

Poli (Ácido Lático) Aplicado para Embalagens de Alimentos: Uma Revisão

Ana Carolina Salgado de Oliveira^{1*}, Soraia Vilela Borges¹

¹ Departamento de Ciência dos Alimentos, Universidade Federal de Lavras, Caixa Postal 3037, CEP 37200-000, Lavras - MG.

*anacarolengalimentos@gmail.com

(Recebido em 30/09/2019; revisado em 04/11/2019; aceito em 08/07/2020)
(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

Resumo:

Poli (ácido lático) - PLA é um polímero biodegradável obtido de fontes renováveis e comercializado mundialmente em larga escala. Possui as mais diversas aplicações como embalagens, utensílios domésticos e peças biomédicas. PLA é um material seguro para a saúde humana e economicamente viável. Além disso, é resistente a bactérias e fungos, estável, e mantém suas propriedades por anos, o que permite que seja usado com segurança para embalagens de alimentos. Pesquisas estão sendo realizadas com o intuito de melhorar o desempenho do PLA em aplicações na área de embalagens sustentáveis para alimentos, como o desenvolvimento de blendas. As blendas reduzem o custo e melhoram a flexibilidade e a resistência do material. A utilização do PLA encoraja o uso e expansão de materiais de base agrícola. Dessa forma, o objetivo desse trabalho é apresentar uma visão geral e atual sobre o PLA, sua aplicação em embalagens para alimentos e perspectivas futuras.

Palavras-chave: Blendas, Biodegradável Degradação, Reciclagem.

Abstract:

Poly (lactic acid) - PLA is a biodegradable polymer obtained from renewable sources and marketed worldwide on a large scale. It has the most diverse applications such as packaging, household items, and biomedical parts. PLA is a safe and economically viable material for human health. In addition, it is resistant to bacteria and fungi, stable, and maintains its properties for years, which allows it to be safely used for food packaging. Research is being conducted to improve PLA performance in sustainable food packaging applications such as blending development. Blends reduce cost and improve material flexibility and strength. The use of PLA encourages the use and expansion of agriculturally based materials. Thus, the objective of this paper is to present an overview and current about PLA, its application in food packaging and future perspective.

Keywords: Blends, Biodegradable, Degradation, Recycling.

1. Introdução

Com o estilo de vida adotado pela população mundial, tem-se uma elevada utilização de materiais plásticos ou polímeros não biodegradáveis, acarretando um volume enorme de resíduos que, com o passar do tempo, se acumulam nos lixões e aterros sanitários gerando problemas ambientais. No ano de 2017, a produção mundial de materiais plásticos foi de 348 milhões de toneladas sendo que a grande maioria destes plásticos deriva de fontes não-renováveis como o petróleo [1]. A indústria de alimentos, além de consumir boa parte do plástico produzido mundialmente (18,6% da produção brasileira de plástico é destinada para esse setor, principalmente em embalagens flexíveis), ainda possui um agravante de, nesse setor industrial, o material plástico apresentar curtos ciclos de vida (até 01 ano) [2]. Tanto a indústria quanto a academia têm buscado desenvolver alternativas para a diminuição do lixo gerado devido ao uso de polímeros não biodegradáveis. Dentre essas alternativas, há a reciclagem, o

reaproveitamento e o desenvolvimento de novos materiais que são conhecidos como polímeros biodegradáveis, polímeros verdes e biopolímeros [3].

O Poli (ácido lático) - PLA é um polímero biodegradável obtido de fontes renováveis como o milho e é produzido e comercializado mundialmente em larga escala, sendo que cerca de 370 mil toneladas foram produzidas em 2017. Apresenta um crescimento rápido com uma taxa de crescimento anual estimada de 10% a 15% enquanto o mercado mundial de plásticos apresenta crescimento de 3,5% a 4% ao ano. Possui as mais diversas aplicações como embalagens, utensílios domésticos e peças com aplicações biomédicas. Muitas pesquisas estão sendo realizadas com o intuito de melhorar a desempenho do PLA em aplicações na área de embalagens sustentáveis, como a formação de blendas e compósitos e a copolimerização com outros polímeros [4].

Em muitas aplicações filmogênicas, como sacolas de mercado e de lixo, algumas propriedades mecânicas são importantes. Estas propriedades podem ser

melhoradas até certo ponto através da orientação molecular durante o processamento. Como nem sempre o uso de orientação mecânica é possível, a mistura de PLA com outros polímeros é uma estratégia útil para possibilitar tais aplicações ao polímero. Outro motivo para misturar o PLA com outros polímeros é reduzir o custo do material, uma vez que o custo do PLA é relativamente mais alto em comparação com outros plásticos derivados de petróleo [5-7].

Estudos econômicos demonstram que o PLA é um material economicamente viável para ser utilizado na confecção de embalagens [8]. Estudos na área da saúde mostram que o nível de ácido lático que migra da embalagem, produzida a partir do PLA, para o alimento é inferior que a quantidade de ácido lático usado como ingrediente de muitos alimentos. Assim, o PLA é, de fato, indicado para aplicação em embalagens de produtos alimentícios [8-10]. Além disso, estudos recentes mostram o PLA sendo amplamente aplicado como embalagem ativa para alimentos por meio de adição de agente ativos [11 - 13]

Dessa forma, o objetivo desse trabalho é apresentar uma visão geral e atual sobre o PLA, sua aplicação em embalagens para alimentos e perspectivas futuras de forma a possibilitar ao leitor a compreensão melhor sobre esse polímero aplicado a área de embalagens para alimentos.

