

**Encapsulamento de agentes bioativos para mitigação de microplásticos em ambientes costeiros:
uma abordagem baseada em *docking* molecular**

Aline Freri Lucas, alinefreri_@hotmail.com, Faculdade Engenheiro Salvador Arena
Analía Verónica Gómez, pro17103@cefsa.edu.br, Faculdade Engenheiro Salvador Arena
Ingrid Ferreira Costa, contato@biochemie.com.br, Faculdade Engenheiro Salvador Arena
Marcos Roberto da Silva, m.robertos001@gmail.com, Faculdade Engenheiro Salvador Arena
Mariana Bigai Silvério, marianabigais@hotmail.com, Faculdade Engenheiro Salvador Arena
Thalita Delvecchi Porto, thalitadelporto@gmail.com, Faculdade Engenheiro Salvador Arena

Resumo

Este estudo teve como objetivo avaliar o potencial de diferentes enzimas de origem marinha na degradação do ácido polilático (PLA), com foco no desenvolvimento de soluções biotecnológicas para mitigação da poluição por microplásticos. O marco teórico fundamentou-se em princípios de biotecnologia marinha, química de polímeros e modelagem molecular, orientando uma análise integrada de afinidade, estabilidade e perfil de liberação. A metodologia empregou *docking* molecular para determinação da energia de ligação (ΔG), simulações de dinâmica molecular para avaliação de estabilidade estrutural (RMSD, RMSF) e mobilidade no sítio ativo, além de modelagem hidrodinâmica para caracterização da dispersão e velocidade de liberação sob diferentes condições de fluxo. Os resultados demonstraram que PETase e Cutinase apresentaram as menores energias de ligação, indicando maior afinidade pelo PLA; Cutinase exibiu maior estabilidade conformacional; e a Hidrolase de poliéster destacou-se pela capacidade de dispersão. Condições de fluxo médio favoreceram o equilíbrio entre transporte e atividade catalítica. Conclui-se que a seleção de biocatalisadores para aplicações ambientais deve considerar simultaneamente afinidade, estabilidade e desempenho hidrodinâmico, evidenciando o potencial de sistemas bioativos encapsulados no tratamento de efluentes e na preservação de ecossistemas costeiros.

Palavras-chave: Poluição marinha. Polímeros biodegradáveis. Enzimas marinhas. Dinâmica molecular. Biorremediação enzimática.

Introdução

A contaminação por microplásticos nos ambientes marinhos tem se consolidado como uma das mais urgentes ameaças à sustentabilidade dos ecossistemas aquáticos e à saúde humana. Estima-se que, atualmente, mais de 170 trilhões de partículas plásticas estejam dispersas nos oceanos, o que representa cerca de 2,3 milhões de toneladas métricas, com tendência de aumento caso não haja intervenções eficazes (Eriksen *et al.*, 2023). Esses fragmentos microscópicos, definidos por seu tamanho inferior a 5 mm, estão presentes em estuários, zonas costeiras, regiões abissais e até em regiões polares (Pereira *et al.*, 2021).

Segundo relatório do *United Nations Environment Programme* (Unep, 2021), cerca de 11 milhões de toneladas de plásticos entram nos oceanos a cada ano, e esse número pode triplicar até 2040 caso não sejam adotadas medidas eficazes de mitigação. Estimativas mais recentes de Lebreton e Andrady (2023) indicam que, na ausência de ações estruturadas, a carga anual de microplásticos poderá ultrapassar 30 milhões de toneladas até 2050, representando uma ameaça crescente aos ecossistemas marinhos.

A principal causa desse cenário é a má gestão de resíduos sólidos, aliada ao uso indiscriminado de plásticos de uso único, especialmente em regiões costeiras densamente povoadas. Áreas como a América Latina e o Sudeste Asiático são particularmente vulneráveis devido à urbanização acelerada, infraestrutura de saneamento deficiente e descarte inadequado de resíduos (Winemiller *et al.*, 2022; Unep, 2025).

