

Nas últimas décadas, a civilização está em crescimento exponencial e desorganizado, abastecido, inicialmente, pelas revoluções agrícolas e industriais, além dos avanços tecnológicos relacionados à medicina, aeroespacial, civil e computação. Isso fez com que desafios relacionados à falta de sustentabilidade desse crescimento se tornasse, cada vez mais, uma problemática mais preocupante para a humanidade e para o meio ambiente como um todo. Diante desta situação, todos os estados-membros da Organização das Nações Unidas (ODS) adotaram como ambição, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) ¹, cuja finalidade é levar a um futuro de crescimento inteiramente sustentável. Neste contexto, vale mencionar a produção, o consumo e o descarte do plástico e seus resíduos, derivadas indiretamente do petróleo. Ou seja, a produção do plástico começa com a extração de petróleo bruto, um líquido preto e viscoso que é uma mistura complexa de vários hidrocarbonetos ². Assim, o petróleo bruto é transportado para refinarias, nas quais será feita a destilação fracionada, que vai separar o petróleo bruto em diferentes substâncias (**Figura 1**).

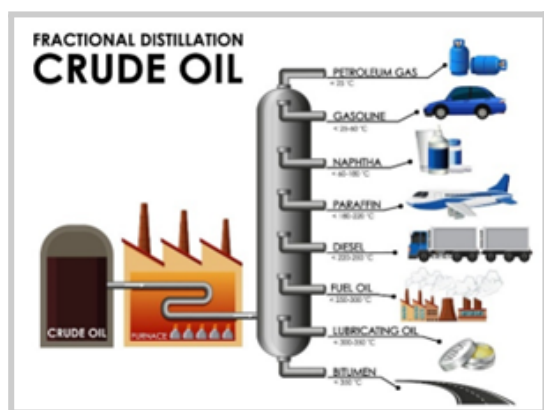


Figura 1: As diferentes substâncias obtidas a partir da destilação do petróleo bruto e suas aplicações, entre eles, a Nafta (“Naphtha”) – observe que as substâncias vão ficando menos densas de baixo para cima ³.

Entre elas, o plástico será produzido a partir da Nafta, um líquido incolor, composto também por uma mistura de diferentes hidrocarbonetos, com cadeias variando de 4 a 10 carbonos ⁴, e que aparecerá no topo da torre de destilação, devido a sua baixa densidade em comparação com os outros derivados do petróleo. Desta maneira, com o intuito de quebrar os hidrocarbonetos da Nafta em moléculas menores e mais úteis, a Nafta passa pelo processo de craqueamento a vapor, na qual ela é aquecida a uma temperatura de cerca de 800°C ⁵, que é uma temperatura acima da temperatura de decomposição das substâncias presentes no líquido, quebrando assim, através da pirólise ⁶, as ligações moleculares presentes entre os carbonos dos hidrocarbonetos, gerando monômeros menores de alcenos, como o eteno e o propeno (**Figura 2a**). Esses monômeros são então polimerizados por adição (monômeros vão se ligando a um polímero da mesma substância), ou por condensação (monômeros se ligam individualmente formando polímeros que, em torno, começam a se ligar para formar polímeros maiores) ⁷, por meio da ação de um catalisador em grandes temperaturas e pressões e com a substância no estado gasoso. No caso do eteno e propeno, é formado o polietileno (PE) e o polipropileno (PP). Outro exemplo é o plástico policaprolactona (PCL) (**Figura 2b**). Finalmente, essas substâncias são derretidas e transformadas em várias pelotas de plástico que, em torno, podem ser derretidas novamente e moldadas para formar qualquer tipo de produtos plásticos (**Figura 3**).

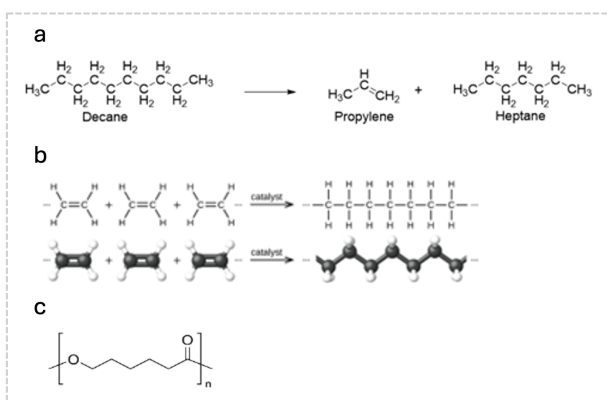


Figura 2: a) Exemplo do craqueamento do decano em propileno e heptano por meio da pirólise ³. b) Exemplo de uma polimerização do eteno a polietileno ⁸; c) exemplo do plástico policaprolactona (PCL) e sua subunidade (site da sigma-aldrich, produto 440744) ⁹.