2. Polímeros

Hoje em dia é quase impossível dissociar a vida humana do uso dos polímeros. É ilimitada a quantidade de bens de consumo que nos rodeiam que tem por base o uso de materiais poliméricos, principalmente nas indústrias de embalagens, de revestimentos, de automóveis e de vestuário. Isso se deve também ao fato de polímeros sintéticos estarem conquistando muitos mercados através da substituição de outros materiais como metais, papel e madeira [14].

Polímeros podem ser classificados sob diversos aspectos, sendo que os polímeros termoplásticos são materiais que podem ser moldados sob influência de temperatura e pressão, conservando a sua nova forma ao restabelecer as condições ambientes, em outras palavras, fundem por aquecimento e solidificam por resfriamento. Este ciclo pode ser repetido diversas vezes, sendo, portanto, a forma final reversível [4]. Como exemplos de polímeros termoplásticos, se podem citar os polímeros polietileno, polipropileno, policloreto de vinila e poli (ácido lático) [16-18]. Em alimentos, o PET (polietileno tereftalato) é um dos termoplásticos mais amplamente utilizados, principalmente para embalar refrigerantes e óleos [19].

Os termoplásticos podem ser transformados por alguns tipos de processos: compressão, extrusão, injeção, moldagem por sopro, termoformagem e rotomoldagem [20].

3. Poli (ácido lático) – (PLA)

O Poli (ácido lático) ou, simplesmente, PLA é um polímero biodegradável obtido de fontes renováveis como o milho e é produzido e comercializado mundialmente em larga escala. Possui as mais diversas aplicações como embalagens, utensílios domésticos e peças biomédicas. Além disso, por conseguir passar pelo processo de fiação, também pode ser usado em suturas e em substituição a tecidos animais [21-28].

O monômero do PLA é o ácido lático (Figura 1) que é produzido a partir de diversas fontes naturais (etileno, etanol, acetaldeído ou acetileno), sendo a principal fonte a fermentação de carboidratos. O ácido lático é uma molécula orgânica que apresenta dois grupos funcionais: álcool e ácido carboxílico. Os arranjos óticos desses grupos funcionais possibilitam ao PLA duas configurações isoméricas diferentes, a dextrógira (D ou +) denominada como poli (D-lactídeo) ou PDLA e a levógira (L ou -) denominada como poli (L-lactídeo) ou PLLA (Figura 2) [29,30].

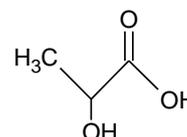


Figura 1 – Molécula de ácido lático, monômero do PLA.

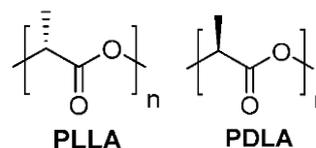


Figura 2 – Configurações isoméricas da molécula de PLA.

A fermentação, por bactérias *Lactobacillus* sp, de açúcares simples obtidos de biomassa gera ácido lático que sofre polimerização originando o PLA. A via mais comum para a polimerização é por abertura de anel através de condensação de lactídeo com catalisador metálico (o mais usado é o octoato de estanho) seguido por eliminação de uma molécula de água a alta temperatura, mas inferior a 200 °C [31].

O PLA possui uma grande variedade de polímeros e copolímeros com diferentes teores de cristalinidade, peso molecular e teores de PLLA e PDLA, pois apresenta mais de uma rota de síntese e o monômero com diferentes arranjos óticos, conforme pode ser observado na Figura 3 [24]. Historicamente, o PLA foi sintetizado pela primeira vez na década de 1930 e suas diversas sínteses foram sendo estudadas ao longo de tempo de todo o século XX, conforme observado na Tabela 1.

A produção de PLA possui vantagens que são: i) o PLA pode ser obtido de fontes agrícolas renováveis; ii) sua síntese consome dióxido de carbono; iii) gera economia significativa de energia; iv) o PLA é compostável e reciclável; v) pode melhorar a economia

agrícola; v) as propriedades físicas e mecânicas podem ser manipuladas [29].

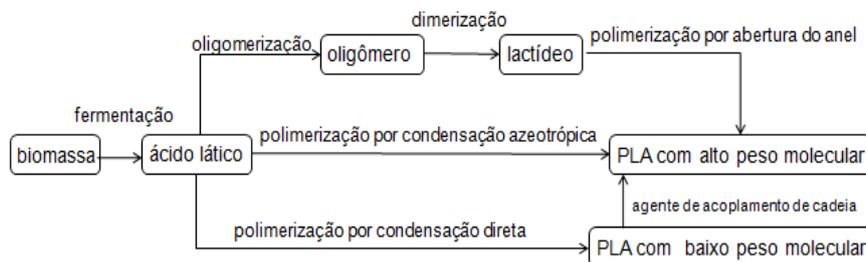


Figura 3 – Rotas para produção de PLA. Fonte: adaptado de Pang et al. [65].

Tabela 1 – Histórico e evolução do PLA.

Ano	Acontecimento
1932	síntese de PLA de baixo peso molecular pelos pesquisadores Carothers, Dorough e Natta
1954	síntese de PLA de alto peso molecular pela empresa Du Pont
1966	demonstração da degradação <i>in vitro</i> de PLA pelo pesquisado Kullar e possibilitou o surgimento do real interesse pela indústria
1968	relato da estrutura cristalina pseudo-ortorrômbica do PLLA pelos pesquisadores Santis e Kovacs
1971	FDA aprova a utilização do PLA na área médica
2000*	utilização do PDLA como veículo de entrega de medicamentos e materiais de suporte para regeneração de tecido utilização do PLLA em materiais ortopédicos
2004	FDA aprova utilização do PLLA injetável em humanos (abordagem da lipodistrofia causada pelo HIV e corrigir perda de gordura facial)
2010*	utilização do PLA na indústria de embalagens para alimentos

*data aproximada. Fontes: [66-68].