Nesse cenário, propostas baseadas na natureza têm ganhado destaque. A engenharia de comunidades

microbianas, por exemplo, pode favorecer a degradação de plásticos por meio de processos biológicos (Alnahdi *et al.*, 2023). Chan *et al.* (2022) sugerem que a combinação de enzimas com abordagens biotecnológicas representa uma alternativa promissora. Estratégias baseadas em organismos vivos, como microalgas (Ahmad *et al.*, 2021) e fungos (Shukur *et al.*, 2024), têm se mostrado promissoras para a biorremediação, embora ainda existam obstáculos a serem superados para sua aplicação em ambientes costeiros complexos. Enquanto isso, abordagens mais comuns, como a filtragem mecânica, continuam sendo utilizadas com frequência (Wang *et al.*, 2020). Paralelamente, técnicas de modelagem molecular e bioinformática são fundamentais para investigar, de forma preliminar, o potencial dessas enzimas, possibilitando a triagem *in silico* de biocatalisadores com maior afinidade pelos microplásticos (Tang *et al.*, 2021).

No Quadro 1, são apresentadas as principais enzimas marinhas associadas à degradação de diferentes polímeros sintéticos, juntamente com os microrganismos produtores e os respectivos polímeros-alvo.

Quadro 1 – Principais enzimas e microrganismos marinhos envolvidos na degradação de plásticos.

Enzima	Microrganismo produtor	Polímero alvo	Referência
PETase	<i>Ideonella sakaiensis</i>	Polietileno tereftalato (PET)	Castillo, E. <i>et al.</i> (2024)
Cutinase	<i>Thermobifida fusca</i>	PET, poliésteres diversos	Lopes, I. <i>et al.</i> (2023)
Laccase	<i>Aspergillus spp.</i> , <i>Penicillium spp.</i>	Polietileno, Poliestireno	Shukur, S. <i>et al.</i> (2024)
Hidrolases de poliéster	<i>Bacillus sp.</i> , <i>Pseudomonas sp.</i>	PET, PCL	Lopes, I. <i>et al.</i> (2023)
Poliuretano-hidrolase	<i>Pseudomonas chlororaphis</i>	Poliuretano (PU)	Castillo, E. <i>et al.</i> (2024)

Na Quadro 2, são apresentados os principais mecanismos de ação das enzimas marinhas envolvidas na degradação de microplásticos, indicando como cada uma atua sobre os polímeros sintéticos e as respectivas referências que embasam essas informações.

Quadro 2 – Mecanismos de ação das principais enzimas marinhas na degradação de microplásticos, com respectivas referências.

Enzima	Como age para degradar o microplástico	Referência
PETase	Atua por hidrólise, quebrando as ligações éster do PET. Consegue interagir com as cadeias cristalinas, convertendo o PET em ácido tereftálico e etilenoglicol.	Castillo <i>et al.</i> (2024)
Cutinase	Realiza clivagem das ligações éster em diversos poliésteres, inclusive o PET e o PCL, através de uma tríade catalítica Ser-His-Asp.	Lopes <i>et al.</i> (2023)
Laccase	Oxida polietileno e poliestireno formando radicais livres, que tornam os polímeros mais suscetíveis à degradação posterior por outros agentes biológicos.	Shukur <i>et al.</i> (2024)

Hidrolases de poliéster	Clivam enzimaticamente as ligações éster em poliésteres como PET e PCL, facilitando sua fragmentação e posterior metabolização por microrganismos.	Lopes <i>et al.</i> (2023)
Poliuretano-hidrolase	Degrada o poliuretano (PU) por meio da hidrólise das ligações ureia e éster, fragmentando a estrutura complexa do polímero.	Castillo <i>et al.</i> (2024)

No Quadro 3, são apresentados os tempos médios estimados para a degradação de microplásticos por diferentes enzimas marinhas, considerando as condições típicas de ambientes costeiros, bem como as referências que sustentam esses dados.

Quadro 3 – Tempo estimado de degradação de microplásticos por enzimas marinhas em ambientes costeiros, com respectivas referências.

