

USO DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL PARA O INCREMENTO DAS PROPRIEDADES DA MISTURA PLA/PBAT EM EMBALAGENS ALIMENTÍCIAS BIODEGRADÁVEIS

Iasmyn de Souza Lipkit

Gisele Cristina Vale Iulianelli - UFRJ IMA

Luciana da Cunha Costa - UERJ

RESUMO

Misturas de polímeros biodegradáveis, como o poli(ácido láctico) (PLA) e o poli(butileno adipato-co-tereftalato) (PBAT), além de combinarem propriedades funcionais, são alternativas ambientalmente amigáveis para embalagens alimentícias. No entanto, esse sistema apresenta limitações de desempenho. Nesse contexto, a incorporação de resíduos agroindustriais (RAI) tem sido estudada como estratégia para aprimorar suas propriedades, gerando materiais totalmente biodegradáveis e alinhados à economia circular. Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica recente sobre sistemas PLA/PBAT modificados com RAI, como borra de café, folhas de chá e casca de ovo. De modo geral, os estudos indicam que esses resíduos podem melhorar propriedades mecânicas, térmicas, de barreira e hidrofóbicas, além de atuarem como compatibilizantes naturais. Assim, a incorporação de RAI em sistemas PLA/PBAT mostra grande potencial para o desenvolvimento de embalagens sustentáveis, agregando valor a subprodutos agrícolas e contribuindo para soluções mais ecológicas na indústria alimentícia.

Palavras-chave: Embalagens Alimentícias. PLA. PBAT. Resíduos Agroindustriais.

1 INTRODUÇÃO

As embalagens alimentícias exercem uma função crucial na preservação, no transporte e na proteção dos alimentos durante toda a cadeia produtiva e de consumo (ZHANG *et al.*, 2022). No entanto, a predominância de materiais derivados de recursos fósseis e não biodegradáveis na produção dessas embalagens, como polietileno (PE) e polipropileno (PP), tem gerado preocupações ambientais crescentes. Apesar de amplamente utilizados pela indústria por sua eficiência e praticidade, esses plásticos apresentam elevada resistência à degradação, contribuindo diretamente para o acúmulo de resíduos sólidos e para a formação de microplásticos no ambiente (NCUBE *et al.*, 2020).

Esse uso intensivo de plásticos convencionais na indústria alimentícia evidencia não apenas a dependência desses materiais, mas também a necessidade urgente de alternativas ambientalmente mais responsáveis. Segundo Ncube e colaboradores (2020), cerca de 50% dos plásticos derivados de combustíveis fósseis são utilizados na indústria alimentícia, permanecendo no ambiente por séculos e fragmentando-se em partículas, como os microplásticos e nanoplásticos, que contaminam os ecossistemas terrestres e marinhos, além de já trazer reflexos na saúde humana (YIN *et al.*, 2021)

Nesse contexto, os polímeros biodegradáveis, como o poli (ácido láctico) (PLA) e o polibutileno adipato-co-tereftalato (PBAT), destacam-se como alternativas promissoras para a fabricação de embalagens mais sustentáveis, já que apresentam a capacidade de se decompor rapidamente em condições adequadas, diminuindo o acúmulo de resíduos persistentes no meio ambiente. A transição para o uso desses polímeros biodegradáveis atende à crescente demanda por sustentabilidade, além de impulsionar a criação de tecnologias que exploram as propriedades únicas desses materiais (ANDRADE *et al.*, 2022).

Entretanto, o uso destes polímeros de forma isolada, não atende às exigências do mercado quanto às propriedades requeridas. Neste sentido, a mistura polimérica PLA/PBAT apresenta-se como uma alternativa promissora na produção de embalagens alimentícias, tendo em vista que estes polímeros apresentam propriedades complementares. O PLA, derivado de fontes renováveis como o milho, apresenta alta rigidez, transparência e resistência térmica, sendo amplamente utilizado em embalagens rígidas (LI *et al.*, 2023; ANDRADE *et al.*, 2022). Já o PBAT, um copoliéster sintético proveniente de petroquímicos, é valorizado por sua flexibilidade e resistência mecânica, sendo frequentemente combinado ao PLA para formação de filmes biodegradáveis (CHAVES; FECHINE, 2016; ANDRADE *et al.*, 2022). No entanto, a mistura destes polímeros apresenta como desafio sua limitada miscibilidade, o que exige o uso de estratégias como adição de agentes compatibilizantes e/ou de cargas ou nanocargas, de modo a promover uma melhor interação entre as fases e aprimorar propriedades funcionais, resistência mecânica e estabilidade térmica, fortalecendo seu uso no setor de embalagens alimentícias (ANDRADE *et al.*, 2022).

