

## Biomateriais: Polímeros e Compósitos

Daniela Atta Schlemmer<sup>1</sup>  
Larissa Andreani<sup>2</sup>  
Leonardo Fonseca Valadares<sup>3</sup>

Polímeros são macromoléculas formadas por várias unidades de repetição, unidas por ligação covalente. A matéria-prima para a produção de um polímero é o monômero, molécula com uma (*mono*) unidade de repetição (*mero*). Os polímeros podem ser divididos em três grandes classes: plásticos, borrachas e fibras (CANEVAROLO JUNIOR, 2006).

O desenvolvimento da química de polímeros permitiu a fabricação de produtos mais leves, duráveis, baratos e sem problemas de deterioração como os plásticos, que são polímeros que podem ser moldados, por ação de calor e/ou pressão (ANDRADE et al., 2001). Dados de 2012 mostram que a produção mundial de plásticos atingiu a marca de 280 milhões de toneladas/ano, sendo o Brasil responsável por 2% desta produção, o que corresponde a aproximadamente 6 milhões de toneladas. No Brasil, as principais resinas são o polietileno (PE – 39%), o polipropileno (PP – 27%) e o poli(cloreto de vinila) (PVC – 17%), por volume de produção (PERFIL 2012, 2014). Aproximadamente 43% dos plásticos produzidos no Brasil são

utilizados no segmento de embalagens, sendo que cerca de 60% das embalagens plásticas são consumidas pelo setor de alimentos (PERFIL 2012, 2014). A Figura 1 mostra os tipos de resinas mais empregados no país.

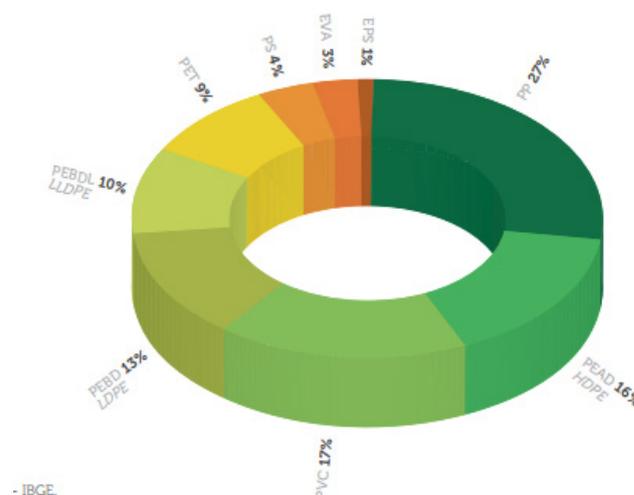


Figura 1. Principais resinas plásticas consumidas no Brasil em 2012 (PERFIL 2012, 2014).

<sup>1</sup> Química, Doutora em Físico-Química, analista da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF, daniela.schlemmer@embrapa.br

<sup>2</sup> Química, Doutora em Físico-Química, analista da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF, larissa.andreani@embrapa.br

<sup>3</sup> Químico, Doutor em Físico-Química, pesquisador da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF, leonardo.valadares@embrapa.br

A grande maioria dos polímeros convencionais é produzida a partir de derivados do petróleo. Apresentam características vantajosas como durabilidade, estabilidade estrutural, processabilidade, baixo custo e resistência química, física, à umidade e à deterioração biológica. Porém, o seu descarte incorreto pode causar sérios problemas ambientais.

Baseado nisso, há grande interesse na produção de novos materiais que não envolvam o uso de componentes tóxicos ou nocivos em sua fabricação, que possuam desempenho semelhante aos plásticos convencionais e que possam ser degradados naturalmente, diminuindo assim o impacto ambiental causado pelos seus resíduos.

Os polímeros renováveis, ou “verdes”, são semelhantes aos polímeros de origem petroquímica, mas são produzidos a partir de matérias-primas renováveis como o etanol. A Braskem desenvolveu recentemente um polietileno elaborado a partir do etanol de cana-de-açúcar, nomeado pela empresa de “plástico verde”. Além da sua origem renovável, sua utilização em produtos não requer investimentos em adaptação ou mudanças tecnológicas no setor de transformação de plásticos, pois as propriedades dessa nova resina são muito similares às obtidas a partir de fontes não renováveis (BRASKEM, 2014).

Atualmente, a Coca-Cola Company utiliza em embalagens de refrigerante 30% do polímero politereftalato de etileno (PET) obtido de fonte renovável (*PlantBottle™*). Etanol é utilizado na síntese de etilenoglicol “verde”, que reage com o ácido tereftálico de origem fóssil e forma o PET *PlantBottle™* (THE COCA COLA COMPANY, 2014). Esses esforços apresentam a vantagem de partir de soluções mais verdes para a preparação de embalagens, mas seu descarte continua sendo problemático, pois tanto o polietileno “verde” da Braskem quanto o PET *PlantBottle™* da Coca-Cola Company não são biodegradáveis, assim como os seus equivalentes derivados de petróleo.