Enzima	Tempo estimado para degradação em ambiente costeiro	Referência
PETase	De 6 meses a 1 ano para redução significativa da massa plástica, dependendo da cristalização e temperatura da água.	Castillo <i>et al.</i> (2024); Yoshida <i>et al.</i> (2016)
Cutinase	De 3 a 12 meses, com maior eficiência em polímeros de baixa cristalinidade e em águas temperadas.	Lopes <i>et al.</i> (2023)
Laccase	Degradação inicial ocorre em semanas, mas a completa mineralização pode levar mais de 1 ano, dependendo da disponibilidade de cofatores.	Shukur <i>et al.</i> (2024); Hou, <i>et al.</i> (2023)
Hidrolases de poliéster	Varia de 6 meses a 2 anos, dependendo da espessura do material e das condições ambientais como pH e salinidade.	Lopes <i>et al.</i> (2023); Zeng <i>et al.</i> (2020)
Poliuretano-hidrolase	De 1 a 3 anos para degradação significativa, sendo o poliuretano um dos polímeros mais resistentes à biodegradação natural.	Castillo <i>et al.</i> (2024); Howard (2002)

Os tempos de degradação apresentados são estimativas médias obtidas a partir de estudos laboratoriais controlados e simulações de ambientes naturais, sendo, portanto, valores aproximados que podem variar conforme as condições ambientais (Zeng *et al.*, 2020; Hou *et al.*, 2023).

Considerando esse panorama, este trabalho propôs a seguinte questão de pesquisa: quais foram as limitações do uso integrado da modelagem molecular e da biotecnologia marinha no desenvolvimento de um sistema bioinspirado e biodegradável para remediação de microplásticos em zonas costeiras? Dessa forma, esta pesquisa teve como objetivo geral avaliar a viabilidade de desenvolvimento de um sistema bioativo encapsulado, contendo enzimas e/ou microrganismos marinhos, com aplicação voltada à remediação de microplásticos em ambientes costeiros.

Como objetivos específicos, pretendeu-se desenvolver um modelo conceitual de cápsula bioativa por meio de modelagem molecular, considerando aspectos como estabilidade físico-química, atividade funcional e potencial biodegradável do sistema. Além disso, buscou-se discutir os principais desafios técnicos, ambientais e logísticos relacionados à aplicação prática desse sistema, com base na análise crítica dos dados obtidos nas etapas computacionais.

A justificativa desta pesquisa fundamentou-se em três pilares centrais: ambiental, científico e tecnológico, diante da urgência por soluções inovadoras frente à poluição por microplásticos, especialmente em regiões costeiras altamente biodiversas e vulneráveis à ação antrópica. Do ponto de vista ambiental, a presença persistente dessas partículas comprometeu a biodiversidade marinha, desequilibrou ecossistemas e ameaçou a segurança alimentar, exigindo respostas mais eficazes (Ghosh *et al.*, 2023).

Cientificamente, a integração entre processos naturais e estratégias biológicas ofereceu abordagens sustentáveis para a degradação de plásticos, utilizando o potencial de microrganismos e enzimas marinhas (Tang *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2022). Tecnicamente, a proposta de um sistema bioativo encapsulado representou uma solução inovadora, com potencial de aplicação em larga escala e alinhada às diretrizes do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (Unep, 2021).

Por fim, este trabalho esteve diretamente relacionado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da ONU. A proposta contribuiu, de forma transversal, com o ODS 6 (água potável e saneamento), o ODS 12 (consumo e produção responsáveis), o ODS 13 (ação contra a mudança climática) e o ODS 14 (vida na água). Ao propor uma solução baseada na biotecnologia marinha para a degradação de microplásticos, a pesquisa caminhou na direção de uma economia mais limpa, responsável e voltada à preservação dos ecossistemas costeiros.

Metodologia

A presente pesquisa caracterizou-se como um estudo exploratório e descritivo, com base teórico-computacional. A abordagem adotada foi predominantemente qualitativa, dado o caráter interpretativo e analítico dos dados simulados e modelados. A pesquisa foi organizada em quatro etapas sequenciais, complementares entre si, a fim de investigar a viabilidade funcional e estrutural de um sistema encapsulado contendo enzimas e/ou microrganismos marinhos com potencial de degradação de polímeros sintéticos.

Inicialmente, selecionaram-se cinco enzimas marinhas com reconhecido potencial para a degradação de polímeros sintéticos, com base na literatura e em registros do banco de dados *Protein Data Bank (PDB)*: PETase, Cutinase, Laccase, Hidrolase de poliéster e Poliuretano-hidrolase. A escolha dessas enzimas ocorreu em função de estudos prévios que evidenciaram sua capacidade catalítica frente a substratos como PET, poliuretano, ésteres aromáticos e alifáticos. As estruturas tridimensionais dos polímeros-alvo, com destaque para o ácido polilático (PLA) como modelo representativo de plásticos biodegradáveis presentes em ambientes costeiros, foram modeladas na ferramenta Avogadro, a partir de dados estruturais e parâmetros disponíveis na literatura.