Dentre as estratégias atualmente exploradas para aprimorar as propriedades da mistura PLA/PBAT, destaca-se a incorporação de cargas de reforço oriundas de resíduos agrícolas. Essa abordagem, além de contribuir para o aprimoramento do desempenho mecânico e funcional do sistema polimérico, também reforça os princípios de sustentabilidade e viabilidade econômica. Isso porque os resíduos utilizados são materiais naturais, biodegradáveis e de baixo impacto ambiental, que, ao invés de serem descartados no ambiente ou queimados, passam a ter um destino mais nobre e com maior valor agregado.

Entre as cargas estudadas, destacam-se na literatura o bagaço de cana-de-açúcar, as cascas

de milho e as cascas de ovos. O bagaço de cana-de-açúcar é uma fonte de nanocelulose capaz de melhorar significativamente a resistência mecânica dos filmes (ANDRADE *et al.*, 2022), enquanto as fibras de milho contribuem para o aumento da estabilidade térmica (LI *et al.*, 2023). Já as cascas de ovos, quando associadas à nanopartículas de prata, conferem propriedades antimicrobianas que favorecem a conservação de alimentos (TIIMOB *et al.*, 2017).

2 OBJETIVO

O presente trabalho buscou explorar na literatura recente, particularmente dos últimos 10 anos, a influência da incorporação de resíduos agroindustriais em mistura de PLA/PBAT para formar compósitos sustentáveis, contribuindo para o desenvolvimento de embalagens biodegradáveis que combinem eficiência técnica e responsabilidade ambiental. As propriedades desses compósitos foram investigadas a fim de analisar possíveis melhorias nas propriedades da mistura PLA/PBAT após a incorporação de resíduos agroindustriais e seus derivados e a viabilidade destes materiais como substitutos aos polímeros convencionais não biodegradáveis, na indústria de embalagens de alimentos, alinhando-se aos desafios globais de sustentabilidade e à transição para uma economia circular.

3 METODOLOGIA

Este trabalho consiste em uma revisão bibliográfica com abordagem qualitativa, fundamentada na análise de artigos científicos publicados nos últimos anos sobre o uso de resíduos agroindustriais em compósitos biodegradáveis à base de poli(ácido lático) (PLA) e poli(butileno adipato-co-tereftalato) (PBAT), voltados à aplicação em embalagens alimentícias. A seleção dos estudos foi realizada por meio de buscas em bases de dados científicas como ScienceDirect, Scopus, Web of Science e Google Scholar, utilizando as palavras-chave PLA/PBAT; biodegradable packaging; agro-industrial residues; circular economy. Foram priorizados artigos em inglês e português, com foco em pesquisas experimentais que abordassem propriedades técnicas, desempenho funcional, aspectos ambientais e inovações tecnológicas. A análise buscou identificar tendências, vantagens e limitações das diferentes estratégias, considerando sua relevância para a transição para materiais sustentáveis e a promoção da economia circular. preciso trabalhar melhor a metodologia.

4 RESULTADOS

A mistura de PLA e PBAT tem sido amplamente recomendada na literatura por combinar resistência mecânica e propriedades de barreira essenciais para a preservação de alimentos. No entanto, a imiscibilidade desses polímeros limita o desempenho do material. Para contornar esse problema, a incorporação de resíduos agroindustriais tem sido investigada como estratégia para melhorar as propriedades do compósito, aliando viabilidade econômica e sustentabilidade. Diversas abordagens vêm sendo estudadas para superar tanto a imiscibilidade entre PLA e PBAT quanto à heterogeneidade causada pela adição desses bioenchimentos. A seguir, são discutidos trabalhos recentes que exploram a aplicação de resíduos agroindustriais no aprimoramento de compósitos PLA/PBAT, com foco no desenvolvimento de embalagens biodegradáveis alinhadas aos princípios da economia circular.

O estudo realizado por Andrade *et al.* (2022), teve como objetivo investigar a produção de filmes de PLA/PBAT (70:30) reforçados com nanocristais de celulose (CNCs - *Cellulose Nanocrystals*) obtidos do bagaço de cana-de-açúcar. Os filmes foram processados por extrusão-sopro, técnica compatível com escalas industriais voltadas à produção de embalagens. Os CNCs foram incorporados em concentrações de 1% e 2% (m/m), sem o uso de agentes compatibilizantes, sendo a miscibilidade avaliada por meio de análises morfológicas, térmicas e mecânicas. A incorporação dos CNCs resultou em melhorias significativas nas propriedades mecânicas dos filmes. O sistema PLA/PBAT puro apresentou tensão na ruptura de 29,6 MPa, alongamento na ruptura de 370% e módulo de Young de 136 MPa. Com 1% de CNCs, esses valores aumentaram para 37,3 MPa, 460% e 220 MPa, respectivamente. A adição de 2% elevou esses valores para 44,7 MPa, 478% e 296 MPa, confirmando o potencial reforçador dos CNCs em matriz polimérica compatível com aplicações flexíveis. Resultados semelhantes já haviam sido observados por Rahmaniar e Susanto (2019), os quais obtiveram impacto positivo de fibras lignocelulósicas em propriedades mecânicas e de barreira em filmes à base de PLA puro.

