiro de vida Dimas Facioli Júnior, obrigada por ter sonhado comigo ainda durante a graduação, mas principalmente, por ter feito as malas e vindo comigo à Baixada Santista começarmos uma nova vida. Nada disso teria sido possível sem o seu apoio, confiança, companhia e amor. Te amo.

Muito obrigada a todos que fizeram e fazem parte desta minha jornada.

Sumário

1. INTRODUÇÃO GERAL	12
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	17
2. HIPÓTESE	21
3. OBJETIVO GERAL.....	21
CHAPTER 1 - FROM FASHION TO THE MARINE ENVIRONMENTS: ASSESSMENT OF THE IMPACTS OF TEXTILE MICROFIBERS ON <i>Crassostrea</i> <i>gasar</i> USING AN INTEGRATED BIOCHEMICAL BIOMARKERS APPROACH ..	
ABSTRACT	22
INTRODUCTION.....	23
MATERIALS AND METHODS	24
Microfibers	24
Obtaining and characterizing cellulose and polyester fibers	24
Contamination control	26
Bioassay.....	27
Experimental Design	27
Survival Rate	27
Biochemical Biomarkers	28
Statistical analysis	28
RESULTS.....	28
Size and Characterization of Microfibers.....	28
Fiber Quantification.....	30
Survival Rate	31
Ethoxyresorufin-O-Deethylase (EROD)	32
Glutathione transferase (GST).....	33
Glutathione peroxidase (GPx)	35
Reduced Glutathione (GSH).....	37
Catalase (CAT).....	39
Lipid Peroxidation (LPO).....	41
DNA strand-break.....	43
Cholinesterase (ChE).....	45
Neutral red retention time assay (NRRT).....	46
Integrated Biomarker Response Index (IBRv2i)	47
Principal Component Analysis (PCA).....	48

DISCUSSION.....	49
CONCLUSION	55
REFERENCES	56
SUPPLEMENTARY MATERIAL	68
CHAPTER II – INGESTION OF TEXTILE MICROFIBERS AND HISTOPATHOLOGICAL ALTERATIONS IN THE MANGROVE OYSTER	
<i>Crassostrea gasar</i>	82
ABSTRACT	82
HIGHLIGHTS	83
INTRODUCTION	84
MATERIALS AND METHODS	86
Microfibers	86
Preparation and characterization of cellulose and polyester fibers	86
Contamination Control	86
Experimental Design	87
Quantification of microfiber ingestion	87
Somatic biomarker - Afnor Condition Index (CI)	88
Histopathological biomarker	88
Morphometric analyses.....	89
Mucous Cells	90
Statistical analysis	90
RESULTS	90
Microfibers	90
Quantification of microfiber ingestion	91
Somatic biomarker.....	92
Histopathological biomarkers.....	93
Morphometric analyses.....	97
Mucous Cells	101
DISCUSSION.....	103
CONCLUSION	109
REFERENCES	110
SUPPLEMENTARY MATERIAL	118

1. INTRODUÇÃO GERAL

A onipresença das microfibras têxteis (MFs) tem sido amplamente registrada em ambientes ao redor do globo, gerando crescente preocupação ambiental, especialmente nos ecossistemas aquáticos. A principal rota de liberação das MFs ocorre durante o processo de lavagem doméstica, quando fibras são desprendidas das roupas e transportadas por efluentes até as estações de tratamento de esgoto (ETEs) (Browne et al., 2011; Liu et al., 2019; Singh, Mishra, Das, 2020; Acharya et al., 2021; Alex et al., 2024). Estima-se que uma única peça de vestuário seja capaz de liberar até 10 milhões de MFs em uma única lavagem (Napper e Thompson, 2016; De Falco et al., 2019).