Graças à variedade de PLAs, ao tipo de processamento (extrusão, injeção) e a função da peça final, obtém-se materiais com as mais diversas características [22, 23, 30].

O ácido polilático (PLA) é um biodegradável altamente versátil cujas propriedades, tais como grau de cristalinidade, temperatura de fusão e temperatura de transição de vítrea pode ser adaptada controlando a composição monomérica de suas formas isoméricas ópticas, L e D [18].

O poli (ácido láctico) quando comparado com outros polímeros biodegradáveis (Tabela 2) apresenta propriedades mecânicas e térmicas semelhantes às de polímeros com importantes aplicações, como o PET [24]. PLA é muito comercializado como embalagens de descarte de uso único, como copos para bebidas frias, garrafas, recipientes para tampas, embalagens blister, bandejas termoformadas, envoltórios e filmes flexíveis. Apesar de possuir muitas vantagens para aplicação em embalagens (fácil processamento, boa transparência e ser ambientalmente benigno) e ser economicamente competitivo, o PLA possui desvantagens que são, entre elas, o baixo desempenho mecânico e a sensibilidade à degradação térmica [30, 31].

Muitas pesquisas estão sendo realizadas com o intuito de melhorar a desempenho do PLA nas aplicações

na área de embalagens sustentáveis para alimentos, como a formação de blendas e compósitos e a copolimerização com outros polímeros [31].

4. Filmes de PLA obtidos por extrusão

O PLA assim como outros polímeros biodegradáveis pode formar filmes por diversas técnicas como casting, extrusão e calandragem. A técnica mais citada e trabalhada em laboratório é casting [33-35], contudo por apresentar a etapa de evaporação do solvente torna-se inviável graças ao gasto energético e difícil aplicação industrial. Por isso, a técnica de extrusão que é mais rápida e apresenta baixo impacto ambiental (não usa solvente e não gera resíduo) é a técnica mais utilizada em grande parte dos filmes comerciais [36,37].

Quando se compara os filmes produzidos pelas duas técnicas como realizado por Farias [38] e Yang et al. [39], observa-se diferenças não somente nas propriedades mecânicas mas também em outras características relevantes que justificam a escolha pelo método de extrusão. Os trabalhos de filmes de PLA por casting são, em sua maioria, aqueles nos quais o PLA é reforçado com celulose. Enquanto que os trabalhos de filmes de PLA por extrusão são inúmeros [40, 41].

A extrusão é um processo contínuo e envolve o transporte, a plastificação e a mistura de um ou mais polímeros. O processamento por extrusão permite que se faça a incorporação de aditivos, cargas e pigmentos bem como a reciclagem dos polímeros [39,42] e é a principal técnica usada na produção de filmes para embalagens [43-45]. A utilização do processo de extrusão na

indústria de alimentos não se restringe somente a confecção de embalagens. Aplica-se extrusão na panificação (biscoitos e massas) e na área de cereais e snacks. Contudo, a extrusão é a técnica mais usada para a confecção de embalagens [46].

Tabela 2 – Módulo de Elasticidade (E), resistência à tração (σ_s) e temperatura de fusão (Tm) de alguns polímeros.

Polímero	E (Gpa)	σ_s (Mpa)	Tm (°C)
Polietileno de baixa densidade	0,2 - 0,3	8,3 - 31,4	115
Polietileno de alta densidade	1,1	22,1 - 31	137
Polipropileno	1,1 - 1,6	31 - 41,4	175
Fenol-formaldeído	2,8 - 4,8	34,5 - 62,1	NA
Poliamida (Nylon 6.6)	1,6 - 3,8	75,9 - 94,5	265
Polietileno tereftálico (PET)	2,8 - 4,1	48,3 - 72	265
Poli (ácido láctico)	1,2 - 3,0	28 - 50	175
Poli (hidroxi butirato)	2,5	36	171
Poli (caprolactona)	0,4	16	57

Fonte: [24].

5. Blendas com poli (ácido láctico)

Em muitas aplicações filmogênicas, como sacolas de mercado e de lixo, algumas propriedades como força de ruptura, alongamento e resistência ao rasgamento são importantes. Estas propriedades podem ser melhoradas até certo ponto pelo tipo de processamento que proporcione, por exemplo, orientação biaxial e alongamento na moldagem por sopro. No entanto, nem sempre o tipo de processamento favorece a obtenção das propriedades mecânicas desejadas. Sendo assim, a mistura de PLA com outros polímeros é uma estratégia útil para conferir flexibilidade e resistência ao polímero, pois o PLA é quebradiço e tem propriedades de resistência térmica e de impacto relativamente mais baixo. Além disso, a misturar o PLA com outros polímeros também é utilizada para: reduzir o custo do material, uma vez que o custo do PLA é mais alto em comparação com outros plásticos derivados de petróleo; e, melhorar a capacidade de reciclagem do material [46]. Vários polímeros têm sido usados para melhorar a propriedades de filmes de PLA, incluindo amido termoplástico, poli (etileno glicol), poli (hidroxi butirato), poli (hidroxi alcanosatos), quitosana e poli (caprolactona) [31, 47-50].