A estabilidade térmica dos filmes também foi favorecida com a incorporação dos CNCs. A amostra sem reforço apresentou Tonset (Temperatura em que a degradação térmica começa - *Onset temperature*) de 341 °C, Tmax (Temperatura em que a taxa de degradação é máxima - *Maximum degradation temperature*) de 395 °C e Tfinal (Temperatura em que a degradação se encerra - *Final degradation temperature*) de 406 °C. Com 1% de CNCs, essas temperaturas foram elevadas para 347 °C, 399 °C e 410 °C, respectivamente. Já com 2% (m/m) de CNCs os valores foram ainda mais expressivos, alcançando 368 °C, 400 °C e 415 °C, nos valores de Tonset, Tmax e Tfinal, respectivamente. Esse comportamento pode ser atribuído à elevada cristalinidade dos CNCs e à sua morfologia que atua como barreira na degradação térmica.

As propriedades hidrofóbicas e de barreira também foram influenciadas pela presença dos CNCs. O ângulo de contato (AC) do filme com a água aumentou de 50,5° (filme puro) para 71° com 1% de CNCs, evidenciando uma redução importante na hidrofiliabilidade deste sistema, que reflete maior resistência à penetração de umidade. Para o sistema com 2% (m/m) de CNCs, a influência foi muito pouco significativa, aumentando o AC para 54°, o que foi atribuído à formação de aglomerados neste sistema, que comprometem a uniformidade da superfície. Ainda assim, os resultados do teste de absorção de água por imersão, realizado com base na variação de massa dos filmes antes e após exposição à água destilada, indicaram reduções de 55% e 70% na absorção para os filmes com 1% e 2% de CNCs, respectivamente, reforçando a eficácia dos nanocristais como barreira contra a umidade. Essa diferença nos resultados menos expressivos para o sistema com 2% (m/m) de CNCs foi atribuída à formação de aglomerados observados em imagens de microscopia (FE-SEM) das superfícies crio-fraturadas dos filmes.

Por fim, os autores destacaram que a presença dos CNCs, mesmo sem o uso de agentes compatibilizantes, contribuiu para a formação de um sistema com desempenho mecânico, térmico e de barreira compatível com aplicações em embalagens alimentícias biodegradáveis.

A pesquisa conduzida por Songtipya *et al.* (2019) teve como objetivo desenvolver compósitos de PLA/PBAT reforçados com resíduos lignocelulósicos, como borra de café (SCG - *Spent Coffee Grounds*) e de folhas de chá (TL - *Tea Leaves*) em matriz de PLA/PBAT 70:30, visando aplicações em embalagens alimentícias biodegradáveis. As cargas foram adicionadas nas proporções de 20%, 30% e 40% (m/m) e foi avaliado também a influência dos agentes de acoplamento TDI (tolueno diisocianato),

MDI

(difenilmetano diisocianato) e TESPT (bis[3-(trietoxisilil)propil] tetrasulfeto), adicionados em concentrações de 0 a 7% (m/m) de polímero. As misturas foram preparadas em moinho de dois rolos, seguidas de moldagem por compressão. Para os sistemas de PLA/PBAT (70:30) sem agente de acoplamento, observou-se que os compósitos contendo TL apresentaram resistência à tração superior aos com SCG em todas as proporções testadas. Os autores não forneceram valores específicos para TL sem agente de acoplamento, mas relataram desempenho superior ao SCG em todas as proporções, enquanto o com SCG o valor foi de 19,6 MPa. Essa diferença foi atribuída à composição química diferenciada das folhas de chá, especialmente à presença de compostos fenólicos, que favorecem interações com a matriz polimérica.

Os autores selecionaram a proporção de 30% como ideal para os testes com agentes de acoplamento, por apresentar melhor equilíbrio entre desempenho mecânico e processabilidade, evitando aglomeração excessiva e perda de integridade estrutural observadas em proporções mais elevadas. A adição de agentes de acoplamento promoveu melhorias mecânicas mais significativas, especialmente nos sistemas com TL. O uso de 3% (m/m) de TDI aumentou a resistência à tração para 37,4 MPa e o alongamento na ruptura para 10,5% para o sistema TL, e para os sistemas SGC esses valores foram de 25,2 MPa e 10,6%, respectivamente.

