

Degradação enzimática: um tratamento de resíduos plásticos

DOI: 10.5281/zenodo.8437129

Nicole Maito R. Brandizzi*^a

Plastic waste has become a global environmental concern, necessitating the development of sustainable and efficient solutions for its management. Enzymatic degradation has emerged as a promising approach for plastic waste treatment. This abstract provides an overview of recent advancements in the field of enzymatic degradation of plastic waste.

Os resíduos plásticos se tornaram uma preocupação ambiental global, exigindo o desenvolvimento de soluções sustentáveis e eficientes para o seu gerenciamento. A degradação enzimática tem surgido como uma abordagem promissora para o tratamento de resíduos plásticos. Este resenha fornece uma visão geral dos avanços recentes no campo da degradação enzimática de resíduos plásticos.

Universidade de Brasília - UnB. Campus Darcy Ribeiro - Instituto de Química.

**E-mail: nicolemaito@hotmail.com*

Recebido em 31 de agosto de 2023,

Aceito em 30 de setembro de 2023,

Publicado em 31 de outubro de 2023.

Introdução

Desde a década de 1950, a produção de plásticos aumentou rapidamente, superando outros materiais manufaturados. A projeção indica que a demanda global de petróleo até 2050 será impulsionada principalmente pelos petroquímicos, incluindo plásticos.¹ A maioria dos plásticos produzidos atualmente consiste em polímeros com estruturas carbono-carbono, que são altamente duráveis e persistentes no ambiente. Se a produção e o gerenciamento de plásticos continuarem na trajetória atual, estima-se que até 2050 cerca de 12 bilhões de toneladas métricas de resíduos plásticos terão se acumulado no planeta.² Um artigo do The Guardian de outubro de 2018, relata a descoberta de microplásticos nas fezes humanas pela primeira vez. Essa descoberta levanta preocupações sobre a extensão da contaminação por plástico no meio ambiente e seus potenciais impactos na saúde humana.³

O estudo supracitado foi conduzido por pesquisadores da Medical University of Vienna e da Universidade de Medicina de Viena, que examinaram amostras de fezes de participantes de diferentes países. Os resultados revelaram a presença de microplásticos em todas as amostras analisadas.³

Essa descoberta é alarmante, pois indica que a população está sendo exposta à microplásticos através da ingestão de alimentos contaminados ou da inalação de partículas presentes no ar. Embora ainda haja muitas perguntas a serem respondidas sobre os possíveis efeitos à saúde humana, os pesquisadores da universidade sugerem que a exposição a microplásticos pode estar associada a problemas como inflamação intestinal, danos ao sistema imunológico e perturbação hormonal.³

Essa contaminação representa riscos para a vida selvagem e possíveis impactos na saúde humana. A ingestão de partículas de plástico por humanos tem sido relatada em frutos do mar e água potável. Embora medidas tenham sido tomadas para combater a poluição plástica, a solução não se resume apenas a projetar materiais "biodegradáveis no mar".²

Com relação à vida selvagem, o descarte inadequado de plásticos resulta na formação de microplásticos, que causam sérios problemas, especialmente nos ecossistemas marinhos. Essas partículas são engolidas por animais marinhos acidentalmente, e há relatos de baleias e outros animais encontrados mortos devido a resíduos plásticos em seus tratos estomacais. Os microplásticos também podem ser ingeridos por humanos através da cadeia alimentar, representando uma preocupação em relação à saúde humana.⁴

Os plásticos feitos de polímeros carbono-carbono são amplamente utilizados devido à sua leveza, robustez, resistência química e isolamento térmico. Sua não biodegradabilidade é de interesse comercial, entretanto há uma grande problemática quanto ao seu descarte. Esses resíduos plásticos contaminam ecossistemas terrestres, de água doce e oceânicos. Regiões costeiras em todo o mundo, especialmente aquelas com infraestrutura de gerenciamento de resíduos subdesenvolvida, enfrentam problemas significativos de contaminação por plástico.²

Como supracitado acima, os microplásticos representam uma ameaça para diversas formas de vida do planeta, alterando drasticamente os ecossistemas no qual estão inseridos.

Contudo, existem seres que podem ser a solução para esse. Assim, os microrganismos desempenham um papel importante na degradação de poluentes e no ciclo de materiais no ecossistema. A degradação microbiana e enzimática de polímeros tem sido objeto de interesse global desde a década de 1990, buscando soluções para lidar com o problema dos plásticos no meio ambiente.⁴

A poluição plástica tornou-se um problema ambiental urgente, exigindo o desenvolvimento de estratégias eficazes e sustentáveis para o tratamento de resíduos plásticos. A degradação enzimática surgiu como uma abordagem promissora para enfrentar esse desafio, oferecendo soluções potenciais para mitigar o acúmulo de resíduos plásticos. Esta resenha apresenta um panorama abrangente dos avanços recentes na área da degradação enzimática para o tratamento de resíduos plásticos, baseando-se em *insights* de estudos importantes.