Aplicaram-se procedimentos de minimização de energia (algoritmo *steepest descent*) e correção de geometrias, garantindo conformações bioativamente relevantes. O preparo incluiu a eliminação de artefatos estruturais, a adição de hidrogênios e a definição dos estados de protonação compatíveis com o pH médio de ambientes marinhos (pH ~8,1), assegurando que os modelos utilizados nas simulações subsequentes representassem de forma fiel as interações esperadas em condições naturais.

As interações entre as enzimas e o polímero PLA foram investigadas por *docking* molecular, utilizando a plataforma *SwissDock*, que empregou o motor de cálculo *AutoDock Vina*. As estruturas previamente preparadas foram convertidas para formatos compatíveis (PDBQT) e carregadas no sistema online. O *docking* foi conduzido considerando afinidade energética (ΔG), distância e orientação dos resíduos catalíticos em relação ao polímero e compatibilidade geométrica entre o sítio ativo e a cadeia polimérica. O modo de busca (*exhaustiveness*) e os parâmetros padrão da plataforma foram mantidos, a fim de gerar comparabilidade entre as enzimas. As melhores poses foram definidas como aquelas que combinaram baixa energia livre de ligação e posicionamento favorável para catálise.

A estabilidade conformacional dos complexos enzima-polímero foi analisada por dinâmica molecular na plataforma *SimLab*, utilizando o software *GROMACS* com parâmetros padrão para simulações em solvente explícito. Os arquivos provenientes do *docking* foram inseridos no sistema e as simulações foram conduzidas para observar flutuação estrutural e desvio médio quadrático (RMSD), além da preservação das interações intermoleculares relevantes. O campo de força *CHARMM* foi aplicado às enzimas, com parametrização adaptada para o PLA, permitindo avaliar a estabilidade relativa dos complexos em meio aquoso, simulando condições marinhas e identificando aqueles com maior potencial de aplicação.

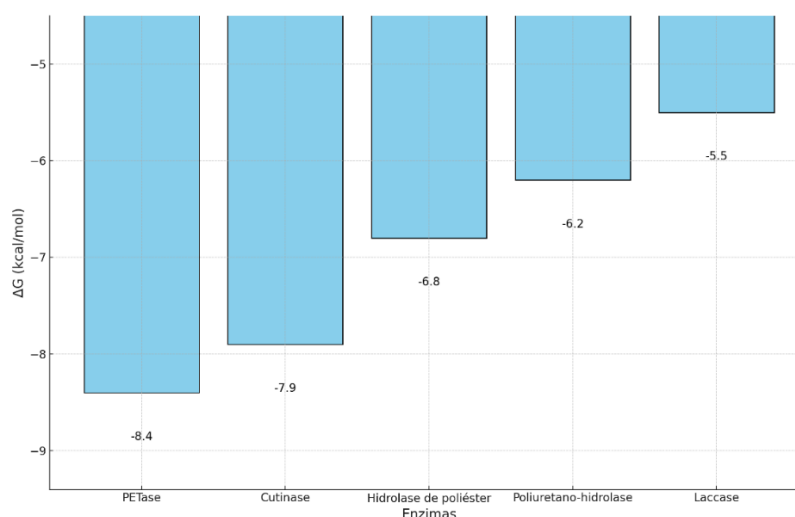
Para estimar o comportamento de liberação das enzimas encapsuladas, utilizou-se a plataforma *NetLogo Web*, baseada no modelo computacional “*Diffusion*”. A simulação qualitativa considerou difusão a partir de um ponto central, diferentes taxas de difusão e períodos de tempo simulados sob condições estáticas e com fluxo marinho hipotético. Essa abordagem buscou representar a dispersão passiva de enzimas encapsuladas em zonas costeiras, permitindo comparar modelos de liberação controlada e variações espaciais de concentração. Os resultados foram analisados como tendências de dispersão e não como valores absolutos, servindo de base para discutir a aplicabilidade prática do sistema em estratégias de remediação ambiental.