A maioria dos polímeros naturais são materiais hidrofílicos já que contêm grupos hidroxila ou polar. Por outro lado, a maioria dos polímeros sintéticos biodegradáveis, especialmente os poliésteres alifáticos, são hidrofóbicos ou sensíveis à umidade. A mistura desses dois tipos de polímeros é de significativo interesse, já que pode levar ao desenvolvimento de uma nova gama de materiais poliméricos biodegradáveis. O PLA/amido e PLA/quitosana são dois candidatos promissores para misturas de polímeros biodegradáveis. No entanto, PLA é hidrofóbico e amido ou quitosana são hidrofílicos gerando sistemas termodinamicamente imiscíveis, levando a pouca adesão entre os componentes. Vários compatibilizantes e aditivos foram

investigados para melhorar as interações interfaciais dessas misturas. O difenilmetano diisocianato, o maleato de dioctilo, o poli (álcool vínlico) e poli (hidroxi ester-éter) estão sendo utilizados com sucesso como compatibilizante entre o amido e o PLA [50].

Embora o PLA seja biodegradável, o que reduz significativamente o impacto ambiental negativo do PLA e de seus resíduos, o estudo da reciclagem do PLA puro e das mudanças nas suas propriedades após os processamentos múltiplos são importantes. Isso por quê a geração e manipulação de resíduos é inevitável. Além disso, a possibilidade de reutilizar o resíduo é recomendável para prolongar a vida útil antes de finalmente descartá-lo. E, por fim, o baixo impacto ambiental do PLA ficaria comprometido se a reciclagem não podem ser realizada [49].

Apesar da reciclagem mecânica, ou seja, a reciclagem por extrusão, ser o método de reciclagem mais favorável, apresenta limitações que reduz sua utilização em embalagem de alimentos. Além disso, o PLA puro reciclado apresenta uma diminuição nas propriedades térmicas, aumento na permeabilidade ao vapor de água e ao oxigênio. A diminuição na estabilidade térmica, com redução da temperatura de cristalização e de fusão a medida que ocorre o aumento do número de ciclos de reciclagem. A viscosidade do PLA diminuiu ao longo dos ciclos de extrusão. Tais alterações são atribuídas à degradação do PLA por cisão da cadeia durante o processamento, o que leva a uma redução significativa do peso molecular do polímero [49].

A fim de superar as desvantagens da reciclagem do PLA puro e possibilitar sua utilização como embalagens para alimentos, uma estratégia viável que pode ser utilizada é a constituição de blendas, principalmente com a utilização de outros polímeros biodegradáveis, pois outros métodos de melhoria, tais como copolimerização de ácido láctico ácido com outros monômeros não foram bem sucedidos ou comercialmente viáveis. Mesmo se

opta pela utilização de blendas poliméricas para melhorar a reciclabilidade do PLA, existem outras estratégias que podem ser adotadas concomitantemente a fim de melhorar ainda mais a reciclabilidade, com a utilização de aditivos que proporcionem a redução dos custos, inibição da degradabilidade, aumentando a resistência térmica, reduzindo a fragilidade e aumentando a taxa de cristalização [49].

Uma alternativa usada em blendas de PLA, é a incorporação de nanopartículas às matrizes poliméricas, pois melhoraram as propriedades mecânicas, térmicas e de barreiras mesmo quando adicionadas em pequenas quantidades (2-8%, p/p) [51]. As nanopartículas alteram

as propriedades mecânicas aumentando a resistência do material à medida que a matriz transfere parte da solicitação mecânica, para o reforço graças à interface matriz/reforço [52,53]. Tais partículas melhoram as propriedades de barreira, a medida que criam um caminho tortuoso pelo qual o permeando terá que percorrer para atravessar todo o material [54]. Além disso, as nanopartículas promovem um aumento da temperatura de transição vítrea, pois as interações matriz e reforço diminuem a mobilidade da cadeia aumentando a quantidade de energia necessária para que as cadeias da fase amorfa adquiram mobilidade [55,56].

Tabela 3 – Exemplos de pesquisas atuais sobre a utilização do PLA em embalagens para alimentos.

Artigo	Materiais Utilizados	Autores e ano
Supercritical CO ₂ impregnation of PLA/PCL films with natural substances for bacterial growth control in food packaging.	PLA, poli(caprolactona), CO ₂ .	Milovanovic et al. (2018) [69].
Sustainable packaging biocomposites from polylactic acid and wheat straw: Enhanced physical performance by solid state shear milling process.	PLA, palha de trigo.	Yang et al. (2018) [70].
Antibacterial food packaging sheets prepared by coating chitosan on corona-treated extruded poly(lactic acid)/poly(butylene succinate) blends.	PLA, quitosana, poli (butileno-succinato).	Hongsriphan; Sanga (2017) [71].
PLA and two components silicon rubber blends aiming for frozen foods packaging applications.	PLA, silicone.	Meekum; Khiansanoi (2018) [72].
Carvacrol loaded electrospun fibrous films from zein and poly(lactic acid) for active food packaging.	PLA, carvacrol.	Altan; Aytac; Uyar (2018) [73].
Nano-magnesium oxide reinforced polylactic acid biofilms for food packaging applications.	PLA, óxido de magnésio.	Swaroop; Shukla (2018) [74].
Electrospun Antimicrobial Polylactic Acid/Tea Polyphenol Nanofibers for Food-Packaging Applications.	PLA, polifenol.	Liu (2018) [75].
Poly lactide/graphene oxide nanosheets/clove essential oil composite films for potential food packaging applications.	PLA, óxido de grafeno e óleo essencial de côco.	Arfat et al. (2018) [76].
Antimicrobial biodegradable food packaging impregnated with Bacteriocin 7293 for control of pathogenic bacteria in pangasius fish fillets.	PLA, serradura.	Woraprayote et al. (2018) [77].
Rosin modified cellulose nanofiber as a reinforcing and co-antimicrobial agents in polylactic acid /chitosan composite film for food packaging.	PLA, quitosana, nanofibras de celulose.	Niu (2018) [78].