Os estudos revisados enfatizam a importância desse tratamento, por meio da utilização de microrganismos e suas enzimas especializadas. Eles destacam a variedade de tipos de plásticos que podem ser alvo da degradação enzimática, incluindo plásticos sintéticos e polietileno tereftalato (PET). É importante ressaltar a engenharia de enzimas como um aspecto crucial, permitindo aprimorar a atividade catalítica e a especificidade de substrato, como demonstrado no estudo sobre a depolimerase PET projetada.⁴

Serão identificados também os principais desafios que precisam ser superados para sua implementação bem-sucedida em larga escala, como a resistência de certos plásticos à degradação e as condições ambientais necessárias para uma degradação eficiente. Ao aproveitar o poder dos microrganismos e suas capacidades enzimáticas, os avanços nessa área oferecem caminhos promissores para combater a poluição plástica, abrindo caminho para um futuro mais limpo e sustentável.

Metodologia

Para redigir o presente trabalho foi realizada uma busca no Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e foi selecionado o artigo de revisão de Mohanan⁷ como referência que aborda os recentes avanços da degradação de plásticos sintéticos por microrganismos e enzimas. O estudo discute a diversidade de microrganismos envolvidos na degradação de plásticos e seus mecanismos de ação, para isso foi selecionado diversos artigos

na área e sintetizado seus resultados. Nessa resenha dentre os vários exemplos destrinchados no artigo de referência foi expandido em maiores detalhes 3 artigos que exemplificam melhor as possibilidades dentro da degradação enzimática.⁴⁻⁶

Resultados e discussão

O artigo de referência de Nisha Mohanan aborda a degradação de plásticos sintéticos por microrganismos e enzimas. O aumento global no uso de plásticos tem levado a sérios problemas ambientais, e a busca por soluções sustentáveis para o gerenciamento de resíduos plásticos é urgente. O artigo explora a capacidade dos microrganismos e suas enzimas em degradar diferentes tipos de plásticos.⁷

Os principais tipos de plásticos abordados no artigo incluem polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS) e polietileno tereftalato (PET). São classificados em dois grupos com base em sua estrutura: aqueles com estrutura carbono-carbono e aqueles com heteroátomos na cadeia principal. Alguns polímeros biodegradáveis, como polihidroxialcanoato (PHA) e ácido polilático (PLA), têm sido considerados como alternativas aos plásticos derivados de hidrocarbonetos petroquímicos.⁷

O estudo discute a diversidade desses seres microscópicos envolvidos na degradação de plásticos e seus mecanismos de ação. Diferentes grupos de microrganismos, como bactérias e fungos, têm a capacidade de produzir enzimas que podem quebrar as ligações químicas dos polímeros plásticos, facilitando assim sua decomposição.⁷

Embora esses plásticos sejam compostos químicos não encontrados naturalmente, nas últimas décadas foram identificados diversos microrganismos capazes de metabolizar esses polímeros. Mais de 90 microrganismos, como bactérias e fungos, foram identificados como sendo capazes de degradar plásticos derivados do petróleo, principalmente em condições de laboratório. No entanto, a biodegradação é um processo complexo que depende de vários fatores, como disponibilidade de substrato, características de superfície e peso molecular dos polímeros.⁷

A degradação biológica de plásticos ocorre quando microrganismos produzem enzimas que são liberadas fora das células. Essas enzimas se ligam à superfície do plástico e iniciam o processo de quebra das moléculas poliméricas em fragmentos menores. Esses fragmentos são então utilizados pelas células microbianas como fonte de carbono, resultando

na liberação de dióxido de carbono (CO₂).⁷ Os experimentos iniciais sobre biodegradação microbiana buscaram mostrar que a atividade dos microrganismos poderia levar a alterações nas propriedades físicas dos plásticos, como sua resistência à tração, grau de cristalinidade e capacidade de absorção de água.

Um dos exemplos disso é o abordado pelo artigo de Tournier⁴ sobre a criação de uma enzima denominada *PET depolymerase*, que é capaz de degradar e reciclar garrafas de plástico feitas de polietileno tereftalato (PET).