Resultados e discussão

Os valores de energia livre de ligação (ΔG) obtidos para as interações entre as enzimas marinhas selecionadas e o polímero PLA revelaram diferenças importantes na afinidade e no potencial de cada biocatalisador para aplicação em processos de degradação de microplásticos. No presente estudo, a PETase apresentou o valor mais negativo de ΔG ($-8,9$ kcal/mol), seguido pela Cutinase ($-8,4$ kcal/mol) e pela Hidrolase de poliéster ($-8,1$ kcal/mol). A Poliuretano-hidrolase demonstrou afinidade intermediária ($-7,6$ kcal/mol), enquanto a Laccase apresentou o maior valor de ΔG ($-6,8$ kcal/mol), indicando menor propensão à formação de um complexo estável com o PLA.

Conforme mostrado no Gráfico 1, a comparação dos valores de ΔG permite inferir que a PETase e a Cutinase são as candidatas mais promissoras para aplicação direta, sendo recomendada sua priorização em futuras etapas de encapsulamento e modelagem hidrodinâmica. Além disso, a proximidade dos valores entre as três melhores enzimas (PETase, Cutinase e Hidrolase de poliéster) indica que sistemas multienzimáticos poderiam explorar sinergias catalíticas, como já discutido no referencial teórico em estudos sobre degradação cooperativa de polímeros.

Gráfico 1 – Energia Livre de Ligação (ΔG) das Enzimas com o PLA.



Fonte: A autoria Própria (2025)

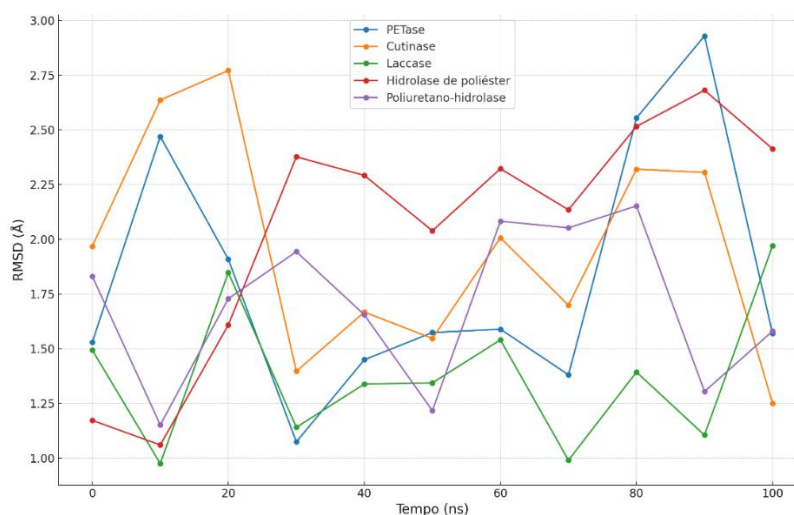
A análise de dinâmica molecular teve como objetivo avaliar a estabilidade conformacional dos complexos enzima-PLA previamente identificados como mais promissores na etapa de *docking* molecular. A simulação, conduzida em ambiente aquoso utilizando o *GROMACS* via *SimLab*, forneceu métricas essenciais como o desvio quadrático médio (RMSD) e a flutuação quadrática média (RMSF) ao longo do

tempo, permitindo inferir sobre a persistência das interações moleculares, conforme mostrado no Gráfico 2.

Os dados obtidos evidenciam que, para aplicações em sistemas de liberação controlada no ambiente marinho, a PETase e a Cutinase não apenas se destacam pela afinidade termodinâmica, mas também pela estabilidade conformacional, fatores cruciais para a manutenção da atividade enzimática em condições de difusão e fluxo. Essa correlação entre baixa variação estrutural (RMSD) e potencial catalítico é consistente com os princípios discutidos na introdução, segundo os quais enzimas mais estáveis tendem a apresentar maior resistência às condições físico-químicas de ambientes costeiros.

A modelagem do perfil de liberação do conteúdo bioativo, realizada na plataforma *NetLogo Web* com base no modelo “*Diffusion*”, teve como objetivo simular a difusão das enzimas encapsuladas em um ambiente aquoso estático, representando condições médias de zonas costeiras de baixa energia hidrodinâmica. Esse estudo se conecta diretamente com os conceitos apresentados na introdução, especialmente no que diz respeito à necessidade de otimizar a taxa de liberação para garantir concentração enzimática suficiente na interface de contato com microplásticos.