Quando os polímeros renováveis são integralmente biossintetizados, passam a ser conhecidos como biopolímeros (ANDRADE et al., 2001), como as proteínas e os polissacarídeos. Os biopolímeros apresentam peso molecular muito mais elevado do que os polímeros orgânicos sintéticos e podem

ser usados em aplicações onde ser biodegradável e/ou derivado de recursos naturais agrega valor, particularmente para substituir plásticos petroquímicos na produção de materiais com vida útil curta, ou quando a reciclagem é difícil ou não econômica (AVELLA et al., 2005). Recentemente, a empresa BASF desenvolveu um plástico de amido de milho que se decompõe completamente em até 180 dias, em oposição ao prazo de decomposição dos polímeros tradicionais, que variam de 40 a 200 anos.

Apesar de a literatura apresentar diversos estudos com foco no desenvolvimento de polímeros renováveis ou “verdes”, sua produção é insignificante no Brasil (200 mil toneladas – 3% do total de plásticos produzidos no Brasil ou 0,06% do total mundial) (PERFIL 2012, 2014; EUROPEAN BIOPLASTIC, 2014). No entanto, as taxas de crescimento deverão ser significativas nos próximos anos, até porque, a base comparativa é muito baixa.

## SUBSTITUIÇÃO DE POLÍMEROS SINTÉTICOS POR BIOPOLÍMEROS

Em meados da década de 1970, as embalagens produzidas a partir de polímeros sintéticos se tornaram muito populares e passaram a ser utilizadas em diversas aplicações. Como citado, atualmente são produzidos 280 bilhões de quilogramas destes materiais a cada ano, o equivalente a mais de 30 quilogramas por pessoa. No entanto, o descarte destas embalagens causa grande impacto ambiental, pois polímeros sintéticos apresentam tempo de decomposição extremamente lento.

Esta situação despertou o interesse de pesquisadores e diversos setores da indústria para o desenvolvimento de materiais que utilizem polímeros biodegradáveis, que apresentam como vantagens a abundância de matérias-primas, a preservação dos recursos naturais não renováveis, a diminuição da geração de resíduos e a proteção do clima através da redução do dióxido de carbono liberado (RAY; BOUSMINA, 2005). Além disso, muitos destes materiais possuem degradação mais rápida e simples, sendo convertidos a unidades moleculares menores que podem ser facilmente metabolizadas a dióxido de carbono via ação

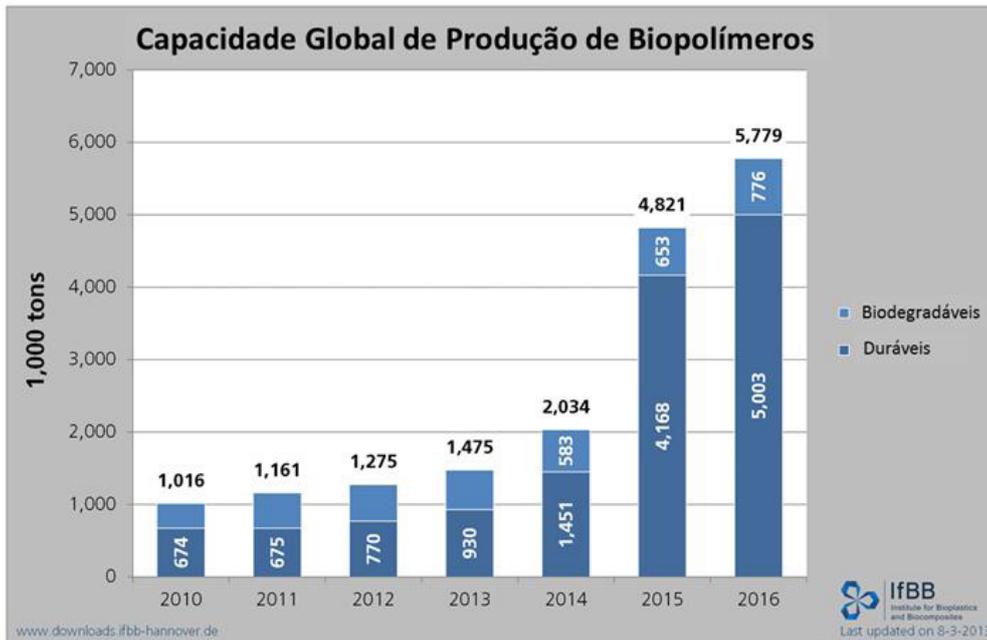


Figura 2. Evolução e projeção da capacidade global de produção de biopolímeros (INSTITUTE FOR BIOPLASTICS AND BIOCOSCOMITES, 2014).