Embora os resultados indiquem melhorias com o uso das cargas e agentes de acoplamento, os autores não apresentaram os valores da blenda pura de PLA/PBAT (sem reforço), o que limita a comparação direta com o sistema base. Os sistemas compatibilizados com TESPT apresentaram desempenho inferior nos compósitos com SCG, com resistência à tração de 18,7 MPa e ganhos pouco expressivos na ductilidade. Não foram reportados dados para TL com esse agente. Já os sistemas contendo MDI mostraram desempenho semelhante aos com TDI nos compósitos com SCG, com pequenas variações entre os dois agentes.

Em todos os casos, o uso de compatibilizantes favoreceu tanto a resistência quanto a deformabilidade dos materiais, indicando melhora na interação entre a matriz polimérica e as cargas lignocelulósicas. Adicionalmente, a segurança dos materiais foi verificada por testes de migração global com os simulantes alimentares ácido acético 3% e etanol 10%. Todos os sistemas, inclusive aqueles contendo agentes de acoplamento, apresentaram valores de migração abaixo do limite regulamentar europeu de 10 mg/dm², confirmando a segurança dos compósitos para contato com alimentos.

Com o objetivo de desenvolver embalagens ativas para a conservação de alimentos, Tiimob e colaboradores (2017) investigaram a produção de filmes biodegradáveis à base de PLA/PBAT na proporção de 70:30, adicionando como resíduo agroindustrial, a casca de ovo em pó incorporada com nanopartículas de prata (ES-Ag - *Eggshell-silver nanoparticles*) sintetizada pelos autores, usando o nitrato de prata como precursor das nanopartículas de prata. As partículas de ES-Ag foram adicionadas à mistura PLA/PBAT nas concentrações de 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0% (m/m). Os nanocompósitos foram preparados por extrusão em extrusora monorosca, seguida de impressão 3D, e os sistemas desenvolvidos foram amplamente caracterizados quanto aos aspectos estruturais, térmicos, morfológicos, mecânicos e microbiológicos.

O ensaio de tração revelou que o filme puro de PLA/PBAT apresentou uma resistência à tração de 22,4 MPa e alongamento na ruptura de 110,2%. A adição de 2,0% de ES-Ag comprometeu significativamente o desempenho mecânico, reduzindo a resistência para 17,5 MPa e o alongamento para 93,3%, possivelmente devido ao excesso de carga particulada que interfere na integridade da matriz. Por outro lado, a formulação com 1,0% de ES-Ag alcançou o melhor equilíbrio, reduzindo

ligeiramente a resistência à tração para 20,7 MPa e aumentando o alongamento na ruptura para 129,4%, sendo considerada a mais adequada em termos de desempenho mecânico para aplicações em embalagens flexíveis biodegradáveis.

Os resultados morfológicos obtidos tanto por microscopia eletrônica de transmissão (TEM) como por MEV evidenciaram que a concentração de 1,0% de ES-Ag apresentou uma melhor dispersão na matriz com partículas predominantemente esféricas e tamanhos variando entre 10 e 30 nm, bem distribuídas ao longo da estrutura polimérica. Em contraste, à formulação com 2,0% de ES-Ag resultou em maior heterogeneidade, com aglomerações visíveis e partículas com variação de tamanho entre 50 e 100 nm, o que comprometeu a integridade estrutural do compósito. Esses achados corroboram o melhor desempenho mecânico obtido para os filmes contendo 1,0% de ES-Ag.

Com relação à estabilidade térmica, os filmes com 1,5% e 2,0% (m/m) de ES-Ag apresentaram um melhor resultado comparados ao sistema sem carga. O Tonset do filme puro foi de 306,5 °C, enquanto os filmes com 1,5% e 2,0% de ES-Ag alcançaram 313,1 °C e 314,2 °C, respectivamente. Já os filmes com 0,5% e 1,0% de ES-Ag não apresentaram variações significativas no Tonset, indicando que apenas os teores mais elevados da carga foram eficazes na melhoria da estabilidade térmica. Esse aumento foi atribuído à ação protetora das nanopartículas de prata, que atuam como barreiras à difusão térmica e retardam a degradação da matriz polimérica.

Os ensaios antimicrobianos, realizados pelo método de disco-difusão em ágar, avaliaram a atividade dos filmes contra as bactérias *Salmonella enteritidis* e *Listeria monocytogenes*. Os filmes contendo 1,0% de ES-Ag apresentaram os melhores resultados, com halos de 13,5 mm para *Listeria monocytogenes* e 11,5 mm para *Salmonella Enteritidis*. Enquanto os filmes com 2,0% de ES-Ag apresentaram eficácia inferior, com halos de 11,0 mm e 9,5 mm, respectivamente. Esse desempenho foi atribuído à melhor dispersão das nanopartículas de prata na matriz no sistema contendo 1,0% de ES-Ag, o que favoreceu o aumento da área de contato com o meio bacteriano. Em suma, os autores concluíram que a formulação com 1,0% (m/m) de ES-Ag apresentou o melhor equilíbrio entre propriedades térmicas, mecânicas e antimicrobianas e que a incorporação de casca de ovo derivada de resíduos agroindustriais funcionalizada com nanopartículas de prata mostrou-se uma estratégia promissora para o desenvolvimento de embalagens ativas com potencial para aplicação alimentar.