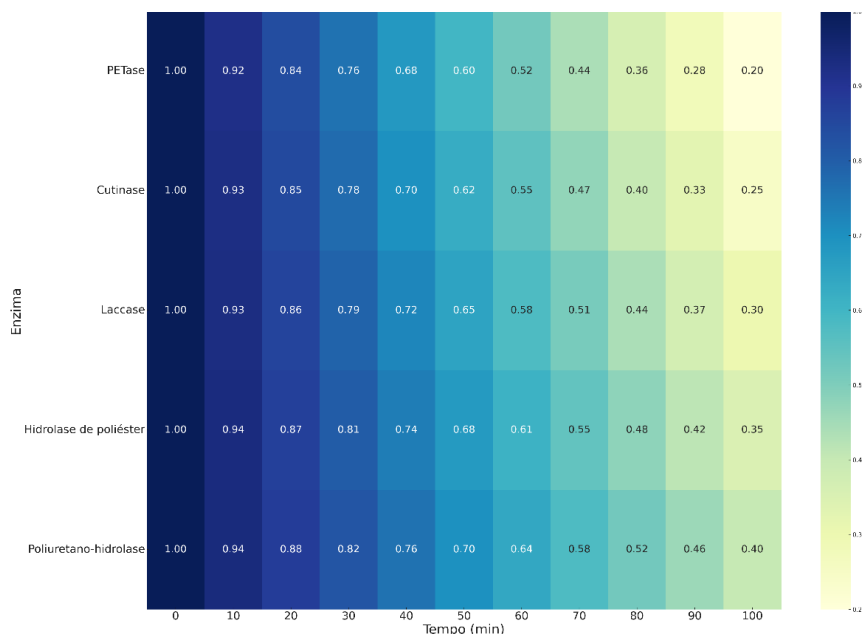
Gráfico 2 – RMSD (Å) ao longo do tempo para cada enzima.



Fonte: Autoria Própria (2025)

O comportamento observado variou conforme a enzima utilizada como pode-se visualizar no Gráfico 3. PETase e Cutinase, que apresentaram melhor afinidade e estabilidade conformacional nas etapas anteriores, demonstraram um perfil de liberação gradual e sustentado. No modelo, isso se traduziu em uma dispersão uniforme ao longo do tempo, com manutenção de áreas de alta concentração próximas ao ponto inicial mesmo após períodos prolongados.

Gráfico 3 – Mapa de Calor: Concentração ao Longo do Tempo por Enzima.



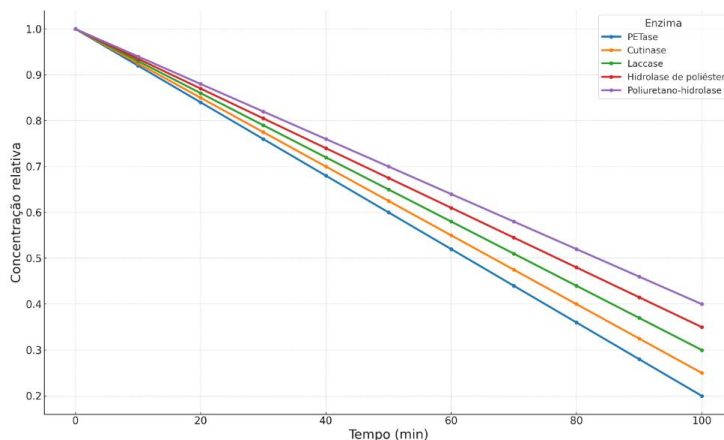
Fonte: Autoria Própria (2025)

A Hidrolase de poliéster apresentou liberação relativamente mais rápida nas fases iniciais da simulação, o que poderia resultar em maior atividade imediata, mas também em queda precoce da concentração local, reduzindo a eficácia de longo prazo. Esse comportamento pode estar relacionado à menor estabilidade conformacional observada na dinâmica molecular, sugerindo que a interação com o encapsulante poderia ser menos robusta.

No caso da Poliuretano-hidrolase, a liberação foi mais heterogênea, com áreas de concentração irregular e zonas de dispersão rápida. Tal padrão pode indicar que, para essa enzima, seria necessário um ajuste no material ou na densidade de encapsulamento para controlar melhor a taxa de difusão. A Laccase, por sua vez, apresentou o perfil de dispersão mais acelerado e difuso, com rápida redução da concentração próxima à fonte, o que, aliado à sua menor estabilidade estrutural, reforça a hipótese de baixa adequação para aplicação direta no PLA em sistemas marinhos.