As microfibras têxteis podem ser classificadas em duas categorias principais: fibras naturais, como algodão e lã, e fibras sintéticas, como poliéster e nylon (Ladewig; Bao; Chow, 2015; Zambrano et al., 2019; Li et al., 2023). Dentre elas, as fibras sintéticas são amplamente utilizadas como matéria-prima na indústria têxtil (Li et al., 2023) e representam atualmente a principal fonte de MFs no ambiente (Mishra; Rath; Das, 2019). Essas fibras são reconhecidas como uma das maiores fontes de poluição por microplásticos, podendo representar até 35% dos microplásticos secundários presentes nos oceanos e persistir por décadas em ambientes terrestres e aquáticos (Henry, Laitala, Klepp, 2019; Belzagui et al., 2020; Vassilenko et al., 2021). A liberação dessas partículas ocorre em diferentes etapas do ciclo de vida dos tecidos, desde a produção até o descarte, passando pela lavagem e uso cotidiano (Zhang et al., 2022a), o que as torna uma categoria relevante de micropoluentes amplamente distribuídos (Alex et al., 2024).

Essas fibras apresentam estrutura filamentosa, com diâmetros geralmente superiores a 50 μm e comprimentos que variam entre 1 μm e 5 mm (Li et al., 2023). No entanto, estudos recentes mostram que, durante o processo de lavagem, as MFs liberadas tendem a ter entre 50 e 200 μm de comprimento e de 8 a 17 μm de diâmetro, sendo que a quantidade de fibras desprendidas pode variar significativamente de acordo com o tipo de tecido, os parâmetros do ciclo de lavagem e a eficiência dos processos de tratamento de efluentes (Vassilenko et al., 2021; Dreillard et al., 2022).

Embora as águas residuais tenham diversas origens, os efluentes provenientes de lavanderias domésticas se destacam como uma fonte expressiva de MFs (MFs). Peller et al. (2019) relataram a presença de aproximadamente 800 MFs a cada 4 litros de esgoto doméstico, uma concentração semelhante à observada em amostras de esgoto bruto, indicando o papel relevante da lavagem de roupas na liberação dessas fibras. Corroborando esse cenário, Pedrotti et al. (2021) estimaram que, durante esse processo cotidiano, até 12.800 MFs podem ser liberadas por litro de água, evidenciando a magnitude desse aporte difuso. Apesar da passagem por estações de tratamento de esgoto (ETEs), essas fibras não são completamente retidas: devido às suas características físicas, como tamanho reduzido e densidade variável, muitas conseguem atravessar os sistemas convencionais de filtragem (De Falco, 2019). Como

consequência, os efluentes tratados ainda apresentam concentrações médias de 856 MFs por litro (Pedrotti et al., 2021). Essas fibras, ao serem lançadas no ambiente marinho, mantêm-se disponíveis para a biota aquática. Nas águas estuarinas do Atlântico Sudoeste, Pedrotti et al. (2021) identificaram aproximadamente 770 partículas por litro e estimaram que cerca de 4,3 bilhões de MFs sejam liberadas diariamente nos oceanos.

Estima-se que a quantidade de microplásticos presente na superfície de ambientes aquáticos já ultrapasse 268 mil toneladas, sendo que 90% desse total corresponde a fibras. Dessas, cerca de 60% são sintéticas e o restante é composto por fibras naturais (Carr, 2017; Barrows; Cathey; Petersen, 2018; Alex et al., 2024). Entre as fibras sintéticas, o poliéster é o mais predominante nos ambientes marinhos, o que está diretamente relacionado à sua produção em larga escala, com aproximadamente 46 milhões de toneladas por ano, seguido pelo algodão, cuja produção anual gira em torno de 24 milhões de toneladas (Ladewig; Bao; Chow, 2015; Zambrano et al., 2019).

Esse cenário está profundamente ligado à ascensão do *fast fashion* e ao crescimento populacional global, que já ultrapassa 8 bilhões de pessoas (Peters; Li; Lenzen, 2021; United Nations, 2022). Como consequência, a demanda por plásticos, especialmente os empregados na fabricação têxtil, continua em crescimento (Plastics Europe, 2022). Paralelamente, a busca por alternativas "naturais", como o algodão, também aumenta, embora sua produção envolva desafios ambientais distintos (Remy et al., 2015). Esse aumento da produção têxtil, tanto sintética quanto natural, intensifica a liberação de MFs e de compostos químicos tóxicos na água e no ar (Sarwar; Khan, 2022; Han; McQueen; Batcheller, 2024).