Shankar e Rhim (2018) investigaram a incorporação de extrato de semente de toranja (GSE - *Grapefruit Seed Extract*) em filmes de PLA/PBAT, avaliando os efeitos sobre as propriedades mecânicas, térmicas, óticas e antimicrobianas. Os filmes de PLA/PBAT na proporção 98:2 e concentrações de GSE variando entre 3%, 5% e 7% (m/m) foram obtidos por moldagem por solução (*casting*). O GSE utilizado foi um extrato comercial contendo 50% de glicerol, 0,48% de naringina e outros compostos fenólicos, como flavonoides e ácidos orgânicos, o que permitiu que atuasse como plastificante, sem exercer atividade antimicrobiana direta, enquanto os compostos fenólicos do extrato GSE, como flavonoides e ácidos orgânicos, apresentam como função bioativa, a ação antimicrobia. As imagens de MEV revelaram que o filme PLA/PBAT puro apresentava superfície rugosa e distribuição heterogênea de PBAT, típica de sistemas imiscíveis. Com a adição de GSE, observou-se uma melhora progressiva na compatibilidade da blenda, de modo que o sistema com apenas 3% mostrou uma leve redução na rugosidade superficial, enquanto as formulações com 5% e 7% apresentaram morfologia mais homogênea e contínua, atribuída à ação plastificante do glicerol.

No ensaio mecânico sob tração, a incorporação do GSE promoveu aumento significativo na resistência e na ductilidade dos filmes. A formulação com 3% de GSE elevou a resistência à tração de

27,1 MPa (controle) para 32,2 MPa, com alongamento na ruptura passando de 6,4% para 17,3%. Com 5%, esses valores foram de 34,4 MPa e 24,2%, enquanto com 7% foram observados valores de 31,1 MPa e 29,6%, respectivamente. Paralelamente, o módulo elástico caiu de 1690 MPa (filme puro) para 1570 MPa, 1540 MPa e 1530 MPa com 3%, 5% e 7% de GSE, respectivamente, reforçando o efeito plastificante do extrato.

As propriedades óticas e de barreira também foram influenciadas. A transparência dos filmes caiu de 77,3% (controle) para 33,6%, 25,7% e 28,8% para os filmes com 3%, 5% e 7% de GSE, respectivamente. Por outro lado, a barreira aos raios UV foi significativamente aprimorada, com redução na transmitância a 280 nm de 2,4% (controle) para aproximadamente 1,2% nas três formulações, efeito atribuído aos compostos fenólicos do GSE, como pode ser observado na Figura 5.

A atividade antimicrobiana foi avaliada contra *Listeria monocytogenes* e *Escherichia coli* por meio do método de contagem de células viáveis em meio líquido, com monitoramento da cinética de crescimento bacteriano por 12 horas. Os filmes com GSE apresentaram eficácia crescente com o aumento da concentração do extrato, sendo mais eficazes contra *L. monocytogenes* (Gram-positiva). As formulações com 3%, 5% e 7% eliminaram totalmente a bactéria após 9, 6 e 3 horas, respectivamente. Para *E. coli*, observou-se apenas efeito bacteriostático parcial. Embora as formulações com GSE tenham reduzido o ritmo de crescimento da bactéria, não impediram sua multiplicação, mesmo com concentrações mais elevadas (7%) de GSE. Esse comportamento foi atribuído à maior resistência das bactérias Gram-negativas à ação dos compostos fenólicos.

Em suma, os resultados obtidos neste estudo demonstram que o extrato da semente de toranja atua de forma multifuncional no sistema PLA/PBAT, promovendo melhorias estruturais, mecânicas, óticas, de barreira e antimicrobianas. A formulação com 7% de GSE se destacou pela ação antimicrobiana e maior flexibilidade, enquanto a de 5% apresentou o melhor desempenho mecânico e ótico. Já o sistema com 3% mostrou melhorias moderadas, mas consistentes, em todas as propriedades. A escolha da concentração pode ser ajustada conforme a prioridade funcional da aplicação, reforçando o potencial do sistema como embalagem ativa biodegradável.