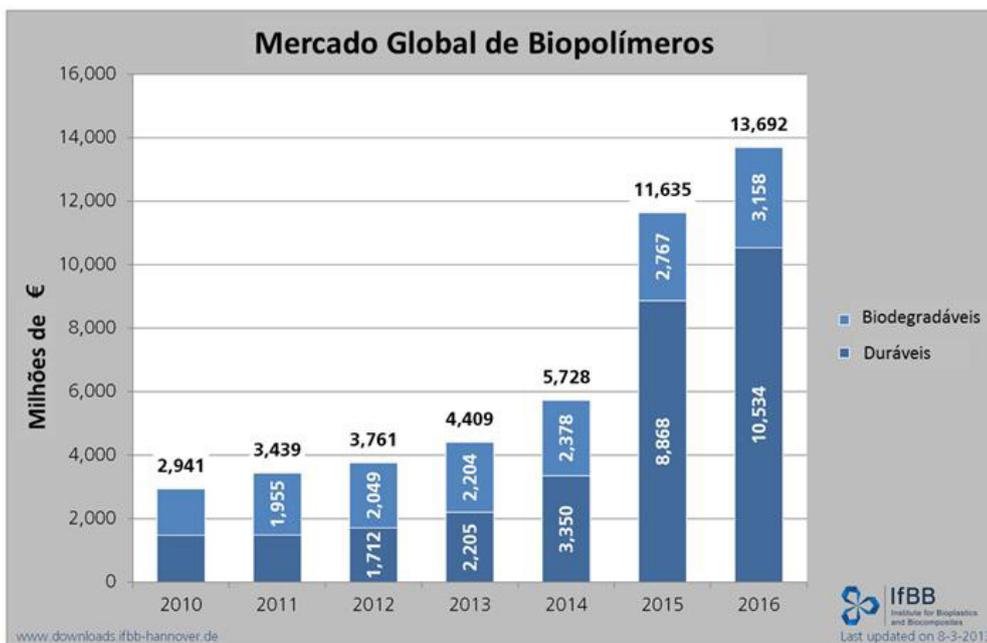


Figura 3. Evolução e projeção do mercado global de biopolímeros (INSTITUTE FOR BIOPLASTICS AND BIOCOSCOMITES, 2014).

microbiana. A Figura 2 apresenta a capacidade global de produção de biopolímeros, indicando um grande aumento de produção nas projeções para 2015 e 2016 (INSTITUTE FOR BIOPLASTICS AND BIOCOSCOMITES, 2014).

O grande obstáculo enfrentado para a substituição de polímeros sintéticos por biopolímeros em aplicações industriais é o custo desses novos materiais. Apesar disso, a utilização de produtos preparados a partir de biopolímeros tem registrado um crescente sucesso no mercado, como pode ser observado na Figura 3 (INSTITUTE FOR

BIOPLASTICS AND BIOCOSCOMITES, 2014). Esse aumento no mercado global de polímeros está relacionado principalmente aos preços elevados do petróleo, ao interesse na preservação de recursos limitados, bem como aos impostos cada vez mais rígidos para o descarte e a reciclagem de materiais sintéticos.

Países como China, Estados Unidos e Brasil, que se destacam no cultivo de produtos agrícolas como milho, soja e cana-de-açúcar, podem ser apontados como referências potenciais no desenvolvimento de biopolímeros a partir destas culturas.

Uma ampla gama de materiais pode ser preparada a partir dos mais diversos biopolímeros. As áreas com maior potencial de aplicação de polímeros biodegradáveis podem ser determinadas observando a segmentação da demanda por polímeros convencionais, destacando-se as áreas de embalagens (41%), construção civil (12%) e descartáveis (11%). Entre os biopolímeros de particular interesse para o estudo na ciência de materiais pode-se citar a celulose, o amido, os poli(hidroxicanoatos) (PHAs), o poli(ácido láctico) (PLA) e a borracha natural, discutidos em maiores detalhes a seguir.

## CELULOSE

A celulose é o principal constituinte das plantas, sendo o material orgânico mais abundante na natureza. É encontrada tanto em fibras não-lignificadas (como o algodão) como em plantas lignificadas (como a madeira), além de ser observada na parede celular de alguns tipos de algas e em membranas de fungos. A celulose,  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , é um polissacarídeo complexo com morfologia semicristalina e possui a estrutura apresentada na Figura 4. É um polímero de glicose no qual as suas unidades estão unidas por ligações glicosídicas  $\beta$ -1,4 (KLEMM et al., 2005). Há um consenso de que as cadeias de celulose são paralelas e ligadas por ligações de hidrogênio intermoleculares. As camadas formadas pelas cadeias empacotam-se umas sobre as outras, formando domínios cristalinos de espessura nanométrica.

Existem três grupos principais de polímeros de celulose: i) ésteres de celulose, podendo ser

funcionalizados com substâncias inorgânicas (como o nitrato de celulose) ou orgânicas (como o acetato de celulose), ii) éteres de celulose (como a carboximetilcelulose), e iii) celulose regenerada (como o celofane e as fibras de celulose feitas pelo homem) (SHEN et al., 2009). A celulose regenerada constitui o maior dos três grupos, com uma produção mundial de 3,5 milhões de toneladas, seguida dos ésteres de celulose (acima de 1 milhão de toneladas) e éteres de celulose (abaixo de 1 milhão de toneladas) (SHEN et al., 2009). Estimativas indicam que para a produção de 400 quilogramas de celulose regenerada é necessária uma tonelada de biomassa como a madeira (INSTITUTE FOR BIOPLASTICS AND BIOCOSCOMPOSITES, 2014). Essa mesma quantidade de madeira gera em média 750 quilogramas de éster de celulose (INSTITUTE FOR BIOPLASTICS AND BIOCOSCOMPOSITES, 2014).