Ao longo dos últimos anos, vários nanomateriais foram investigados para reforçar as blendas de PLA, incluindo silicatos em camadas, nanotubo de carbono, hidroxiapatita, titanato em camadas e hidróxido de alumínio. Entre os nanomateriais investigados, a montmorilonita é a mais amplamente estudada principalmente por possuir fontes abundantes, características benignas ao meio ambiente e baixo custo [47, 48]. Infelizmente, as condições típicas de extrusão causam degradação térmica indesejada que levam à queda do peso molecular e diminuem o efeito de melhoria de desempenho de nanopartículas. Contudo mesmo com esse decréscimo o uso de nanopartículas ainda é considerado, uma vez que a melhora nas propriedades das blendas é significativa [47].

6. Poli (ácido láctico) aplicado a embalagens para alimentos

O poli (ácido láctico) é amplamente usado em embalagens para alimentos e, devido ao custo, inicialmente o PLA era aplicado como material em filmes de alto valor, embalagens termoformadas e rígidas, recipientes para alimentos e bebidas e papéis revestidos. Contudo a aplicação do PLA pôde ser ampliada com o surgimento de novas tecnologias que reduzam os custos de produção [29].

Estudos econômicos demonstram que o PLA é um material economicamente viável para ser utilizado na confecção de embalagens. Estudos na área de saúde

mostram que o nível de ácido lático que migra da embalagem para o alimento é inferior que a quantidade de ácido lático usado como ingrediente de muitos alimentos. Assim, o PLA é, de fato, indicado para aplicação em embalagens de produtos alimentícios [29]. Atualmente, o PLA é amplamente comercializado como embalagens de descarte de uso único: copos para bebidas frias, garrafas, recipientes para tampas, embalagens blister, bandejas termoformadas, envoltórios e filmes flexíveis [31,32]. Além disso, inúmeras pesquisas estão sendo desenvolvidas com intuito de ampliar a aplicação desse polímero na área de embalagens para alimentos como observado nos exemplos expostos na Tabela 3.

Pelo fato de ser um polímero biodegradável, possuir base biológica e apresentar uma ampla gama de aplicações, o PLA se tornou um plástico commodity economicamente viável na indústria, principalmente na indústria de embalagens para alimentos [49], com produção mundial de cerca de 370 mil toneladas em 2017 [57].

7. Degradação do poli (ácido lático)

O PLA se encontra entre os polímeros biodegradáveis mais consumidos no mundo [58-60]. A biodegradação é conseguida através da quebra de ligações hidroliticamente instáveis presentes em polímeros biodegradáveis, sendo que os grupos funcionais mais comuns dos polímeros biodegradáveis são ésteres, anidridos, ortoésteres e amidas [61]. Como um poliéster, o comportamento de biodegradação do PLA é uma característica típica do material e a razão mais importante para o alto interesse em seu uso em aplicações médicas e na indústria [62,63].

PLA tem uma meia-vida relativamente longa, quando comparada a outros polímeros biodegradáveis, devido a efeitos estéricos onde o grupo alquil impede o ataque pela água, ou seja, a hidrólise. Por outro lado, a degradação após a eliminação no meio ambiente é complexa porque o PLA é amplamente resistente a ataques por microrganismos em condições de solo ou esgoto. O polímero deve primeiro ser hidrolisado a temperaturas elevadas (maiores que 60 °C) a fim de reduzir o peso molecular antes que a biodegradação possa começar. Quando o peso molecular atinge aproximadamente 10 kDa, os microrganismos presentes no solo começam a digerir o PLA produzindo dióxido de carbono e água. A taxa de hidrólise pode ser acelerada em presença de ácidos ou bases e depende do conteúdo de umidade e temperatura [32].

O processo também depende de características intrínsecas ao polímero (diferentes teores de cristalinidade, peso molecular e teores de PLLA e PDLA) e de condições ambientais (umidade, temperatura e tipo de solo). Em condições típicas de uso, o PLA é muito estável, resistente a bactérias e fungos e mantém suas propriedades físicas por anos, o que permite que ele seja usado com segurança para aplicações como embalagens de alimentos e saneamento [32,64].

8. Conclusões e Perspectivas Futuras

O PLA está se tornando uma alternativa econômica a materiais baseados de origem petroquímica. A introdução do PLA encoraja o uso e a expansão de materiais de base agrícola sendo que, à medida que o preço do PLA diminui e maiores volumes de PLA são produzidos, novas as aplicações são buscadas. Além disso, a utilização do PLA em blendas juntamente com outros polímeros de menores preços, além de baratearem o produto final, também promove a melhora nas propriedades dos produtos quando comparado com PLA puro. Pelo fato de ser um polímero biodegradável, possuir base biológica e apresentar uma ampla gama de aplicações, o PLA se tornou um plástico commodity economicamente viável na indústria, principalmente na indústria de embalagens para alimentos. Estudos demonstram que o PLA é um material economicamente viável e seguro em termos de saúde, uma vez que, a quantidade de ácido lático que migra da embalagem para o alimento é inferior a quantidade usada como ingrediente em muitos alimentos. O PLA é muito estável, resistente a bactérias e fungos e mantém suas propriedades físicas por anos, o que permite que seja usado com segurança para embalagens de alimentos. Novas e promissoras pesquisas são realizadas com o intuito de melhorar o desempenho e aumentar o número de aplicações que o PLA tem atualmente na área de embalagens de alimentos.