Além da incorporação de resíduos agroindustriais diretamente na matriz polimérica PLA/PBAT, outra abordagem estudada para melhorar o desempenho funcional destes sistemas biodegradáveis consiste na aplicação de revestimentos ativos na superfície destes sistemas. Essa estratégia permite a adição de propriedades antimicrobianas e de barreira sem alterar a composição interna dos filmes, mantendo sua processabilidade e biodegradabilidade. Um exemplo desta abordagem é o estudo conduzido por Panariello e colaboradores (2022), que investigou o uso de nanofibrilas de quitina, derivada de fungos e exoesqueletos de camarões, na superfície de alguns filmes poliméricos, incluindo o sistema PLA/PBAT 80:20, visando desenvolver revestimentos funcionais com propriedades antimicrobianas e de barreira. Para tal, os autores aplicaram por *casting* suspensões de nanofibrilas de quitina (CN - *Chitin Nanofibrils*) sobre os filmes de PLA/PBAT, utilizando 2 mL de solução aquosa contendo 1,5% de CN. Em seguida, os filmes foram secos a 40 °C por 24 horas para promover a formação do revestimento. O ácido láctico oligomérico (OLA - *Oligomeric Lactic Acid*) foi adicionado como agente compatibilizante para favorecer a adesão e dispersão das nanofibrilas na superfície dos filmes PLA/PBAT.

Nos testes de barreira ao oxigênio (OTR - *Oxygen Transmission Rate*), os revestimentos contendo CN + OLA promoveram uma redução de aproximadamente 20% na permeabilidade ao oxigênio do sistema PLA/PBAT, evidenciando melhora na propriedade de barreira gasosa. Por outro

lado, a permeabilidade ao vapor de água (WVTR - *Water Vapor Transmission Rate*) não foi significativamente afetada. A presença do OLA também contribuiu para o aumento da componente polar da energia superficial, favorecendo a distribuição homogênea das nanofibrilas e potencializando o desempenho antimicrobiano dos revestimentos.

A atividade antimicrobiana foi avaliada por meio do método de difusão em ágar, utilizando *Staphylococcus aureus* e *Escherichia coli* como microrganismos-alvo. Os filmes revestidos com CN + OLA apresentaram halos de inibição médios de 1,4 mm para *S. aureus* e 1,1 mm para *E. coli*, com desvio padrão de aproximadamente 0,1 mm em cada caso, enquanto o filme PLA/PBAT sem revestimento não exibiu qualquer atividade antimicrobiana. Foi observado ainda que os sistemas mantiveram sua biodegradabilidade, com o PLA/PBAT revestido, degradando mais de 90% em compostagem industrial a 58 °C em 6 meses. Esses resultados confirmam a viabilidade técnica e ambiental da aplicação de revestimentos funcionais à base de nanofibrilas de quitina oriundas de resíduos agroindustriais em embalagens biodegradáveis.

No estudo conduzido por *Li et al.* (2023), foi incorporado na matriz polimérica PLA/PBAT (80:20), o resíduo lignocelulósico de milho (*corn stover*), um subproduto amplamente disponível da agroindústria. O resíduo foi adicionado nas proporções de 5%, 10% e 20% (m/m) em relação à massa da matriz, sem o uso de compatibilizantes sintéticos. A carga foi utilizada tanto in natura (LCS - *Lignocellulosic Corn Stover*) quanto após tratamento com peróxido de hidrogênio alcalino (MLCS - *Modified Lignocellulosic Corn Stover*). Os filmes foram obtidos por meio da técnica de moldagem por compressão a quente, sob pressão de 10 MPa a 180 °C por 6 minutos, seguida de resfriamento sob a mesma pressão em temperatura ambiente. O objetivo do tratamento foi reduzir a coloração escura do resíduo, eliminar o odor característico do material bruto remover compostos fenólicos e reduzir o teor de lignina e hemicelulose, promovendo uma fibra de coloração mais clara e com maior exposição de grupos hidroxilas, facilitando a interação com a matriz polimérica.

Os filmes foram caracterizados comparativamente em relação à morfologia, propriedades mecânicas, térmicas, ópticas, hidrofobicidade e biodegradabilidade. Os resultados mostraram que a incorporação do resíduo tratado (MLCS) resultou em melhorias significativas nas propriedades mecânicas dos filmes PLA/PBAT em relação ao resíduo in natura (LCS). A resistência à tração na ruptura da matriz sem o reforço foi de 26,7 MPa, aumentando para 30,4 MPa com 10% de LCS e para 32,6 com 10% de MLCS. O módulo de Young também foi aumentado, passando de 475 MPa no filme puro para para 495 MPa com LCS e 512 MPa com MLCS, refletindo maior rigidez estrutural nos dois casos, com superioridade do material tratado. O alongamento na ruptura, por sua vez, foi reduzido de 61,4% (controle) para 48,3% (LCS) e 50,5% (MLCS), permanecendo ainda compatível com aplicações flexíveis.