Atualmente, a celulose apresenta várias aplicações na área de materiais, que se utilizam de sua biodegradabilidade, grande disponibilidade e baixo custo, como a formulação de hidrogéis, microcápsulas, filmes e reforço de compósitos na forma de fibras. Entre estas aplicações, a utilização de nanofibras de celulose como reforço em polímeros e compósitos é uma tecnologia em desenvolvimento que apresenta grande oportunidade para a geração de novos produtos e processos (SILVA et al., 2009). Estas nanofibras são extraídas em condições controladas. Sua estrutura altamente ordenada produz um material de alta resistência que é insolúvel em solventes comuns e que forma suspensões coloidais em água (SAMIR et al., 2005).

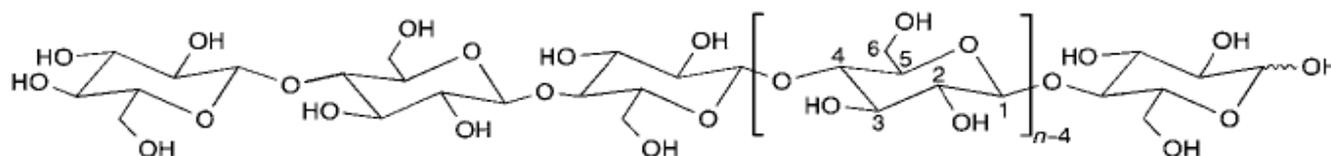


Figura 4. Representação da molécula de celulose.

## AMIDO

Este polímero natural, barato, renovável e biodegradável apresenta uma atrativa combinação de disponibilidade e preço, sendo assim um excelente candidato para a produção de plásticos biodegradáveis. Uma macromolécula de amido é formada por várias unidades de monossacarídeos ou de seus derivados, unidas entre si por meio de ligações glicosídicas  $\alpha$ -1,4 (Figura 5). Apresenta dois importantes grupos funcionais: o grupo  $-OH$ , que possui caráter nucleofílico e é suscetível a reações de substituição; e a ligação glicosídica  $C-O-C$ , que é suscetível à quebra de cadeia. Através de reações com os grupos  $-OH$ , várias propriedades podem ser modificadas (TESTER; KARKALAS, 2004). O amido constitui, juntamente com a celulose, uma das mais abundantes fontes de carboidratos, sendo obtido a partir de matérias-primas de origem tropical, como milho, batata, batata-doce e mandioca (CEREDA et al., 2003).

No entanto, o amido nativo não é ideal para a maioria das aplicações na área de materiais, apresentando algumas desvantagens, como rigidez e hidrofobicidade. Além disso, o ponto de fusão do amido é mais alto que sua temperatura de decomposição térmica, o que leva a problemas no seu processamento (SHEN et al., 2009). Para superar essas desvantagens, o amido nativo é processado quimicamente, termicamente ou mecanicamente. Para a produção de amido termoplástico a partir do milho, por exemplo, parte-se de 1 tonelada de milho e, com a adição de 0,23 toneladas de plastificante em uma etapa de extrusão, é possível obter 0,93 toneladas de amido termoplástico (INSTITUTE FOR BIOPLASTICS AND BIOCOMPOSITES, 2014). Atualmente, os plásticos de amido são um dos mais importantes biopolímeros no mercado. Na Europa, a capacidade de produção de amido passou de

30.000 toneladas em 2003 para 130.000 toneladas em 2007, representando um crescimento anual médio de 50% (SHEN et al., 2009).

Para a obtenção de um plástico de amido é necessário que haja a destruição da estrutura semicristalina original dos seus grânulos, com a consequente formação de uma fase contínua. Isto pode ser conseguido por meio de uma combinação de energia mecânica, energia térmica e adição de plastificantes. O plástico de amido é biodegradável e se decompõe totalmente em resíduos não tóxicos.

## POLI-(HIDROXI-ALCANOATOS) (PHAs)

Os PHAs são poliésteres alifáticos produzidos via fermentação de matérias-primas renováveis. Estes poliésteres são produzidos por culturas bacterianas cultivadas com sacarose ou glicose, que propiciam a formação do termoplástico em grânulos no interior de determinadas linhagens de células bacterianas (REDDY et al., 2003). Os PHAs apresentam boa resistência à hidrólise química, mas são suscetíveis ao ataque bacteriológico, o que limita o seu uso em embalagens de alimentos.