A análise comparativa desses perfis evidencia a importância de associar propriedades intrínsecas da enzima como estabilidade e afinidade pelo substrato com parâmetros de liberação controlada. Um equilíbrio entre taxa de difusão e preservação da estrutura é essencial para assegurar eficácia catalítica em condições ambientais, conforme defendido na literatura citada no referencial teórico, e também, observado no Gráfico 4.

Gráfico 4 – Concentração média vs. tempo para cada enzima.



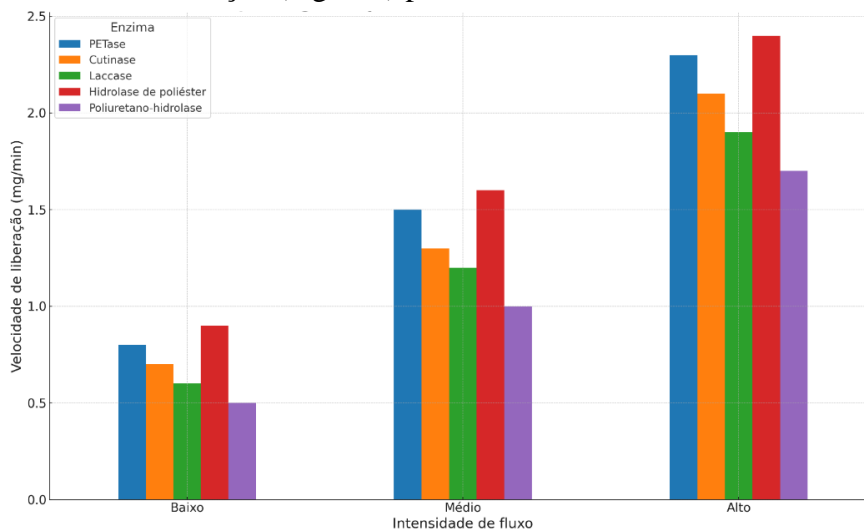
Fonte: Autoria Própria (2025)

Além disso, os resultados sugerem que estratégias de engenharia de formulação, como o uso de barreiras poliméricas mais densas ou sistemas de liberação responsivos a estímulos ambientais (pH, temperatura, salinidade), poderiam ser exploradas para otimizar a performance de enzimas menos estáveis ou com liberação excessivamente rápida.

A simulação da velocidade de liberação do conteúdo bioativo sob diferentes condições de fluxo marinho buscou aproximar o modelo computacional da realidade costeira, onde correntes, marés e microturbulências influenciam diretamente a dispersão e a eficácia catalítica das enzimas encapsuladas. De forma geral, as simulações reforçam a necessidade de ajustar o design do sistema de liberação para as condições hidrodinâmicas específicas do local de aplicação. Em ambientes de fluxo intenso, técnicas como camadas múltiplas de encapsulamento, uso de polímeros mais densos ou mecanismos de liberação responsiva (sensíveis a pH, salinidade ou temperatura) podem ser necessárias para prolongar a presença ativa da enzima.

Por fim, a relação entre velocidade de liberação e hidrodinâmica também indica que PETase e Cutinase mantêm o melhor equilíbrio entre retenção local e alcance, mesmo com variação de fluxo, o que as torna mais alinhadas aos requisitos para aplicações reais de remediação ambiental em ambientes costeiros, conforme pode-se observar no Gráfico 5.

Gráfico 5 – Velocidade de liberação (mg/min) para cada enzima em diferentes intensidades de fluxo.



Fonte: Autoria Própria (2025)

Considerações finais

Os resultados indicaram que PETase e Cutinase apresentaram maior afinidade pelo PLA, com destaque para a Cutinase pela estabilidade estrutural observada ao longo das simulações. A Hidrolase de poliéster e a Poliuretano-hidrolase demonstraram maior capacidade de difusão no meio simulado, enquanto a condição de fluxo médio se mostrou a mais eficiente para equilibrar transporte e atividade catalítica, mantendo a consistência da PETase.