Apesar das MFs constituírem a forma mais abundante de plástico nos ecossistemas aquáticos, ainda persistem lacunas no entendimento de sua biodisponibilidade e impactos ecológicos (Barrows et al., 2018; Rebelein et al., 2021; Walkinshaw et al., 2023). Embora tanto as MFs sintéticas quanto celulósicas estejam amplamente distribuídas no ambiente, seu estudo em invertebrados marinhos permanece incipiente, particularmente no que concerne aos efeitos fisiológicos e à integridade dos habitats. Essa carência de conhecimento é agravada pela subestimação sistemática das fibras naturais, cuja detecção analítica é desafiadora e cujos aditivos químicos apresentam riscos toxicológicos comparáveis aos das fibras sintéticas (Remy et al., 2015; Zhang et al., 2019; Athey & Erdle, 2021).

Ao interagirem com a biota aquática (Barrows et al., 2018), as MFs não apenas afetam organismos individualmente, mas perturbam processos ecossistêmicos fundamentais. Sua dimensão microscópica permite a ingestão por zooplâncton (Fendall & Sewell, 2009), iniciando um processo de transferência trófica que atinge desde moluscos filtradores até aves limícolas (Lourenço et al., 2017; Zhang et al., 2022a). Esse mecanismo de biomagnificação, documentado por Cole et al. (2011), compromete a segurança alimentar e a saúde dos ecossistemas marinhos, evidenciando a necessidade urgente de pesquisas sobre os efeitos em cascata dessa contaminação.

Embora as MFs já tenham sido amplamente detectadas no ambiente aquático, ainda persistem lacunas significativas na compreensão de seus impactos sobre parâmetros ecológicos e na forma como interagem com outros contaminantes (Qualhato et al., 2023). Nesse cenário, os biomarcadores bioquímicos, moleculares e histopatológicos têm se consolidado como ferramentas indispensáveis na avaliação dos efeitos tóxicos em organismos aquáticos, especialmente em invertebrados, como os bivalves, frequentemente utilizados como bioindicadores ambientais devido à sua relevância ecológica, sensibilidade a poluentes e facilidade de amostragem (Hagger et al., 2006; Maranhão et al., 2012; Tkaczyk et al., 2021).

Essa abordagem integrada de biomarcadores torna-se especialmente relevante diante da crescente evidência da presença das (MFs) em organismos aquáticos. Estudos recentes têm detectado MFs em espécies como o mexilhão *Perna viridis* (Vasanthi et al., 2021), a ostra *Crassostrea gasar* (Lins et al., 2024) e o peixe-zebra (*Danio rerio*) (Chen et al., 2023). Essas fibras podem se emaranhar nos organismos ou serem capturadas pelas brânquias durante a filtração, alcançando o trato gastrointestinal, onde provocam danos físicos e fisiológicos (Mishra, Rath, Das, 2019; Rebelein et al., 2021). Por isso, as brânquias e glândulas digestivas se destacam como órgãos-alvo sensíveis à contaminação, sendo fundamentais para avaliações toxicológicas. As brânquias, pela sua ampla interface com o ambiente externo, são essenciais para o estudo de absorção de poluentes, atuando como a primeira barreira contra estressores externos (Beyer et al., 2017; Arman et al., 2021), enquanto as glândulas digestivas, responsáveis pelos processos de absorção e metabolismo, são indicadoras cruciais dos efeitos adversos de xenobióticos na saúde dos bivalves (Beyer et al., 2017).

Nesse contexto, diversos estudos têm demonstrado que a exposição a MFs causa danos significativos a organismos aquáticos, evidenciando o risco de contaminação em níveis tróficos variados. Por exemplo, Kim et al. (2021a) identificaram danos intestinais e mortalidade em crustáceos *Artemia franciscana*. Em estudos com peixes Medakas (*Oryzias latipes*), foram observados danos no epitélio das brânquias, aumento das células de muco no intestino e efeitos adversos, como estresse oxidativo e mortalidade (Kim et al., 2023a; Hu et al., 2020). Além disso, as MFs sintéticas demonstraram interferir no eixo hipotálamo-hipófise-gônada, impactando as funções endócrinas desses animais (Kim et al., 2023b). Nos bivalves, as consequências da exposição a MFs incluem alterações bioquímicas e histológicas nas brânquias e glândulas digestivas do mexilhão *Perna viridis*. Em *Mytilus galloprovincialis*, foram registrados danos teciduais, respostas inflamatórias, aumento da atividade da acetilcolinesterase, necrose, além da redução no número de biscoitos e na taxa de crescimento (Von Moos; Burkhardt-Holm; Köhler, 2012; Alnajjar; Jha; Turner, 2021; Choi et al., 2021; Walkinshaw et al., 2023).