Referências

- [1] Europe, Plastics (Org.). Plastics – the Facts 2017. 2018. Disponível em: <https://www.plasticseurope.org/application/files/5715/1717/4180/Plastics_the_facts_2017_FINAL_for_website_one_page.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2019.
- [2] Abiplast (Brasil) (Org.). Perfil 2017. 2018. Disponível em: <<http://file.abiplast.org.br/file/download/2018/Perfil-2017.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2019.
- [3] Brito, G. F. et al. Biopolímeros, polímeros biodegradáveis e polímeros verdes. Revista eletrônica de materiais e Processos, 6 (2), 127-139, 2011.
- [4] Bioplastic, Europe (Org.). Bioplastic Market Data. 2019. Disponível em: <<https://www.european-bioplastics.org/market/>>. Acesso em: 23 mar. 2020.
- [5] Sonseca, A. et al. Multifunctional PLA Blends Containing Chitosan Mediated Silver Nanoparticles: Thermal, Mechanical, Antibacterial, and Degradation Properties. Nanomaterials, 10 (1), 22, 2020.
- [6] Bhasney, S. M. et al. Effect of microcrystalline cellulose [MCC] fibres on the morphological and crystalline behaviour of high density polyethylene [HDPE]/polylactic acid [PLA] blends. Composites Science and Technology, 187, 107941, 2020.

- [7] Sun, H. et al. Enhanced simultaneous nitrification and denitrification performance in a fixed-bed system packed with PHBV/PLA blends. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 146, 104810, 2020.
- [8] Auras, R., Harte, B., Selke, S., An Overview of Polylactides as Packaging Materials, *Macromolecular Bioscience*, 4 (9), 835-864, 2004.
- [9] Arrieta, M., Samper, M. D., Aldas, M., López, J., On the Use of PLA-PHB Blends for Sustainable Food Packaging Applications, *Materials*, 10 (9), 1008-1034, 2017.
- [10] Farah, S., Anderson, D. G., Langer, R., Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review, *Advanced Drug Delivery Reviews*, 107, 367-392, 2016.
- [11] Yang, W. et al. Poly (lactic acid)/lignin films with enhanced toughness and anti-oxidation performance for active food packaging. *International Journal of Biological Macromolecules*, 144, 102-110, 2020.
- [12] Risyon, N. P. et al. Characterization of polylactic acid/halloysite nanotubes bionanocomposite films for food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 23, 100450, 2020.
- [13] Sonseca, A. et al. Multifunctional PLA Blends Containing Chitosan Mediated Silver Nanoparticles: Thermal, Mechanical, Antibacterial, and Degradation Properties. *Nanomaterials*, 10 (1), 22, 2020.
- [14] Thakur, V. K., Kessler, M. R., Self-healing polymer nanocomposite materials: A review. *Polymer*, 69, 369-383, 2015.
- [15] Mano, E. B., Mendes, L. C.. *Introdução a polímeros*. 2. ed. rev. e ampl. - São Paulo: Edgard Blucher; 2004.
- [16] Machado, M. L. C., Pereira, N. C., Miranda, L. F. de, Terence, M. C, Pradella, J. G. C., Study of Mechanical and Thermal Properties of the Polymer Poly-3-Hydroxybutyrate (PHB) and PHB/Wood Flour Composites, *Polímeros*, 20 (1), 65-71, 2010.
- [17] Pistor, V., Chiesa, A., Zattera, A. J., Study of the Reprocessing of Low Density Polyethylene (LDPE) Recycled from Extruded Blown Films, *Polímeros*, 20 (4), 269-274, 2010.
- [18] Santos, E. F., Moresco, M., Rosa, S. M. L., Nachtigall, S. M. B., Extrusion of PP composites with short coir fibers: effect of temperature and coupling agents, *Polímeros*, 20 (3), 215-220, 2010.
- [19] Ferreira, C. T., Fonseca, J. B. da, Saron, C., Recycling of Wastes from Poly(ethylene tereftalate) (PET) and Polyamide (PA) by Reactive Extrusion for Preparation of Polymeric Blends, *Polímeros*, 21 (2), 118-122, 2011.
- [20] Canevarolo Junior, S. V., *Ciência dos Polímeros: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros*. 3. ed. São Paulo: Artliber Editora; 2010.
- [21] Domenek, S., Courgneau, C., Ducruet, V., Characteristics and Applications of Poly(lactide), *Biopolymers*, 183-223, 2011.
- [22] Garlotta, D., A literature review of poly(lactic acid). *Journal Of Polymers And The Environment*, 9 (2), 63-84, 2001.
- [23] Henton, D. E., Gruber, P., Lunt, J., Randall, J., Polylactic acid technology. In: MOHANTY, Amar K; MISRA, Manjusri; DRZ, Lawrence T (Ed.), *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites*. Boca Raton: Taloy And Francis; 2005.
- [24] Sena Neto, A. R., Araujo, M. A. M., Barboza, R. M. P., Marconcini, J. M., Comparative study of 12 pineapple leaf fiber varieties for use as mechanical reinforcement in polymer composites, *Industrial Crops And Products*, 64, 68-78, 2015.
- [25] Sena Neto, A. R., Claro, P. I. C., Souza, F. V. D., Mattoso, L. H. C., Marconcini, J. M., Poly(lactic acid) composites reinforced with leaf fibers from ornamental variety of hybrid pineapple (Potyra), *Polymer Composites*, 1-8, 2017.
- [26] Auras, R. A. et al. (Ed.). *Poly (lactic acid): synthesis, structures, properties, processing, and applications*. John Wiley & Sons, 2011.
- [27] Gendviliene, I. et al. Assessment of the morphology and dimensional accuracy of 3D printed PLA and PLA/HAp scaffolds. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 103616, 2020.
- [28] Corcione, C. E. et al. Highly loaded hydroxyapatite microsphere/PLA porous scaffolds obtained by fused deposition modelling. *Ceramics International*, 45 (2), 2803-2810, 2019.
- [29] Auras, R., Harte, B., Selke, S., An Overview of Polylactides as Packaging Materials, *Macromolecular Bioscience*, 4 (9), 835-864, 2004.
- [30] Domenek, S., Courgneau, C., Ducruet, V., Characteristics and Applications of Poly(lactide), *Biopolymers*, 183-223, 2011.
- [31] Arrieta, M., Samper, M. D., Aldas, M., López, J., On the Use of PLA-PHB Blends for Sustainable Food