O poli-(hidroxi-butirato) (PHB, Figura 6) é o biopolímero mais estudado e melhor caracterizado da família dos poli(hidroxi-alcenoatos). Materiais preparados com este biopolímero apresentam propriedades tais como biocompatibilidade e biodegradação completa em dióxido de carbono e água quando expostos a microrganismos. Além disso, suas propriedades mecânicas e físico-químicas os fazem altamente competitivos com o polipropileno e polietileno (POSADA et al., 2011). Uma tonelada de milho gera 0,43 toneladas de PHB, após um processo que envolve as etapas de

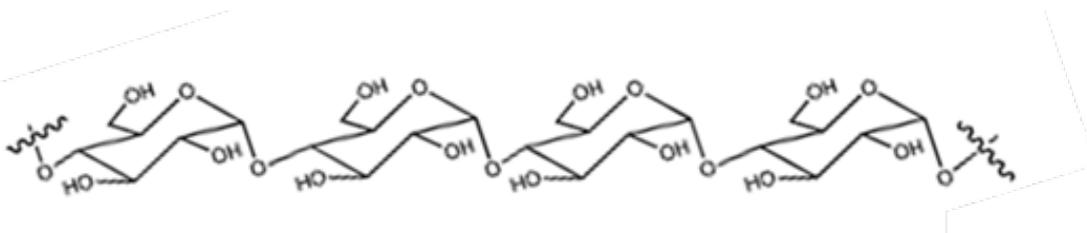


Figura 5. Representação da molécula de amido.

hidrólise, fermentação, isolamento dos biopolímeros e granulação (INSTITUTE FOR BIOPLASTICS AND BIOCOSCOMPOSITES, 2014). Suas principais aplicações envolvem a fabricação de utilidades domésticas, embalagens e a fabricação de fios de sutura (BORDES et al., 2009).

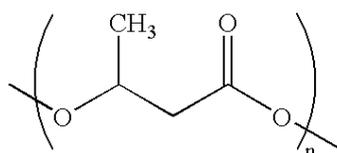


Figura 6. Representação da molécula de poli-(hidroxi-butirato) (PHB).

Diversas empresas ao redor do mundo dedicam-se à produção de PHB. Por exemplo, um grupo de pesquisadores da Micromidas Inc. está produzindo PHB a partir de bactérias disponíveis em águas residuais municipais. Já a empresa brasileira PHB Industrial inaugurou em 2000 uma planta piloto de PHB com capacidade de produção de 50 toneladas por ano, usando correntes orgânicas residuais e cana-de-açúcar (LEE et al., 2012).

## POLI-(ÁCIDO LÁTICO) (PLA)

O PLA é um poliéster alifático produzido via polimerização do ácido lático (Figura 7). Estudos econômicos mostram que este biopolímero é um material economicamente viável para aplicação em embalagens, levando em conta que tecnologias modernas baixaram os seus custos de produção (VINK et al., 2003; AURAS et al., 2004). Entre as vantagens da utilização deste biopolímero estão sua obtenção a partir de uma fonte agrícola renovável (milho), o consumo de dióxido de carbono durante a sua produção, sua reciclabilidade e suas propriedades físicas e mecânicas, que podem ser modificadas pela estereoquímica do polímero (AURAS et al., 2004).

O PLA tem propriedades como boa aparência, alta força mecânica, baixa toxicidade e boas propriedades de barreira. Poliésteres alifáticos como o PLA são rapidamente degradados por microrganismos presentes no ambiente (JAMSHIDIAN et al., 2010). Os filmes de PLA disponíveis comercialmente apresentam propriedades mecânicas superiores às do

poliestireno e semelhantes às das embalagens de poli(tereftalato de etileno) (PET) (VINK et al., 2003).

A maior planta de PLA do mundo fica nos Estados Unidos, no estado de Nebraska. Nessa planta, o amido de milho é convertido em glicose, que é então parcialmente fermentada à ácido lático (SHEN et al., 2009). A capacidade dessa planta é de 250 milhões de quilos por ano. Estimativas indicam que 1 tonelada de cana-de-açúcar gera, após fermentação, desidratação e polimerização, 90 quilos de PLA (INSTITUTE FOR BIOPLASTICS AND BIOCOSCOMPOSITES, 2014). Inicialmente, o preço de produção do PLA era de 15 a 20 vezes mais alto que o preço de produção de poliolefinas. No entanto, após o estudo e melhoramento de processos de produção, esse custo atualmente é apenas 15% a 25% maior que a produção do poliéster PET (SHEN et al., 2009).

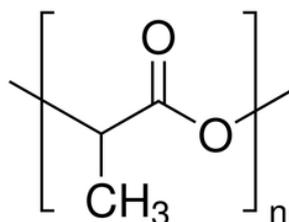


Figura 7. Representação da estrutura do poli-(ácido lático) (PLA).

## BORRACHA NATURAL

A borracha natural é um elastômero, ou seja, possui a habilidade de retornar a sua forma original após ser deformada por tensão, compressão ou cisalhamento. Devido a sua estrutura molecular única e alta massa molar, a borracha bruta possui propriedades valiosas de elasticidade, plasticidade, força, durabilidade, resistência à abrasão e ao impacto, dispersão eficiente de calor, não-condutividade elétrica e resistência à água (SINGH, 2010).

O látex de borracha natural é extraído da seringueira (*Hevea brasiliensis*), originária da Floresta Amazônica. No final de século XIX várias sementes foram levadas ao sudeste da Ásia e plantadas para a produção de borracha. Atualmente, plantações de seringueira são encontradas em muitos países incluindo Tailândia, Indonésia, Malásia, Índia, China, Vietnã e algumas partes da África. O Brasil também

é produtor de borracha natural, contudo, a produção nacional não é suficiente para abastecer o mercado interno, sendo o Brasil um importador de borracha desde 1951. Em 2003, 7,97 milhões de toneladas de borracha foram produzidas (SINGH, 2010). O látex é uma dispersão coloidal de polímero em meio aquoso, de aspecto leitoso. Normalmente, as partículas apresentam geometria aproximadamente esférica e diâmetro de 20 a 1300 nm.