Além dos impactos biológicos nos organismos aquáticos, as MFs podem liberar substâncias químicas prejudiciais, como corantes, biocidas, plastificantes, metais e

retardantes de chamas (Rovira; Domingo, 2019; Suaria et al., 2020). A liberação desses contaminantes pode ocorrer durante a degradação das fibras no ambiente marinho, decorrente das atividades da indústria têxtil. Ademais, muitos desses aditivos encontrados em regiões costeiras são considerados desreguladores endócrinos, o que agrava os impactos potenciais à saúde dos organismos aquáticos e das populações que dependem desses ecossistemas (Periyasamy, 2021).

Os impactos das MFs vão além dos organismos marinhos e afetam diretamente a saúde humana, já que essas fibras foram encontradas em produtos amplamente consumidos, como ostras, mexilhões, algas, peixes, cervejas, sal, mel e água encanada (Van Cauwenberghe; Janssen, 2014; Rochman et al., 2015; Li et al., 2020; Senathirajah et al., 2021; Li et al., 2021b). Isso gera preocupações com a segurança alimentar, especialmente porque MFs de celulose e plásticas já foram identificadas em pulmões humanos, potencialmente contribuindo para o risco de câncer (Pauly et al., 1998). Além disso, estudos recentes indicam a presença dessas fibras em amostras de sangue, fezes e urina humanas, reforçando que a poluição por MFs é um problema multifatorial com sérias implicações para a saúde pública e o meio ambiente (McCay & Mehta, 2024).

Diante dessa preocupação com a segurança alimentar, estudos realizados por Severini et al., (2019) demonstram a presença de MFs antropogênicas em ostras, com uma média de 4,2 fibras por indivíduo, indicando que esses organismos estão sendo afetados diretamente pela contaminação nas águas estuarinas, onde as MFs de origem das lavagens doméstica e industrial, bem como de estações de tratamento de esgoto se acumulam. Assim, a presença dessas fibras no ambiente marinho não só ameaça os ecossistemas, mas também representa um risco à saúde humana, uma vez que produtos contaminados são comercializados para consumo (Rochman et al., 2015; Severini et al., 2019).

Outro ponto agravante é a ausência de regulamentações globais específicas para a liberação de águas residuais contaminadas, somada ao aumento contínuo na produção de fibras têxteis, o que amplifica os riscos para os ecossistemas aquáticos (LE GUEN et al., 2020). A legislação ambiental que visa a liberação de MFs tem se tornado cada vez mais importante devido à sua ampla presença na água, no ar e até mesmo em seres humanos, onde representam riscos à saúde e ao meio ambiente (McCay & Mehta, 2024). Embora a poluição por MFs seja um problema global, as respostas regulatórias permanecem limitadas e fragmentadas. A França deu um passo pioneiro ao exigir que todas as novas máquinas de lavar vendidas a partir de 2025 incluam filtros de microfibras, visando reduzir as emissões em nível doméstico (McCay & Mehta, 2024; Luzi et al., 2025). No entanto, a maioria dos países não possui leis específicas que abordem a liberação de microfibras, recorrendo, em vez disso, a regulamentações mais amplas sobre o tratamento de águas residuais, que muitas vezes são insuficientes para capturar essas partículas (Mishra et al., 2020; Luzi et al., 2025).