Em termos de propriedades térmicas, os compósitos com MLCS apresentaram valores de Tonset superior (305,2°C) ao dos filmes com LCS (301,3°C) e também ao da matriz PLA/PBAT pura (297,3 °C), indicando que o tratamento alcalino contribuiu para aumentar a estabilidade térmica do sistema. Além disso, a modificação do resíduo conferiu melhor aparência visual aos filmes, com redução da coloração amarronzada e do odor característico das fibras cruas, aspectos essenciais para sua aceitação em embalagens alimentícias. No que diz respeito à hidrofobicidade, o ângulo de contato com água aumentou de 63,7° (PLA/PBAT puro) para 66,2° com LCS e 71,5° com MLCS nos filmes com 10% de carga, confirmando que o tratamento promoveu menor afinidade com a umidade. Esses resultados demonstram o efeito positivo da modificação química do resíduo, não apenas nas propriedades

funcionais, mas também nas características estéticas dos filmes.

Em conclusão, o estudo demonstrou que a incorporação de resíduo lignocelulósico de milho tratado (MLCS) em filmes de PLA/PBAT é uma estratégia eficaz para aliar desempenho técnico, viabilidade econômica e sustentabilidade. As formulações com 10% de MLCS se destacaram por apresentar o melhor equilíbrio entre resistência mecânica, estabilidade térmica, hidrofobicidade e aparência visual, atendendo aos critérios da norma chinesa GB/T 10004-2008 para filmes plásticos em contato com alimentos. A valorização desse subproduto agrícola por meio de uma rota de modificação simples e ambientalmente amigável reforça o potencial da abordagem para o desenvolvimento de embalagens biodegradáveis com alta aceitação comercial.

Resíduos agroindustriais e seus derivados têm sido investigados como alternativas sustentáveis, também para aprimorar a compatibilização de blendas PLA/PBAT. Nesta perspectiva, Silva e Soares (2021) investigaram o uso de um pré-polímero epoxidado derivado do cardanol (ECP - *Epoxidized Cardanol-based Prepolymer*), um composto extraído do líquido da casca da castanha de caju, que é descartada durante o processamento industrial para obtenção da amêndoa comestível, como agente compatibilizante *bio-based*. O desempenho do ECP foi comparado ao de um compatibilizante comercial derivado de petróleo, o copolímero estireno-acrílico epoxidado Joncryl® ADR4300 (ADR). As blendas foram preparadas na proporção PLA/PBAT de 80:20 e compatibilizadas com 1%, 3% e 5% (m/m) de ECP ou ADR, com adição de 1% de trifenilfosfina como catalisador. A caracterização abrangeu propriedades mecânicas, térmicas, reológicas, morfológicas e dinâmico-mecânicas.

A análise mecânica sob tração mostrou que a incorporação de ECP resultou em melhorias significativas na tensão ao escoamento, alongamento na ruptura e no módulo de Young. Comparado à blenda de PLA/PBAT 80:20 sem compatibilizante, que apresentou módulo de Young de 1,7 GPa, o sistema com 3% (m/m) de ECP alcançou um valor de 1,8 GPa, indicando ganho na rigidez estrutural. O sistema contendo 3% (m/m) de ECP apresentou o melhor desempenho, com 46 MPa de tensão ao escoamento e de 190% no alongamento na ruptura.

A morfologia das amostras foi avaliada por MEV, que revelou a formação de domínios de PBAT menores e bem aderidos, caracterizando a morfologia mar-ilha refinada, especialmente nas amostras com 1% e 3% do ECP, indicando boa compatibilidade interfacial.

As análises dinâmico-mecânicas revelaram dois picos de transição vítrea (T_g), em 59,8 °C e -27,5 °C relativos aos polímeros PLA e PBAT, respectivamente, indicando a presença de fases distintas. A presença de ECP e ADR não tiveram influência significativa nesses valores. A cristalização a frio (T_{cc}) apresentou elevação progressiva com a adição dos compatibilizantes, sugerindo redução da cristalinidade do PLA, passando de 16,0% na blenda pura, para 15,0% com ADR, e 14% com ECP, correspondendo a reduções relativas de aproximadamente de 8,75% a 15%. A análise térmica (DSC) indicou que tanto ADR quanto ECP promoveram leve redução na cristalinidade da fase PLA, reforçando a eficácia da compatibilização reativa em restringir a ordenação segmentar.

De forma geral, os resultados demonstraram que o pré-polímero epoxidado de cardanol é um compatibilizante eficaz, capaz de melhorar as propriedades mecânicas, morfológicas e térmicas das blendas PLA/PBAT. Além de apresentar desempenho comparável ao compatibilizante comercial ADR, o ECP se destaca por sua origem renovável e potencial de valorização de resíduos agroindustriais, representando uma alternativa promissora para formulações de embalagens biodegradáveis e ambientalmente responsáveis.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A crescente demanda por soluções ambientalmente amigáveis na indústria de embalagens alimentícias têm impulsionado o desenvolvimento de compósitos biodegradáveis. A mistura polimérica PLA/PBAT incorporada com resíduos agroindustriais e seus derivados tem se mostrado uma alternativa promissora, ao reunir melhorias nas propriedades dos materiais e alinhamento com os princípios da sustentabilidade e da economia circular.