A composição química do látex natural fresco é bem complexa. Os principais componentes são água e hidrocarbonetos (RIPPEL et al., 2002). Os hidrocarbonetos compõem aproximadamente 33% da massa do látex e se apresentam como o polímero *cis*-1,4-poli-isopreno (Figura 8). A dispersão de látex também pode conter solutos, tais como eletrólitos, surfactantes e polímeros hidrofílicos (BLACKLEY, 1987).

A borracha natural, para ser utilizada em diversas aplicações, passa pelo processo de vulcanização, na qual a borracha natural é reticulada quando aquecida na presença de enxofre, formando ligações cruzadas entre as macromoléculas. A vulcanização dá forma e confere propriedades desejadas ao produto final. Contudo, a borracha vulcanizada representa um desafio no que diz respeito ao descarte, pois o seu tempo de degradação no meio ambiente é extremamente longo e sua queima ao ar livre não deve ser realizada devido à liberação de vapores sulfúricos, que estão associados à chuva ácida. A borracha natural encontra aplicações em diversos setores, como o setor de transportes, de consumo, médico e de higiene (SINGH, 2010).

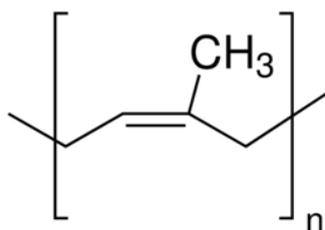


Figura 8. Representação da molécula *cis*-1,4-poli-isopreno, o principal componente da borracha natural.

## COMPÓSITOS E NANOCOMPÓSITOS

Alguns inconvenientes da produção de biopolímeros, como propriedades mecânicas inferiores às dos polímeros convencionais e custo elevado, podem ser solucionados por meio da preparação de compósitos.

Compósitos são, por definição, materiais que possuem uma combinação de dois ou mais componentes distintos, havendo uma interface reconhecível entre eles (BEAUMONT, 1989). Desse modo, os compósitos poliméricos têm, tipicamente, uma ou mais fases descontínuas (carga ou reforço) envolvidas por uma fase contínua (matriz). Eles atuam em conjunto, criando um efeito sinérgico, que faz com que as propriedades do compósito sejam superiores às de cada constituinte individualmente.

Porém, para que as propriedades mecânicas dos compósitos sejam melhoradas, é necessária a adição de um alto teor de reforço. Isso pode ocasionar algumas desvantagens, como aumento na densidade do produto e perda de tenacidade, devido à possível incompatibilidade interfacial entre o polímero e o reforço (PARK, 2003).

Quando a fase descontínua do compósito apresenta pelo menos uma dimensão de ordem nanométrica, este passa a ser denominado nanocompósito. Nesse caso, a adição de níveis mínimos de carga ( $\leq 5\%$  em peso) pode melhorar as propriedades mecânicas, térmicas, de barreira, retardância à chama e estabilidade dimensional dos materiais. A eficiência do reforço dos nanocompósitos é igual à de compósitos convencionais com 40 a 50% de carga. Esta melhora é devido à dispersão das nanocargas na matriz, tendo como resultado uma alta área interfacial com boas interações entre as nanocargas e a matriz polimérica (CHIVRAC et al., 2006). Entre as nanocargas mais estudadas podemos citar as argilas, as nanofibras de celulose, os nanotubos de carbono, entre outras.

Nanocompósitos também oferecem benefícios extras tais como baixa densidade, transparência, boa fluidez, melhores propriedades de superfície e reciclagem. Além disso, níveis mais baixos de reforço contribuem para a produção de componentes mais leves, o que é um fator

desejável em muitas aplicações. O aumento de muitas propriedades reside no comprimento da escala fundamental, dominando a morfologia e as propriedades destes materiais (AZEREDO, 2009).

## BIODEGRADAÇÃO

A degradação pode ser descrita como um processo irreversível que leva a uma alteração significativa na estrutura do material. É caracterizada por mudanças nas suas propriedades e/ou pela sua fragmentação. Para que a degradação seja completa, deve haver formação de CO<sub>2</sub>, água e outros produtos bioassimiláveis (ANDRADE et al., 2001; MEI; MARIANI, 2005).

A degradação polimérica pode ser causada por diversos fatores ambientais. Os mais comuns são calor (termodegradação), luz solar (fotodegradação), água (hidrólise), oxigênio (degradação oxidativa) e microrganismos (biodegradação), entre outros (MEI; MARIANI, 2005).

As bactérias e os fungos, com suas respectivas enzimas, são de grande interesse na biodegradação de polímeros. Tais microrganismos consomem o material como fonte de alimento até que sua forma original desapareça, sendo assim responsáveis pela deterioração dos polímeros. Em condições apropriadas de umidade, temperatura e disponibilidade de oxigênio, a biodegradação é um processo relativamente rápido. Estudos de biodegradação são importantes tanto para minimizar os efeitos de resíduos plásticos sintéticos descartados no meio ambiente, como para verificar a aplicabilidade de polímeros biodegradáveis no setor de embalagens.