Essa situação reforça a necessidade de ações voltadas à conservação e ao uso sustentável dos recursos marinhos, em consonância com o ODS 14, que busca reduzir a poluição dos oceanos (ONU, 2015), incluindo resíduos como MFs. Além disso, a contaminação das águas por essas partículas afeta diretamente o ODS 6, que trata da gestão sustentável da água e do saneamento, comprometendo a qualidade da água e impactando tanto organismos aquáticos quanto a saúde humana (ONU, 2015). Diante desse cenário, é imprescindível investir em pesquisas que avaliem as interações entre MFs e invertebrados marinhos para embasar ações de mitigação e políticas públicas eficazes (REMY et al., 2015; GAGO et al., 2018).

Frente a essa lacuna regulatória, as culturas de frutos do mar, predominantemente realizadas em sistemas abertos no oceano, tornam-se particularmente vulneráveis à contaminação por poluentes, como os microplásticos (VAN CAUWENBERGHE; JANSSEN, 2014). Entre eles, as MFs sintéticas são as mais prevalentes nesses organismos (BARROWS; CATHEY; PETERSEN, 2018; SFRISO et al., 2024). No entanto, apesar de sua predominância, poucos estudos abordam os efeitos tanto das MFs sintéticas quanto dos naturais em nível de órgãos e tecidos (HU et al., 2020). Investigá-los é fundamental para compreender os impactos dessas fibras no meio ambiente e nos organismos marinhos, como as ostras, o que ajudará a esclarecer os efeitos potenciais ao longo da cadeia alimentar e na segurança alimentar (LADEWIG; BAO; CHOW, 2015; WALKINSHAW et al., 2023). Além disso, contribuirá para formar nova base de conhecimento para futuras legislações e tomadas de decisão sobre a gestão de MFs em ecossistemas marinhos.

Tendo isso em vista, este trabalho se divide em dois capítulos em formato de artigo científico. O primeiro capítulo apresenta a taxa de sobrevivência e os potenciais efeitos das microfibras em ostras de mangue (*Crassostrea gasar*), avaliados a partir de biomarcadores bioquímicos. Essa abordagem permite identificar respostas iniciais de estresse oxidativo, contribuindo para compreender os mecanismos fisiológicos envolvidos na toxicidade desses contaminantes emergentes. O capítulo dois aprofunda a pesquisa ao explorar os efeitos teciduais das microfibras nas ostras. Para isso, são utilizadas análises de índice de condição, morfometria das brânquias, contagem de células de muco e histopatologia, oferecendo uma visão integrada sobre alterações funcionais e estruturais desencadeadas pela exposição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACHARYA S, RUMI SS, HU Y, ABIDI N. Microfibers from synthetic textiles as a major source of microplastics in the environment: A review. **Textile Research Journal**. Sep;91(17-18):2136-56, 2021.
- ALEX, R. K., MUHAMMED, T. M., KANNANKAI, M. P., RADHAKRISHNAN, A., BORAH, A., REGHUVARAN, A., & DEVIPRIYA, S. P. Microfiber pollution: Assessment, emission estimation, and time-series-based forecast of microfibers from domestic washing machine laundering and mitigation measures. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v.20 (6), 2024.
- ARMAN, S. Effects of acute triclosan exposure on gill and liver tissues of zebrafish (*Danio rerio*). In **Annales de Limnologie-international journal of limnology** (Vol. 57, p. 6). EDP Sciences, 2021.
- BARROWS, A. P. W., CATHEY, S. E., & PETERSEN, C. W. Marine environment microfiber contamination: Global patterns and the diversity of microparticle origins. **Environmental pollution**, 237, 275-284, 2018.
- BELZAGUI, F., GUTIÉRREZ-BOUZÁN, C., ÁLVAREZ-SÁNCHEZ, A., & VILASECA, M. Textile microfibers reaching aquatic environments: A new estimation approach. *Environmental Pollution*, 265, 114889, 2020.
- BEYER, J., GREEN, N. W., BROOKS, S., ALLAN, I. J., RUUS, A., GOMES, T., BRÅTE, I. L. SCHØYEN, M. Blue mussels (*Mytilus edulis* spp.) as sentinel organisms in coastal pollution monitoring: a review. *Marine environmental research*, 130, 338-365, 2017.
- BROWNE, M. A.; CRUMP, P.; NIVEN, S.J.; TEUTEN, E.; TONKIN, A.; GALLOWAY, T.; THOMPSON, R. C. Accumulation of Microplastic on Shorelines Worldwide: Sources and Sinks. **Environmental Science & Technology**, v. 45, n. 21, p. 9175–9179, 1 nov. 2011.
- CARR, S. A. Sources and dispersive modes of micro-fibers in the environment. **Integrated environmental assessment and management**, 13(3), 466-469, 2017.
- CHEN, Q., GAO, Z., WANG, K., MAGNUSON, J. T., CHEN, Y., LI, M., SHI, H., XU, L. High accumulation of microplastic fibers in fish hindgut induces an enhancement of triphenyl phosphate hydroxylation. **Environmental Pollution**, 317, 120804, 2023.
- COLE, M., LINDEQUE, P., HALSBAND, C., GALLOWAY, T. S. Microplastics as contaminants in the marine environment: a review. **Marine pollution Bulletin**, 62(12), 2588-2597, 2011.
- DE FALCO, F., DI PACE, E., COCCA, M., & AVELLA, M. The contribution of washing processes of synthetic clothes to microplastic pollution. **Scientific reports**, 9(1), 6633, 2019.