- Packaging Applications, Materials, 10 (9), 1008-1034, 2017.
- [32] Farah, S., Anderson, D. G., Langer, R., Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review, *Advanced Drug Delivery Reviews*, 107, 367-392, 2016.
- [33] Krochta, J. M., Proteins as raw materials for films and coatings: definitions, current status and opportunities. In: GENNADIOS, A. *Protein-Based Films and Coatings*. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2002.
- [34] Leceta, I., Guerrero, P., La Caba, K. de, Functional properties of chitosan-based films, *Carbohydrate Polymers*, 93 (1), 339-346, 2013.
- [35] Srinivasa, P.C., Ramesh, M. N., Tharanathan, R. N., Effect of plasticizers and fatty acids on mechanical and permeability characteristics of chitosan films, *Food Hydrocolloids*, 21 (7), 1113-1122, 2007.
- [36] Brandelero, R. P. H., Grossmann, M. V. E., Yamashita, F., Effect of the method of production of the blends on mechanical and structural properties of biodegradable starch films produced by blown extrusion, *Carbohydrate Polymers*, 86 (3), 1344-1350, 2011.
- [37] Jeon, B., Kim, H. K., Cha, S. W., Lee, S. J., Han, M., Lee, K. S., Microcellular foam processing of biodegradable polymers — review, *International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing*, 14 (4), 679-690, 2013.
- [38] Farias, M. G.. *Elaboração e caracterização de filmes de amido e polpa de acerola por casting, extrusão termoplástica e termoprensagem* [tese de doutorado]. Seropédica: Curso de Ciência e Tecnologia de Alimentos; 2016.
- [39] Yang, W., Fortunati, E., Dominici, F., Puglia, D., Effect of processing conditions and lignin content on thermal, mechanical and degradative behavior of lignin nanoparticles/ polylactic (acid) bionanocomposites prepared by melt extrusion and solvent casting, *European Polymer Journal*, 71, 126-139, 2015.
- [40] Oksman, K., Aitomaki, Y., Mathew, A. P., Siqueira, G., Zhou, Q., Butylina, S., Tanpichai, S., Zhou, X., Hooshmand, S., Review of the recent developments in cellulose nanocomposite processing, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 83, 2-18, 2016.
- [41] Santos, F. A. dos, Tavares, M. I. B., Preparo e caracterização de filmes obtidos a partir de poli(ácido lático) e celulose microcristalina, *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 23 (2), 2013.
- [42] Okolieocha, C., Raps, D., Subramaniam, K., Altstadt, V., Microcellular to nanocellular polymer foams: Progress (2004–2015) and future directions – A review, *European Polymer Journal*, 73, 500-519, 2015.
- [43] Huntrakul, K. et al. Effects of pea protein on properties of cassava starch edible films produced by blown-film extrusion for oil packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 24, 100480, 2020.
- [44] Souza, V. G. L. et al. Chitosan Composites in Packaging Industry—Current Trends and Future Challenges. *Polymers*, 12 (2), 417, 2020.
- [45] Zengwen, C. et al. Structuring poly (lactic acid) film with excellent tensile toughness through extrusion blow molding. *Polymer*, 187, 122091, 2020.
- [46] Galdeano, M. C., Tonon, R. V., Menezes, N. D. S., Carvalho, C. W. P. D., Minguita, A. P. D. S., Mattos, M. D. C., Influence of milling and extrusion on the sorption properties of sorghum, *Brazilian Journal of Food Technology*, 21, 2018.
- [47] Lim, L.-T., Auras, R., Rubino, M., Processing technologies for poly(lactic acid), *Progress In Polymer Science*, 33 (8), 820-852, 2008.
- [48] Xie, F., Halley, P. J., Avérous, L., Rheology to understand and optimize processibility, structures and properties of starch polymeric materials, *Progress In Polymer Science*, 37 (4), 595-623, 2012.
- [49] Soroudi, A., Jakubowicz, I., Recycling of bioplastics, their blends and biocomposites: A review., *European Polymer Journal*, 49 (10), 2839-2858, 2013.
- [50] Yu, L., Dean, K., Li, L., Polymer blends and composites from renewable resources, *Progress In Polymer Science*, 31 (6), 576-602, 2006.
- [51] Assis, L. M. De, Zavareze, E. da R., Prentice-Hernandez, C., Souza-Soares, L. A. de, Revisão: características de nanopartículas e potenciais aplicações em alimentos, *Brazilian Journal of Food Technology*, 15 (2), 99-109, 2012.
- [52] Azeredo, H. M. C., Mattoso, L., Furtado, R., Rosa, M. Aplicação da nanotecnologia em embalagens de alimentos. In: Azeredo, H. M. C. (Org). *Fundamentos de Estabilidade de Alimentos*. Alice, 2012, 289- 326.
- [53] Canevarolo JR, S. V. *Ciência dos polímeros*. São Paulo: Artiliber; 2002.