## CONCLUSÕES

A preparação de embalagens e outros materiais utilizando polímeros biodegradáveis ou renováveis é um tema de extrema importância para o Brasil e para o mundo. Prova disso é o envolvimento cada vez maior de empresas de grande renome internacional, como Braskem, Coca Cola Company e BASF no estudo e desenvolvimento de embalagens

preparadas, totalmente ou parcialmente, com polímeros renováveis ou biopolímeros.

Vários fatores contribuem para que o desenvolvimento de plásticos a partir de polímeros biodegradáveis ou renováveis seja visto como um tema de grande potencial de desenvolvimento futuro. Entre estes fatores, pode-se citar o risco de escassez de petróleo, o impacto ambiental causado pelo descarte de plásticos petroquímicos e os aspectos econômicos relacionados.

No entanto, alguns desafios devem ser enfrentados nos próximos anos para que a utilização de biopolímeros seja bem sucedida. Entre os principais tópicos que necessitam de resolução estão a melhora no desempenho de materiais preparados a partir de polímeros biodegradáveis, a redução dos custos de produção destes materiais e a competição de biopolímeros com a produção de alimentos.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, C. T.; COUTINHO, F. M. B.; DIAS, M. L.; LUCAS, E. F.; OLIVEIRA, C. M. F.; TABAK, D. **Dicionário de polímeros**. Rio de Janeiro: Interciência, 2001.
- AURAS, R.; HARTE, B.; SELKE, S. An overview of polylactides as packaging materials. **Macromolecular Bioscience**, Malden, v. 4, n. 9, p. 835-864, 2004.
- AVELLA, M.; DE VIEGLER, J. J.; ERRICO, M. E.; FISCHER, S.; VACCA, P.; VOLPE, M. G. Biodegradable starch/clay nanocomposite films for food packaging applications. **Food Chemistry**, Oxon, v. 93, n. 3, p. 467-474, 2005.
- AZEREDO, H. M. C. Nanocomposites for food packaging applications. **Food Research International**, Amsterdam, v. 42, n. 9, p. 1240-1253, 2009.
- BEAUMONT, P. W. R. The failure of fiber composites – An overview. **Journal of Strain Analysis for Engineering Design**, Suffolk, v. 24, n. 4, p. 189-205, 1989.
- BLACKLEY, D. C. **Latices**. In: **ENCYCLOPEDIA of polymer science and engineering**. New York: John Wiley & Sons, 1987. v. 8, p. 647.
- BORDES, P.; POLLET, E.; AVEROUS, L. Nano-biocomposites: biodegradable polyester/nanoclay systems. **Progress in Polymer Science**, Oxford, v. 34, n. 2, p. 125-155, 2009.
- BRASKEM. **I'm Green – Plástico Verde**, Disponível em: <<http://www.braskem.com.br/site.aspx/plasticoverde>>. Acesso em: abr. 2014.
- CANEVAROLO JUNIOR, S. V. **Ciência dos polímeros**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2006.

CEREDA, M. P.; DAIUTO, E. R.; VILPOUX, O. Metodologia de determinação de amido por digestão ácida em microondas. **Revista da Associação Brasileira dos Produtores de Amido de Mandioca**, v. 2, p. 29, 2003.

CHIVRAC, F.; KADLECOVA, Z.; POLLET, E.; AVÉROUS, L. Aromatic copolyester-based nano-biocomposites: Elaboration, structural characterization and properties. **Journal of Polymer and the Environment**, New York, v. 14, n. 4, p. 393-401, 2006.

EUROPEAN BIOPLASTICS. **Bioplastic facts and figures**. Disponível em: <[http://en.european-bioplastics.org/wp-content/uploads/2013/publications/EuBP\\_FactsFigures\\_bioplastics\\_2013.pdf](http://en.european-bioplastics.org/wp-content/uploads/2013/publications/EuBP_FactsFigures_bioplastics_2013.pdf)>. Acesso em: abr. 2014.

INSTITUTE FOR BIOPLASTICS AND BIOCOSMOS. **Global biopolymer production capacity**. Disponível em: <<http://ifbb.wp.hs-hannover.de/downloads/index.php?site=Statistics&nv=5-1-0-0-0>>. Acesso em: abr. 2014.

JAMSHIDIAN, M.; TEHRANY, E. A.; IMRAN, M.; JACQUOT, M.; DESOBRY, S. Poly-lactic acid: production, applications, nanocomposites, and release studies. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, Malden, v. 9, n. 5, p. 552-571, 2010.

KLEMM, D.; HEUBLEIN, B.; FINK, H.-P.; BOHN, A. Cellulose: fascinating biopolymer and sustainable raw material. **Angewandte Chemie International Edition**, Malden, v. 44, n. 22, p. 3358-3393, 2005.