- DOMINGUES, I., AGRA, A. R., MONAGHAN, K., SOARES, A. M., & NOGUEIRA, A. J. Cholinesterase and glutathione-S-transferase activities in freshwater invertebrates as biomarkers to assess pesticide contamination. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 29(1), 5-18, 2010.
- DREILLARD, M., BARROS, C. D. F., ROUCHON, V., EMONNOT, C., LEFEBVRE, V., MOREAUD, M., GUILLAUME, D., RIMBAULT, F., PAGEREY, F. Quantification and morphological characterization of microfibers emitted from textile washing. **Science of the Total Environment**, 832, 154973, 2022.
- FENDALL, L. S.; SEWELL, M. A. Contributing to marine pollution by washing your face: microplastics in facial cleansers. **Marine pollution bulletin**, 58(8), 1225-1228, 2009.
- HAGGER, J. A., JONES, M. B., LEONARD, D. P., OWEN, R., & GALLOWAY, T. S. Biomarkers and integrated environmental risk assessment: are there more questions than answers?. **Integrated Environmental Assessment and Management: An International Journal**, 2(4), 312-329, 2006.
- HAN, J., MCQUEEN, R. H., & BATCHELLER, J. C. From fabric to fallout: A systematic review of the impact of textile parameters on fibre fragment release. **Textiles**, 4(4), 459-492, 2024.
- HENRY, B., LAITALA, K., & KLEPP, I. G. Microfibres from apparel and home textiles: Prospects for including microplastics in environmental sustainability assessment. **Science of the total environment**, 652, 483-494, 2019.
- JAVED, M., AHMAD, I., USMANI, N., & AHMAD, M. Studies on biomarkers of oxidative stress and associated genotoxicity and histopathology in *Channa punctatus* from heavy metal polluted canal. **Chemosphere**, 151, 210-219, 2016.
- RAY, Sajal. Levels of toxicity screening of environmental chemicals using aquatic invertebrates-a review. **Invertebrates-Experimental Models in Toxicity Screening**, 2016.
- JEMEC, A., DROBNE, D., TIŠLER, T., & SEPČIĆ, K. Biochemical biomarkers in environmental studies—lessons learnt from enzymes catalase, glutathione S-transferase and cholinesterase in two crustacean species. **Environmental Science and Pollution Research**, 17, 571-581, 2010.
- KAMMENG J.E., DALLINGER R., DONKER M.H., KÖHLER H.R., SIMONSEN V., TRIEBSKORN R., WEEKS J.M. Biomarkers in terrestrial invertebrates for ecotoxicological soil risk assessment. **Rev Environ. Contam. Toxicol.** 164:93-147. PMID: 12587835, 2000.
- LADEWIG, S. M.; BAO, S.; CHOW, A. T. Natural Fibers: A Missing Link to Chemical Pollution Dispersion in Aquatic Environments. *Environmental Science & Technology*, v. 49, n. 21, p. 12609–12610, 3 nov., 2015.
- LI, Y., LU, Q., XING, Y., LIU, K., LING, W., YANG, J., YANG, Q., WU, T., ZHANG, J. PEI, Z., GAO, Z., LI, X., YANG, F., MA, H., LIU, K., ZHAO, D. Review of research on migration, distribution, biological effects, and analytical