Analisando, agora, estatisticamente o mundo no contexto da produção e do descarte do plástico e seus resíduos, o cenário não é otimístico: nos últimos 30 anos, o consumo mundial de plástico quadruplicou; ademais, de 2000 a 2019 a produção global de plástico e de resíduos de plástico mais que duplicaram para mais que 450 toneladas e 353 toneladas anualmente, respectivamente – com expectativas que a produção de plástico chegue a quase 1 bilhão de toneladas anualmente até 2050– enquanto a quantidade de resíduos de plástico efetivamente reciclado era apenas de 3 toneladas anualmente, ou de 9% do total de resíduos de plástico ⁷. Portanto, cerca de 91% dos resíduos de plástico não foram devidamente reciclados, indo parar em aterros sanitários, no meio ambiente (oceanos, florestas e entre outros), sendo incinerados – o qual a combustão incompleta (falta de oxigênio) pode gerar gases letais para pessoas ⁶ e que contribuem para o efeito estufa e poluição do meio ambiente. Assim, torna-se evidente a importância dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, e de como a química tem um papel fundamental na inovação e na tecnologia relacionadas à sustentabilidade.

Resin identification code	Polymers	Monomers			
			LDPE	Low-density polyethylene (LDPE)	Ethylene ($\text{CH}_2=\text{CH}_2$) *(excessive branching)
	Polyethylene terephthalate (PETE)	$\text{HO}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{OH}$ Ethylene glycol and Dimethyl terephthalate		Polypropylene (PP)	Propylene ($\text{CH}_3-\text{CH}=\text{CH}_2$)
	High-density polyethylene (HDPE)	Ethylene ($\text{CH}_2=\text{CH}_2$) *(less branching between polymer chains)		Polystyrene (PS)	 Styrene
	Polyvinyl chloride (PVC)	Vinyl chloride ($\text{CH}_2=\text{CH}-\text{Cl}$)		Others	Different monomers are used for a particular polymer. For instance, PLA made from Lactic acid
				Other plastics including acrylic, polycarbonates, polylactic acid (PLA), fibres, nylon	

*The monomer used in LDPE and HDPE is ethylene but there is a difference in the degree of branching.

Figura 3: Diferentes tipos de plásticos e seus polímeros compositores, além dos respectivos monômeros ³.

Em resposta a essa necessidade de um descarte mais eficiente e eficaz do plástico, cientistas chineses desenvolveram, em seu trabalho “*Degradable living plastics programmed by engineered spores*” (na revista “*nature Chemical biology*” em 2024), “plásticos vivos”: plásticos que se auto degradam

por meio de esporos de microrganismos geneticamente modificados contidos nele. Essencialmente, os esporos do microrganismo seriam incluídos no processo de fabricação do plástico, fazendo o produto fabricado enviado com esporos dormentes, que seriam ativados por uma erosão na superfície do objeto, fazendo com que eles liberassem enzimas que degradam o plástico ao seu redor (**Figura 4**).

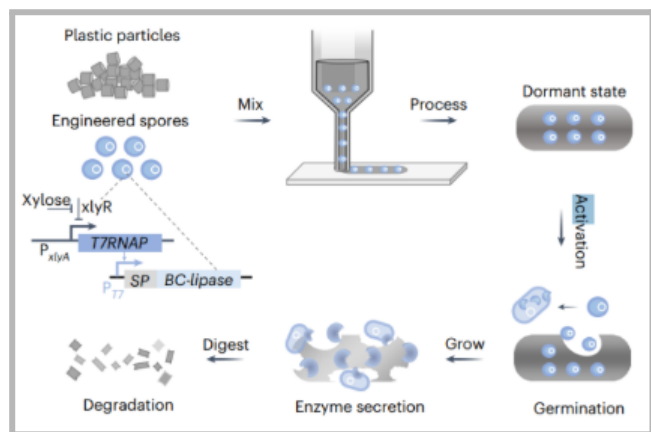


Figura 4: Representação do processo de formação de plásticos vivos ¹⁰.

Nesse contexto, a enzima utilizada pelo grupo de pesquisa foi a lipase da bactéria *Burkholderia cepacia* (BC-lipase), uma enzima capaz de hidrolisar o plástico policaprolactona (PCL). Essa habilidade se deve a sua estrutura tridimensional e características de seu sítio de ligação ao substrato (**Figura 5**). Analisando a estrutura tridimensional, resolvida por cristalografia de raios-X, da enzima, a BC-lipase pertence à família α/β hidrolase, característica de uma superfamília de esterases, lipases entre outras classes enzimáticas. No caso BC-lipase, ela possui uma cavidade profunda, estreita e hidrofóbica apolar - colorida em branco na superfície da estrutura tridimensional da enzima, **figura 5**.