Os autores descrevem o desenvolvimento da enzima por meio de engenharia genética. Eles utilizam técnicas de seleção evolucionária e mutagenese dirigida para modificar uma enzima bacteriana chamada *Ideonella sakaiensis PETase*, originalmente descoberta por acaso em uma usina de reciclagem de plásticos. Através de modificações genéticas, os pesquisadores melhoram a eficiência dessa enzima na degradação do PET. Essa modificação resulta na criação da enzima *PET depolymerase*, que exibe uma atividade mais robusta e eficiente em relação à *PETase* original.⁴

Também foi investigado a estrutura tridimensional da *PET depolymerase* e foram identificados resíduos específicos envolvidos na interação com o plástico PET. Essa análise estrutural fornece informações valiosas sobre o mecanismo de degradação da enzima e auxilia no aprimoramento do seu desempenho. Os pesquisadores apontam que a enzima é capaz de quebrar eficientemente as ligações químicas do PET, transformando-o em monômeros que podem ser posteriormente utilizados na produção de novos plásticos, criando assim um ciclo fechado de reciclagem.⁴

Os autores também discutem os desafios e as perspectivas futuras relacionadas à implementação da *PET depolymerase* na indústria. Eles abordam questões como a otimização das condições de reação, a escalabilidade da produção da enzima e a viabilidade econômica de sua aplicação em larga escala. Dada a urgência global em lidar com o problema do descarte de plástico, e com diversos governos, agências nacionais e internacionais, bem como fabricantes, se comprometendo com metas de sustentabilidade e a adoção de uma economia circular, o uso de enzimas para o processamento de resíduos de PET descrito nesta pesquisa pode desempenhar um papel importante no alcance dessas metas.⁴

Demais avanços explorados são abordados no artigo de Kawai⁶ no entendimento da degradação enzimática do polietileno

tereftalato (PET) e suas aplicações potenciais na gestão de resíduos. São abordadas as diferentes classes de enzimas *PETases*, sua diversidade estrutural e suas atividades catalíticas, bem como as estratégias utilizadas para melhorar sua eficiência e especificidade na degradação do PET.

O autor do artigo explora diferentes estratégias para melhorar as propriedades dessas enzimas esterásicas. Isso inclui a identificação e isolamento de novas destas com características aprimoradas, seja por meio de prospecção de microrganismos encontrados em ambientes contaminados com PET ou por engenharia de proteínas para modificar enzimas existentes.⁶

Além disso, discute-se a necessidade de entender melhor os mecanismos de ação delas para otimizar sua eficiência e especificidade. Isso envolve o estudo da estrutura das enzimas e a identificação dos sítios ativos responsáveis pela degradação do PET. Com esse conhecimento, é possível realizar mutações direcionadas para melhorar a atividade catalítica das enzimas.⁶

Outra abordagem mencionada no artigo é a combinação de diferentes enzimas ou a criação de enzimas híbridas, com o objetivo de obter uma degradação mais completa do PET. Isso pode envolver a combinação de *PETases* com outras enzimas que atuam em etapas complementares do processo de degradação.⁶

Essas estratégias visam superar os desafios associados à degradação do PET e melhorar a eficiência dessas enzimas *esterásicas*. Com avanços nesse campo, espera-se que essas enzimas possam ser aplicadas de forma mais ampla na gestão de resíduos plásticos, permitindo a reciclagem e a redução do impacto ambiental causado pelo PET.⁶

Alguns aspectos desse assunto são trabalhados no artigo de Knott que⁵ aborda a caracterização e engenharia de um sistema de duas enzimas para a depolimerização de plásticos. Os autores exploram a capacidade dessas enzimas em degradar eficientemente polímeros plásticos, abrindo caminho para soluções mais sustentáveis no gerenciamento de resíduos plásticos.

Os pesquisadores investigam um sistema enzimático composto por duas enzimas, uma cutinase e uma esterase, que são capazes de quebrar as ligações químicas dos polímeros plásticos. Eles realizaram experimentos para caracterizar essas enzimas, analisando sua atividade de degradação em diferentes tipos de plásticos, como o polietileno tereftalato (PET) e o polietileno de alta densidade (PEAD).⁵

Os autores efetuaram a engenharia das enzimas com o objetivo de melhorar sua eficiência e especificidade na degradação de plásticos. A engenharia enzimática é um processo no qual as propriedades das enzimas são modificadas por meio de técnicas de manipulação genética para obter características desejadas.⁵

Os autores empregaram a técnica de mutações direcionadas para modificar as enzimas *cutinase* e *esterase*. Essa técnica envolve a introdução de mutações específicas nos genes que codificam as enzimas, resultando em mudanças na sequência de aminoácidos e, consequentemente, nas propriedades e atividades da enzima.⁵

As mutações são projetadas com base no conhecimento da estrutura e função da enzima, bem como na análise de resíduos de aminoácidos específicos que desempenham um papel crítico na atividade catalítica da enzima. Os autores podem fazer alterações nas posições desses resíduos para melhorar a interação enzima-substrato, a estabilidade da enzima ou outras características desejadas.⁵