Este estudo evidenciou que sistemas PLA/PBAT reforçados com bioenrichments provenientes de resíduos agroindustriais não apenas apresentam ganhos em propriedades mecânicas, térmicas e de barreira, como também promovem a valorização de subprodutos agrícolas. A incorporação de nanocristais de celulose, extrato de semente de toranja e nanofibrilas de quitina demonstrou potencial para conferir aos compósitos melhorias adicionais, como resistência mecânica, estabilidade térmica, funcionalidade e atividade antimicrobiana. Agentes compatibilizantes derivados desses resíduos, como o cardanol epoxidado, também têm contribuído para uma melhor interação interfacial entre as fases poliméricas, favorecendo a morfologia e o desempenho global destes materiais.

Apesar dos avanços, ainda persistem desafios, como limitações na biodegradação em condições naturais, custos de produção elevados e a ausência de sistemas adequados de descarte. No entanto, os resultados disponíveis na literatura reforçam o potencial desses compósitos como alternativa viável aos polímeros convencionais, atendendo às crescentes exigências ambientais e regulatórias.

Dessa forma, os compósitos biodegradáveis à base de PLA/PBAT reforçados com resíduos agroindustriais representam uma estratégia promissora, que integra sustentabilidade, inovação, funcionalidade e valorização de subprodutos. Pesquisas futuras devem se concentrar na otimização dos processos de compatibilização, na padronização das rotas de processamento e na avaliação da estabilidade dos materiais ao longo do tempo. Além disso, estudos de viabilidade em escala industrial, segurança para contato com alimentos e análise de ciclo de vida são essenciais para consolidar esses sistemas como alternativas reais no setor de embalagens. O objetivo é garantir o equilíbrio entre desempenho técnico, viabilidade econômica, impacto ambiental positivo e aceitação pelo mercado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, M. S.; ISHIKAWA, O. H.; COSTA, R. S.; SEIXAS, M. V. S.; RODRIGUES, R. C. L. B.; MOURA, E. A. B. Development of sustainable food packaging material based on biodegradable polymer reinforced with cellulose nanocrystals. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 31, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100807>. Acesso em: 11 set. 2024.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 147, n. 147, p. 3, 3 ago. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 30 maio 2025.

GUILARD, V.; GAUCEL, S.; FORNACIARI, C.; ANGELLIER-COUSSY, H.; BUCHE, P.; GONTARD, N.

The next generation of sustainable food packaging to preserve our environment in a circular economy context. **Frontiers in Nutrition**, v. 5, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fnut.2018.00121>. Acesso em: 22 nov. 2024.

INFURNA, G.; BOTTA, L.; INGARGIOLA, I.; MANISCALCO, M.; CAPUTO, G.; DINTCHEVA, N. T. Biochar from digestate pyrolysis as a filler for biopolymer blends: Effect of blend composition. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 32, p. 1921–1936, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10924-023-03108-1>. Acesso em: 12 set. 2024.

LI, R.; ZHU, X.; PENG, F.; LU, F. Biodegradable, colorless, and odorless PLA/PBAT bioplastics incorporated with corn stover. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 11, p. 8870–8883, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c00691>. Acesso em: 09 out. 2024.

NCUBE, L. K.; UDE, A. U.; OGUNMUYIWA, E. N.; ZULKIFLI, R.; BEAS, I. N. Environmental impact of food packaging materials: a review of contemporary development from conventional plastics to polylactic acid based materials. **Materials**, v. 13, n. 21, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma13214994>. Acesso em: 06 dez. 2024.

SHANKAR, S.; RHIM, J.-W. Preparation of antibacterial poly(lactide)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) composite films incorporated with grapefruit seed extract. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 120, p. 846–852, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.09.004>. Acesso em: 21 nov. 2024.

SILVA, J. M. F.; SOARES, B. G. Epoxidized cardanol-based prepolymer as promising biobased compatibilizing agent for PLA/PBAT blends. **Polymer Testing**, v. 93, p. 106973, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106889>. Acesso em: 20 nov. 2024.

TIIMOB, B. J.; MWINYELLE, G.; ABDELA, W.; SAMUEL, T.; JEELANI, S.; RANGARI, V. K. Nanoengineered eggshell–silver tailored copolyester polymer blend film with antimicrobial properties. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 65, n. 7, p. 1967–1976, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b00133>. Acesso em: 15 out. 2024.