Nesta cavidade há a presença da tríade catalítica formada pelos resíduos serina, histidina e aspártico, sendo, portanto, o sítio catalítico da enzima. Além disso, a região de ligação ao substrato com características hidrofóbicas, além das forças de London (dipolo induzido-dipolo induzido) entre a enzima e o substrato faz com que BC-lipase consiga se conectar nas grandes cadeias de PCL (ou $(C_6H_{10}O_2)_n$) que possuem características hidrofóbicas.

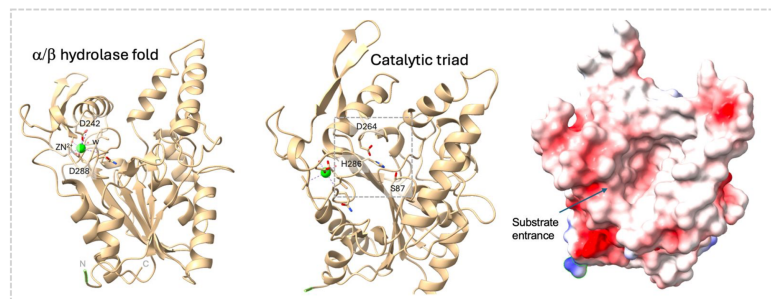


Figura 5: Representação em Cartoon da BC-lipase feito usando o programa ChimeX e o PDBID: 3LIP.

Desta maneira, o processo de clivagem do substrato ocorre no sítio ativo da BC-lipase por meio da hidrólise (quebra de ligações químicas do plástico com ajuda de moléculas de água), gerando uma cadeia menor e um

monômero novo. Em seguida, a lipase desliza-se pelo polímero do plástico, graças à força de dipolo-dipolo induzido resultante da presença de 6 resíduos polares localizados na parte da frente da região de ligação ao substrato da lipase. Assim, a lipase irá, novamente, reagir com a cadeia recém clivada (contendo um monômero a menos), clivando-a novamente e deslizando-se sobre o substrato até começar a interagir e reagir com uma parte da cadeia do plástico para clivá-la novamente e liberar mais um monômero. Esse seria um processo cíclico. Dessa forma, como resultado final, a cadeia de policaprolactona será quebrada em múltiplos monômeros individuais.

Prosseguindo, a bactéria *B. subtilis* foi geneticamente modificada, por meio da engenharia genética, a modo de conseguir expressar a BC-lipase sob o indutor d-xylose. Nesse caso, a *B. subtilis* foi o microrganismo utilizado, pois é uma bactéria com capacidade de criar esporos dormentes e resistentes, é um ser vivo que é bem estudado e não patogênico, podendo ser usado até como probiótico. Os esporos são essenciais nessa situação, pois bactérias vegetativas não conseguem sobreviver às condições de produção de plástico, que era uma restrição metodológica. Essa resistência dos esporos foi comprovada experimentalmente, devido à resistentes a altas temperaturas e aos solventes orgânicos, enquanto as células vegetativas não sobreviviam.

A produção dos plásticos vivos foi feita utilizando impressoras 3D, em que eles ou derretem, ou dissolvem, usando o tolueno, o PCL, seguido pela adição dos esporos puros no líquido e misturando-os até criar uma mistura homogênea, a qual é impressa e vira um objeto tridimensional. Além disso, foi analisado experimentalmente que as propriedades físico-químicas dos plásticos vivos são quase idênticas aos não vivos.

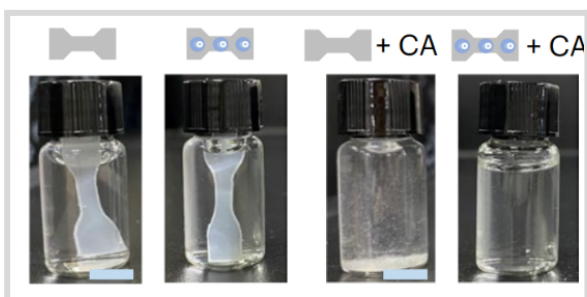


Figura 6: Um dos *setups* experimentais utilizados pelo grupo de pesquisa em seu trabalho: “*Degradable living plastics programmed by engineered spores*”. (a) Plástico sem esporos (esquerda) e plástico com esporos (direita) sem a adição de CA-lipase. (b) Plástico sem esporos (esquerda) e plástico com esporos (direita) com a adição de CA-lipase. As fotos foram tiradas 7 dias após o início do experimento ¹¹.