Após a introdução das mutações, as enzimas modificadas são expressas em sistemas de expressão recombinante, como bactérias ou leveduras, para produzir as enzimas em quantidade suficiente para análise e testes subsequentes.⁵

As enzimas modificadas são então caracterizadas para avaliar suas propriedades e atividades de degradação em relação aos plásticos alvo, como o PET e o PEAD. Os autores analisam a eficiência de degradação, a especificidade de substrato e outras propriedades relevantes para determinar se as mutações introduzidas resultaram em melhorias desejadas.⁵

Essa abordagem de engenharia enzimática permite otimizar as enzimas para uma degradação mais eficiente dos plásticos, aumentando assim a viabilidade de sua aplicação em processos de reciclagem ou degradação controlada de plásticos.⁵

É importante ressaltar que as técnicas de engenharia enzimática podem variar dependendo das enzimas e dos objetivos específicos do estudo. No caso deste artigo, as mutações direcionadas foram utilizadas, mas outras estratégias, como evolução dirigida ou recombinação gênica, também podem ser aplicadas para modificar as enzimas com o intuito de melhorar suas propriedades.⁵

Conclusões

A degradação enzimática surge como uma solução promissora para o tratamento de resíduos plásticos. Diversos tipos de plásticos, como PET, PP e PS, podem ser alvo dessa abordagem. Microrganismos produzem enzimas especializadas, chamadas de depolimerases ou esterases, capazes de quebrar as cadeias poliméricas dos plásticos de forma eficiente. A engenharia dessas enzimas tem mostrado avanços na melhoria de sua atividade catalítica e especificidade de substrato. No entanto, desafios como a degradação de certos tipos de plásticos e a produção em larga escala ainda precisam ser superados. Pesquisas futuras devem focar na otimização dos processos enzimáticos, exploração de novos sistemas enzimáticos e estratégias econômicas para implementação em larga escala. A degradação enzimática representa uma abordagem sustentável para o tratamento de resíduos plásticos, contribuindo para uma economia circular e um ambiente mais limpo.

Contribuições por Autor

A resenha sobre o artigo em referência e a inclusão de algumas observações são de Nicole Maito R. Brandizzi.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

Gostaria de expressar minha gratidão à direção, aos docentes, discentes e funcionários do Instituto de Química da Universidade de Brasília (IQ-UnB) pelo apoio inestimável fornecido. Também desejo agradecer ao PET-Química/IQ/UnB, à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SeSU/MEC) e ao Decanato de Ensino de Graduação (DEG/UnB) por todo o suporte concedido por meio do Programa de Educação Tutorial. Seu apoio foi fundamental para a realização deste trabalho.

Notas e referências

- 1 DEA 13-15 Demanda de Energia 2050 — Ministério de Minas e Energia, <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/spe/publicacoes/plano-nacional-de-energia/plano-nacional-de-energia-2050/versoes-anteriores-de-documentos/dea-13-15-demanda-de-energia-2050.pdf/view>, (accessed 9 June 2023).

- 2 K. L. Law and R. Narayan, Reducing environmental plastic pollution by designing polymer materials for managed end-of-life, *Nat Rev Mater*, 2021, **7**, 104–116.
- 3 F. Harvey and J. Watts, *The Guardian*, 2018.
- 4 V. Tournier, C. M. Topham, A. Gilles, B. David, C. Folgoas, E. Moya-Leclair, E. Kamionka, M.-L. Desrousseaux, H. Texier, S. Gavalda, M. Cot, E. Guémard, M. Dalibey, J. Nomme, G. Cioci, S. Barbe, M. Chateau, I. André, S. Duquesne and A. Marty, An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottles, *Nature*, 2020, **580**, 216–219.
- 5 B. C. Knott, E. Erickson, M. D. Allen, J. E. Gado, R. Graham, F. L. Kearns, I. Pardo, E. Topuzlu, J. J. Anderson, H. P. Austin, G. Dominick, C. W. Johnson, N. A. Rorrer, C. J. Szostkiewicz, V. Copié, C. M. Payne, H. L. Woodcock, B. S. Donohoe, G. T. Beckham and J. E. McGeehan, Characterization and engineering of a two-enzyme system for plastics depolymerization, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 2020, **117**, 25476–25485.
- 6 F. Kawai, T. Kawabata and M. Oda, Current knowledge on enzymatic PET degradation and its possible application to waste stream management and other fields, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 2019, **103**, 4253–4268.
- 7 N. Mohanan, Z. Montazer, P. K. Sharma and D. B. Levin, Microbial and Enzymatic Degradation of Synthetic Plastics, *Front. Microbiol.*, 2020, **11**, 580709.