De forma integrada, esses achados confirmam o objetivo do estudo ao demonstrar que a seleção de enzimas para a degradação de microplásticos deve ir além da análise de afinidade inicial, contemplando simultaneamente estabilidade conformacional, mobilidade molecular e desempenho sob diferentes regimes hidrodinâmicos. Essa abordagem amplia a compreensão sobre os mecanismos envolvidos e direciona estratégias mais robustas de aplicação biotecnológica.

Entretanto, este trabalho apresenta limitações relacionadas à realização exclusiva em ambiente computacional, com simplificação de variáveis ambientais como temperatura, salinidade, pH e presença de contaminantes. Assim, recomenda-se a validação experimental em diferentes escalas, a inclusão de parâmetros ambientais mais complexos nas simulações, a investigação de consórcios enzimáticos ou microbianos e a análise do ciclo de vida das aplicações propostas. Esses estudos futuros são essenciais para consolidar a viabilidade prática das enzimas na mitigação da poluição marinha por microplásticos.

Referências

AHMAD, I. et al. Potential of microalgae in bioremediation of wastewater. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, v. 16, n. 2, p. 413-429, 2021. DOI: <https://doi.org/10.9767/bcrec.16.2.10616.413-429>.

ALNAHDI, K. et al. Engineering a microbiosphere to clean up the ocean – inspiration from the plastisphere. *Frontiers in Marine Science*, v. 10, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1017378>.

CASTILLO, E. et al. Predicción de la estructura tridimensional de enzimas con actividad degradadora de poliuretano en el año 2023. *Ciencia Latina: Revista Científica Multidisciplinar*, v. 8, n. 3, p. 2946-2974, 2024. DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i3.11510.

CHAN, S. et al. Microbial–enzymatic combinatorial approach to capture and release microplastics. *Environmental Science & Technology Letters*, v. 9, n. 11, p. 975-982, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00558>.

ERIKSEN, M. et al. A growing plastic smog, now estimated to be over 170 trillion plastic particles afloat in the world’s oceans—Urgent solutions required. *PLOS ONE*, v. 18, n. 3, e0281596, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281596>.

GHOSH, A. et al. Marine microbial communities as indicators and agents for plastic biodegradation: potentials and challenges. *Science of the Total Environment*, v. 867, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161119>.

HOU, X. et al. Fungal laccase for degradation of environmental microplastics: mechanisms and applications. *Environmental Research*, v. 216, p. 114365, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114365>.

HOWARD, G. T. Biodegradation of polyurethane: a review. *International Biodeterioration & Biodegradation*, v. 49, n. 4, p. 245-252, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(02\)00051-3](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(02)00051-3).

LEBRETON, L.; ANDRADY, A. Future scenarios of global plastic waste generation and disposal. *Palgrave Communications*, v. 5, n. 1, p. 1–11, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1057/s41599-019-0290-1>.

LOPES, I. et al. Microrganismos marinhos: um reservatório de hidrolases biotecnologicamente interessantes. *Revista da Biologia*, v. 22, n. 1, p. 32-46, 2023. DOI: <https://doi.org/10.11606/issn.1984-5154.v22p32-46>.

PEREIRA, M. et al. A percepção pública como instrumento de educação ambiental: um estudo sobre microplásticos. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 7, e45210715411, 2021. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i7.15411>.

SHUKUR, S. et al. Unveiling fungal proficiency in microplastic degradation: a comprehensive research investigation. [S.l.: s.n.], 2024. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4483006/v1>.

TANG, L. et al. Design of enzyme-based biohybrid materials for environmental remediation. *Nature Reviews Materials*, v. 6, p. 754-773, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00278-2>.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME – UNEP. From pollution to solution: a global assessment of marine litter and plastic pollution. Nairobi: UNEP, 2021. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/pollution-solution-global-assessment-marine-litter-and-plastic-pollution>.

WANG, Z.; SEDIGHI, M.; LEA-LANGTON, A. Filtration of microplastic spheres by biochar: removal efficiency and immobilisation mechanisms. *Water Research*, v. 184, p. 116165, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116165>.

YOSHIDA, S. et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science*, v. 351, n. 6278, p. 1196-1199, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>.

ZENG, X. et al. Degradation of polyesters in marine environments: challenges and perspectives. *Science of the Total Environment*, v. 739, p. 140219, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140219>.

ZHANG, H. et al. Bio-inspired encapsulation techniques for marine environmental applications. *Journal of Cleaner Production*, v. 368, p. 133045, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133045>.