Para comprovar a eficácia desses objetos, foram feitos experimentos em diversos cenários, com todos chegando em uma conclusão parecida: os plásticos vivos ativados pela adição do açúcar xylose e da CA-lipase, enzima do fungo *Candida antarctica*, degradaram muito mais rápido e de forma mais confiável do que se não fossem ativados ou se não tivessem os esporos. Como é representado na **figura 6**, um dos

experimentos envolvia e variação isolada dos parâmetros de 1) se o plástico está vivo ou não (possui ou não possui esporos contidos nele, respectivamente) e 2) a adição de CA-lipase, que era o ativador para os esporos se diferenciarem em celular vegetativas e serem hábeis para induzir a BC-lipase. Na **figura 6**, não é adicionado a CA-lipase, e observa-se que o plástico não tem nenhuma diferença significativa, comprovando que os plásticos vivos são estáveis quando os esporos estão dormentes. Entretanto, na **figura 6**, observa-se que ambos os plásticos foram degradados pela CA-lipase, porém em níveis diferentes: o plástico não vivo só foi degradado parcialmente, que, de acordo com a literatura, está dentro do esperado, porém, no contexto do plástico vivo, dá para ver que não sobrou nada, sugerindo que os esporos foram ativados com sucesso e degradaram completamente o plástico. Vale mencionar, também, que já que está sendo trabalhado com seres vivos, o fato de o container ser fechado é relevante, pois limita a quantidade de oxigênio e pode ter afetado no experimento de forma quantitativa. Concluindo, os resultados desses e de outros experimentos mostraram que plásticos vivos (e ativados) se degradam melhor e mais rapidamente (degradam completamente de 6 a 7 dias) do que plásticos não vivos (pedaços não se tornam mais visíveis de 36 a 37 dias).

Finalmente, o trabalho “*Degradable living plastics programmed by engineered spores*” foi um grande sucesso, visto que eles conseguiram comprovar que plásticos vivos são melhores e mais eficientes em se auto degradar do que plásticos não vivos para o PCL. Assim, como continuação seria essencial explorar o uso de outras enzimas que podem degradar outras classes de plásticos, como a PETase - que degrada polietileno tereftalato (PET), e de investigar outras formas de ativação de esporos, como por meio de radiação solar ou de altas concentrações salinas. Desta maneira, vale ressaltar que isso só seria possível por meio da química e sua aliança com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU. Em conclusão, um dos grandes desafios da sociedade é o uso abusivo de plásticos não biodegradáveis. Foi mostrado que o corpo humano contém micropásticos e o impacto para a saúde humana ainda não está claro. O desenvolvimento de plásticos vivos irá ajudar nos objetivos da ODS nas áreas: consumo e produção responsável, cidades e comunidades sustentáveis, vida na água e vida terrestre. O trabalho aqui discutido, é uma alternativa técnica e científica em que propõe o uso de esporos bacterianos para melhorar a eficiência de degradação de plásticos. Área promissora que ainda pode ser aprimorada e tem muito potencial para melhorar a qualidade do meio ambiente.

Referências:

- [1] Website. ODS: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>;
- [2] Website. Petróleo: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Petr%C3%B3leo>;
- [3] British Plastics Federation. How Is Plastic Made? A Simple Step-By-Step Explanation. *British Plastics Federation* <https://www.bpf.co.uk/plastipedia/how-is-plastic-made.aspx>.
- [4] Website.
Nafta: https://www.refinariariograndense.com.br/uploads/produto_documento/20110614035517FISPQ_nafta_petroquimica.pdf;
- [5] Website. Temperatura: <https://www.youtube.com/watch?v=EfuiRp8eLJs&t=8s>.
- [6] Website. Pirólise: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Pir%C3%B3lise>.
- [7] Website. Produção de plástico: <https://toninembalagens.com.br/o-processo-de-fabricacao-do-plastico/>.
- [8] Polyethylene. <https://en.wikipedia.org/wiki/Polyethylene> (2002).
- [9] Website. <https://en.wikipedia.org/wiki/Polyethylene>;
- [10] Tang, C. *et al.* Degradable living plastics programmed by engineered spores. *Nature Chemical Biology* **21**, 1006–1011 (2024).
- [11] Website. <https://doi.org/10.1038/s41589-024-01713-2>.
<https://1drv.ms/p/c/41f0d97f81ba6dcd/IQDuc2utxDTVTo27J3dYFV9WAb3Z3HwOJatJoTnmIIAEKf0?e=dgbrwL> doi:10.1038/s41589-024-01713-2.
<https://1drv.ms/p/c/41f0d97f81ba6dcd/IQDuc2utxDTVTo27J3dYFV9WAb3Z3HwOJatJoTnmIIAEKf0?e=dgbrwL>.