- methods of microfibers in the environment. **Science of the Total Environment**, 855, 158922, 2023.
- LINS, L. R. D. R. T., SALDAÑA-SERRANO, M., DE MIRANDA GOMES, C. H. A., PILOTTO, M. R., BÔAS, L. O. D. B. V., DA COSTA, D. M., BASTOLLA, C. L. V., LIMA, D., TEDESCO, M., FERREIRA, T. H. F., LUNELLI, P. S., OLIVEIRA, A. P. N., BAINY, A. C. D., NOGUEIRA, D. J. Ingestion and depuration of polyester microfibers by *Crassostrea gasar* (Adanson, 1757). **Marine Environmental Research**, 196, 106433, 2024.
- LIU, K., WU, T., WANG, X., SONG, Z., ZONG, C., WEI, N., & LI, D. Consistent transport of terrestrial microplastics to the ocean through atmosphere. **Environmental science & technology**, 53(18), 10612-10619, 2019.
- LOURENCO, P. M., SERRA-GONCALVES, C., FERREIRA, J. L., CATRY, T., & GRANADEIRO, J. P. Plastic and other microfibers in sediments, macroinvertebrates and shorebirds from three intertidal wetlands of southern Europe and west Africa. *Environmental pollution*, 231, 123-133, 2017.
- MARANHO, L. A., PEREIRA, C. D. S., CHOUERI, R. B., CESAR, A., GUSSO-CHOUERI, P. K., TORRES, R. J., ABESSA, D. M. S., MORAIS, R. D., MOZETO, A. A., DELVALLS, T. A., MARTÍN-DÍAZ, M. L. The application of biochemical responses to assess environmental quality of tropical estuaries: field surveys. *Journal of Environmental Monitoring*, 14(10), 2608-2615, 2012.
- MISHRA, S.; RATH, C. CHARAN; DAS, A. P. Marine microfiber pollution: A review on present status and future challenges. **Marine Pollution Bulletin**, v. 140, p. 188–197, mar. 2019.
- NAPPER, I. E., THOMPSON, R. C. Release of synthetic microplastic plastic fibres from domestic washing machines: Effects of fabric type and washing conditions. **Marine pollution bulletin**, 112(1-2), 39-45, 2016.
- PEDROTTI, M. L., PETIT, S., EYHERAGUIBEL, B., KERROS, M. E., ELINEAU, A., GHIGLIONE, J. F., LORET, J. F., ROSTAN, A., GORSKY, G. Pollution by anthropogenic microfibers in North-West Mediterranean Sea and efficiency of microfiber removal by a wastewater treatment plant. **Science of the Total Environment**, 758, 144195, 2021.
- PELLER, J. R., EBERHARDT, L., CLARK, R., NELSON, C., KOSTELNIK, E., & ICEMAN, C. Tracking the distribution of microfiber pollution in a southern Lake Michigan watershed through the analysis of water, sediment and air. **Environmental Science: Processes & Impacts**, 21(9), 1549-1559, 2019.
- PETERS, G.; LI, M.; LENZEN, M. The need to decelerate fast fashion in a hot climate - A global sustainability perspective on the garment industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 295, p. 126390, maio 2021.
- PLASTICS EUROPE. **Plastics - the Facts**, 2022. Disponível em: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2022/>. Acesso em: 27 abr. 2023.