LEE, S. U.; JUNG, K. J.; PARK, G. W.; SEO, C.; HONG, Y. K.; HONG, W. H.; CHANG, H. N. Bioprocessing aspects of fuels and chemicals from biomass. **Korean Journal of Chemical Engineering**, Seoul, v. 29, n. 7, p. 831-850, 2012.

MEI, L. H. I.; MARIANI, P. D. S. C. **Visão geral sobre polímeros ou plásticos ambientalmente degradáveis**. Campinas: UNICAMP, 2005.

PARK, H.; LEE, W.; PARK, C.; CHO, W.; HA, C. Environmentally friendly polymer hybrids - Part I - Mechanical, thermal, and barrier properties of thermoplastic starch/clay nanocomposites. **Journal of Materials Science**, Dordrecht, v. 38, n. 5, p. 909-915, 2003.

PERFIL 2012 – **Indústria Brasileira de Transformação de Material Plástico**. Disponível em: <[http://file.abiplast.org.br/download/estatistica/perfil2012\\_versao\\_eletronica.pdf](http://file.abiplast.org.br/download/estatistica/perfil2012_versao_eletronica.pdf)>. Acesso em: abr. 2014.

POSADA, J. A.; NARANJO, J. M.; LÓPEZ, J. A.; HIGUITA, J. C.; CARDONA, C. A. Design and analysis of poly-3-hydroxybutyrate production processes from crude glycerol. **Process Biochemistry**, Oxon, v. 46, n. 1, p. 310-317, 2011.

RAY, S. S.; BOUSMINA, M. Biodegradable polymers and their layered silicate nano composites: In greening the 21st century materials world. **Progress in Materials Science**, Oxford, v. 50, n. 8, p. 972-1079, 2005.

REDDY, C. S. K.; GHAI, R.; RASHMI, T.; KALIA, V. C. Polyhydroxyalkanoates: an overview. **Bioresources Technology**, Oxon, v. 87, n. 2, p. 137-146, 2003.

RIPPEL, M. M.; LEITE, C. A. P.; GALEMBECK, F. Elemental mapping in natural rubber latex films by electron energy loss spectroscopy associated with transmission. electron microscopy. **Analytical Chemistry**, Washington, DC, v. 74, n. 11, p. 2541-2546, 2002.

SAMIR, A. M. A.; ALLOIN, F.; DUFRESNE, A. Review of recent research into cellulosic whiskers, their properties and their application in nanocomposite field. **Biomacromolecules**, Washington, DC, v. 6, n. 2, p. 612-626, 2005.

SHEN, L.; HAUFÉ, J.; PATEL, M. K. **Product overview and market projection of emerging biobased plastics - PRO-BIP 2009**. Utrecht: Utrecht University, 2009. Report nº NWS-E-2009-32.

SILVA, R.; HERAGUCHI, S. K.; MUNIZ, E. C.; RUBIRA, A. F. Applications of lignocellulosic fibers in polymer chemistry and in composites. **Química Nova**, São Paulo, v. 32, n. 3, p. 661-671, 2009.

SINGH, B. P. (Ed.). Natural rubber. In: SINGH, H. P.; SINGH, B. P. **Industrial Crops and Uses**. [S.l.]: CABI, 2010. p. 358-383.

TESTER, R. F.; KARKALAS, J.; QI, X. J. Starch - composition, fine structure and architecture. **Journal of Cereal Science**, London, v. 39, n. 2, p. 151-165. 2004.

THE COCA COLA COMPANY. **Plant bottle**. Disponível em: <<http://www.coca-colacompany.com/plantbottle-technology/>>. Acesso em: abr. 2014.

VINK, E. T. H.; RÁBAGO, K. R.; GLASSNER, D. A.; GRUBER, P. Applications of life cycle assessment to NatureWorks (TM) polylactide (PLA) production. **Polymer Degradation and Stability**, Oxon, v. 80, n. 3, p. 403-419, 2003.

## Comunicado Técnico, 10

Exemplares desta edição podem ser adquiridos na:

**Embrapa Agroenergia**

Endereço: *Parque Estação Biológica - PqEB s/n, Brasília, DF*

Fone: (61) 3448-4246

Fax: (61) 3448-1589

[www.embrapa.br/agroenergia](http://www.embrapa.br/agroenergia)

1ª edição 2014

**Embrapa**

Ministério da  
Agricultura, Pecuária  
e Abastecimento

GOVERNO FEDERAL  
**BRASIL**  
PAÍS RICO É PAÍS SEM POBREZA

## Comitê de publicações

**Presidente:** *Marcia Mitiko Onoyama.*

**Secretária-Executiva:** *Lorena Costa Garcia.*

**Membros:** *Betânia Ferraz Quirino, Diogo Keiji Nakai, Eduardo Fernandes Formighieri, Felipe B. P. Carvalho, João Ricardo M. Almeida, Larissa Andreani Carvalho, Maria Lara Pereira Machado, Sílvia Belém Gonçalves.*

## Expediente

**Supervisão editorial:** *Marcia Mitiko Onoyama.*

**Revisão de texto:** *Sérgio Saraiva Nazareno dos Anjos.*

**Editoração eletrônica:** *Maria Goreti Braga dos Santos.*

**Normalização bibliográfica:** *Maria Lara Pereira Machado.*