- [54]Nielsen, L. E. Models for the permeability of filled polymer systems. *Journal of Macromolecular Science—Chemistry*, 1 (5), 929-942, 1967.
- [55]Canevarolo JR, S. V. Técnicas de caracterização de polímeros. São Paulo: Artliber; 2004.
- [56]Lucas, E. F., Soares, B. G., Monteiro, E. E. C. Caracterização de polímeros: determinação de peso molecular e análise térmica. Rio de Janeiro: E-papers, 2001.
- [57]Abdel-Rahman, M. A., Tashiro, Y., Sonomoto, K., Recent advances in lactic acid production by microbial fermentation processes, *Biotechnology Advances*, 31 (6), 877-902, 2013.
- [58]Xiang, S. et al. Evaluation of PLA content in PLA/PBAT blends using TGA. *Polymer Testing*, 81, 106211, 2020.
- [59]Sin, L. T. Tuen, B. S. *Poly(lactic acid): a practical guide for the processing, manufacturing, and applications of PLA*. 2nd ed. William Andrew; 2019.
- [60]Oguz, H., Dogan, C., Kara, D., Ozen, Z. T., Ovali, D., Nofar, M. Development of PLA-PBAT and PLA-PBSA bio-blends: Effects of processing type and PLA crystallinity on morphology and mechanical properties. In: *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing LLC, 2019.
- [61]Khan, W., Muthupandian, S., Farah, S., Kumar, N., Domb, A. J., *Biodegradable Polymers Derived From Amino Acids*, *Macromolecular Bioscience*, 11 (12), 1625-1636, 2011.
- [62]Bergström, J. S., Hayman, D., An Overview of Mechanical Properties and Material Modeling of Poly(lactide) (PLA) for Medical Applications, *Annals Of Biomedical Engineering*, 44 (2), 330-340, 2015.
- [63]Hamad, K., Kaseem, M., Yang, H. W., Deri, F., Ko, Y. G., Properties and medical applications of poly(lactic acid): A review, *Express Polymer Letters*, 9 (5), 435-455, 2015.
- [64]Park, K. I., Xanthos, M., A study on the degradation of poly(lactic acid) in the presence of phosphonium ionic liquids, *Polymer Degradation And Stability*, 94 (5), 834-844, 2009.
- [65]Pang, X., Zhuang, X., Tang, Z., Chen, X., Poly(lactic acid) (PLA): Research, development and industrialization, *Biotechnology Journal*, 5 (11), 1125-1136, 2010.
- [66]Lampe, K. J., Namba, R. M., Silverman, T. R., Bjugstad, K. B., Mahoney, M. J., Impact of lactic acid on cell proliferation and free radical-induced cell death in monolayer cultures of neural precursor cells, *Biotechnology And Bioengineering*, 103 (6), 1214-1223, 2009.
- [67]Maurus, P. B., Kaeding, C. C., Bioabsorbable implant material review, *Operative Techniques In Sports Medicine*, 12 (3), 158-160, 2004.
- [68]Nair, L. S., Laurencin, C. T., Biodegradable polymers as biomaterials, *Progress in Polymer Science*, 32 (8-9), 762-798, 2007.
- [69]Milovanovic, S., Hollermann, G., Errenst, C., Jasna, I., Supercritical CO₂ impregnation of PLA/PCL films with natural substances for bacterial growth control in food packaging, *Food Research International*, 107, 486-495, 2018.
- [70]Yang, S., Bai, S., Wang, Q., Sustainable packaging biocomposites from poly(lactic acid) and wheat straw: Enhanced physical performance by solid state shear milling process, *Composites Science And Technology*, 158, 34-42, 2018.
- [71]Hongriphan, N., Sanga, S., Antibacterial food packaging sheets prepared by coating chitosan on corona-treated extruded poly(lactic acid)/poly(butylene succinate) blends, *Journal of Plastic Film & Sheeting*, 34 (2), 160-178, 2017.
- [72]Meekum, U., Khiansanoi, A., PLA and two components silicon rubber blends aiming for frozen foods packaging applications, *Results In Physics*, 8, 79-88, mar. 2018.
- [73]Altan, A., Aytac, Z., Uyar, T., Carvacrol loaded electrospun fibrous films from zein and poly(lactic acid) for active food packaging, *Food Hydrocolloids*, 81, 48-59, 2018.
- [74]Swaroop, C., Shukla, M., Nano-magnesium oxide reinforced poly(lactic acid) biofilms for food packaging applications, *International Journal Of Biological Macromolecules*, 113, 729-736, 2018.
- [75]Liu, Y., Liang, X., Wang, S., Qin, W., Zhang, Q., Electrospun Antimicrobial Poly(lactic acid)/Tea Polyphenol Nanofibers for Food-Packaging Applications, *Polymers*, 10 (5), 561, 2018.
- [76]Arfat, Y. A., Ahmed, J., Ejaz, M., Mullah, M., Poly(lactide)/graphene oxide nanosheets/clove essential oil composite films for potential food packaging applications, *International Journal Of Biological Macromolecules*, 107, 194-203, 2018.

- [77] Woraprayote, W., Pumpuang, L., Toukhowong, A., Zendo, T., Sonomoto, K., Benjakul, S., Visessanguan, W., Antimicrobial biodegradable food packaging impregnated with Bacteriocin 7293 for control of pathogenic bacteria in pangasius fish fillets, *LWT - Journal of Food Science and Technology*, 89, 427-433, 2018.
- [78] Niu, X., Liu, Y., Song, Y., Han, J., Pan, H., Rosin modified cellulose nanofiber as a reinforcing and co-antimicrobial agents in polylactic acid /chitosan composite film for food packaging, *Carbohydrate Polymers*, 183, 102-109, 2018.