- QUALHATO, G., VIEIRA, L. G., OLIVEIRA, M., & ROCHA, T. L. Plastic microfibers as a risk factor for the health of aquatic organisms: a bibliometric and systematic review of plastic pandemic. **Science of The Total Environment**, 870, 161949, 2023.
- RAY, Sajal. Levels of toxicity screening of environmental chemicals using aquatic invertebrates-a review. **Invertebrates-Experimental Models in Toxicity Screening**, 2016.
- REBELEIN, A.; INT-VEEN, I.; KAMMAM, U.; SCHARSACK, J. P. Microplastic fibers — Underestimated threat to aquatic organisms? **Science of The Total Environment**, v. 777, p. 146045, jul. 2021.
- REMY, F.; COLLARD, F.; GILBERT, B.; COMPÈRE, P.; EPPE, G.; LEPOINT, G. When Microplastic Is Not Plastic: The Ingestion of Artificial Cellulose Fibers by Macrofauna Living in Seagrass Macrophytodebris. **Environmental Science & Technology**, v. 49, n. 18, p. 11158–11166, 15 set. 2015.
- SARWAR, T., & KHAN, S. Textile industry: pollution health risks and toxicity. In **Textile Wastewater Treatment: Sustainable Bio-nano Materials and Macromolecules**, Volume 1 (pp. 1-28). Singapore: Springer Nature Singapore, 2022.
- SOUSA, C. S., SUN, J., & MESTRE, N. C. Potential biomarkers of metal toxicity in deep-sea invertebrates—A critical review of the omics data. **Science of the Total Environment**, 951, 175628, 2024.
- TKACZYK, A., BOWNIK, A., DUDKA, J., KOWAL, K., & ŚLASKA, B. Daphnia magna model in the toxicity assessment of pharmaceuticals: A review. **Science of the Total Environment**, 763, 143038, 2021.
- UNITED NATIONS. **World population prospects.**, 2022. Disponível em: <https://population.un.org/wpp/>. Acesso em 15. mar. 2023.
- VASANTHI, R. L., ARULVASU, C., KUMAR, P., & SRINIVASAN, P. Ingestion of microplastics and its potential for causing structural alterations and oxidative stress in Indian green mussel *Perna viridis*—A multiple biomarker approach. **Chemosphere**, 283, 130979, 2021.
- VASSILENKO, E., WATKINS, M., CHASTAIN, S., MERTENS, J., POSACKA, A. M., PATANKAR, S., & ROSS, P. S. Domestic laundry and microfiber pollution: Exploring fiber shedding from consumer apparel textiles. **Plos one**, 16(7), e0250346, 2021.
- WALKINSHAW, C.; TOLHURST, T. J.; LINDEQUE, P. K.; THOMPSON, R. C.; COLE, M. Impact of polyester and cotton microfibers on growth and sublethal biomarkers in juvenile mussels. **Microplastics and Nanoplastics**, v. 3, n. 1, p. 5, 13 fev. 2023.
- ZAMBRANO, M. C.; PAWLAK, J. J.; DAYSTAR, J.; ANKENY, M.; CHENG, J. J.; VENDITTI, R. A. Microfibers generated from the laundering of cotton, rayon and

polyester based fabrics and their aquatic biodegradation. **Marine Pollution Bulletin**, v. 142, p. 394–407, maio, 2019.

ZHANG, F., MAN, Y. B., MO, W. Y., MAN, K. Y., & WONG, M. H. Direct and indirect effects of microplastics on bivalves, with a focus on edible species: A mini-review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, 50(20), 2109–2143, 2019.

ZHANG, Y. Q., LYKAKI, M., MARKIEWICZ, M., ALRAJOUA, M. T., KRAAS, C., STOLTE, S. Environmental contamination by microplastics originating from textiles: Emission, transport, fate and toxicity. **Journal of Hazardous Materials**, 430, 128453, 2022a.

2. HIPÓTESE

Este estudo parte da hipótese de que as MFs sintéticas de poliéster, naturais de celulose e suas combinações, em diferentes concentrações ambientais (0,11 mg. L⁻¹ e 1,00 mg. L⁻¹) causam toxicidade, resultando em alterações nas respostas celulares, bioquímicas e histológicas em ostras da espécie *Crassostrea gasar*.

3. OBJETIVO GERAL

Avaliar os efeitos em diferentes níveis de organização biológica resultantes da exposição a microfibras de diferentes tecidos: sintético (poliéster), natural (algodão convencional e orgânico) e a mistura (algodão convencional + poliéster) na ostra do mangue *Crassostrea gasar*.