



4º Congresso Internacional sobre Materiais Plásticos Compostáveis e de Fonte Renovável 11 e 12 de junho de 2025

PROPRIEDADES DE BLENDA DE PBAT E AMIDO TERMOPLÁSTICO UTILIZANDO FARINHA DE MESOCARPO DE BABAÇU COMO FONTE ALTERNATIVA DE AMIDO – ID.BIO.20

Arthur Vila Dewes Machado¹, Jordão Gheller Junior², Bruno Felipe Bergel³, Ruth Marlene Campomanes Santana⁴

¹ Instituto SENAI de Inovação, Engenharia de Polímeros, São Leopoldo, Brasil, arthur.machado@senairs.org.br

² Instituto SENAI de Inovação, Engenharia de Polímeros, São Leopoldo, Brasil, jordao.gheller@senairs.org.br

³ Instituto SENAI de Inovação, Engenharia de Polímeros, São Leopoldo, Brasil, bruno.bergel@senairs.org.br

⁴ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, ruth.santana@ufrgs.br

Resumo

O desenvolvimento de materiais poliméricos biodegradáveis tem ganhado destaque como estratégia para a redução do impacto ambiental causado por resíduos plásticos. O polibutileno(adipato-co-tereftalato) (PBAT) é um copoliéster que combina a resistência e boa processabilidade de polímeros convencionais com sua estrutura hidrolisável que o torna biodegradável. O custo elevado do PBAT pode ser compensado na combinação deste com biopolímeros de menor custo, como é o caso do amido que ainda pode contribuir com sua alta biodegradabilidade. Neste trabalho, foram produzidas blendas compostas por 70% de PBAT e 30% de amido termoplástico (TPS) plastificado com glicerol na proporção amido/glicerol de 70/30. O TPS foi preparado a partir de diferentes fontes de amido: amido de milho modificado (AMM) e farinha de mesocarpo de babaçu (FMB): 100% AMM, 100% FMB, e mistura dos dois amidos nas proporções 1:1 (FMB:AMM). As formulações foram processadas em reômetro de torque a 150°C e 60 rpm por 5 minutos, promovendo uma mistura eficiente dos componentes, e posteriormente moldadas por injeção para avaliação de suas propriedades. O objetivo do trabalho foi investigar a influência da fonte de amido nas propriedades mecânicas e térmicas das blendas, visando possíveis aplicações em embalagens biodegradáveis. As amostras foram caracterizadas por ensaios de tração, flexão e impacto, além de análises térmicas por calorimetria diferencial exploratória (DSC) e termogravimetria (TGA). Os resultados demonstraram que o TPS à base de amido de milho modificado apresentou melhor compatibilidade com o PBAT, gerando materiais mais flexíveis e com melhor desempenho na resistência ao impacto. Em contrapartida, a FMB atuou de modo a enrijecer o biopolímero e aumentou levemente sua resistência mecânica, porém com significativa redução no alongamento e na tenacidade das amostras. As análises térmicas evidenciaram variações nas temperaturas de transição e degradação térmica, atribuídas às diferenças na composição e estrutura dos TPS utilizados. Os resultados destacam o potencial da FMB como alternativa regional e renovável ao amido convencional, promovendo o aproveitamento de resíduos agroindustriais na fabricação de materiais sustentáveis.

Palavras-chave: biopolímeros, blendas, amido

1. INTRODUÇÃO

A necessidade crescente por alternativas sustentáveis, aliada à urgência de mitigar os impactos ambientais provocados pelo descarte inadequado de plásticos convencionais, tem impulsionado a pesquisa e o desenvolvimento de polímeros biodegradáveis e compósitos com materiais provenientes de recursos renováveis [1–3]. Nesse cenário, destaca-se o polibutileno(adipato-co-tereftalato) (PBAT), um copolímero alifático-aromático que combina boa processabilidade com a capacidade de se degradar em condições ambientais adequadas, o que o torna atrativo para aplicações como filmes agrícolas e embalagens descartáveis [1].

Para otimizar as propriedades desse polímero, a incorporação de cargas vegetais, como fibras naturais e amido, tem sido amplamente investigada. Essas cargas contribuem para o aumento da rigidez, melhoram a estabilidade térmica e ainda permitem a redução de custos [2,4,5]. O amido, em especial, é amplamente disponível, apresenta alta biodegradabilidade e possui baixo custo, sendo, portanto, um candidato promissor na formulação de blendas e compósitos com PBAT [6,7].

Quando o amido é processado sob calor e na presença de plastificantes, como glicerol ou sorbitol, ele forma o amido termoplástico (TPS), um material com propriedades moldáveis e alto potencial de biodegradação, adequado para aplicações sustentáveis [8–10]. A blenda de PBAT com TPS, assim, se propõe uma alternativa viável para confecção de plásticos de uso único em substituição aos plásticos convencionais.

Dentro do mesmo contexto, a farinha de mesocarpo de babaçu (FMB) aparece como uma fonte renovável promissora. Derivada do resíduo do coco babaçu, fruto da palmeira *Orbignya phalerata*, a FMB é obtida a partir da porção intermediária do fruto, situada entre o epicarpo e o endocarpo. Durante o beneficiamento do coco, o principal produto é o óleo extraído das amêndoas, enquanto a FMB surge como subproduto [11–13].

Estudos demonstram que a FMB pode ser usada diretamente para formar filmes devido à sua elevada concentração de amido. Além disso, o amido presente na FMB pode ser isolado por diferentes métodos, o que permite a produção de filmes com propriedades diferenciadas de acordo com cada método de extração, como maior resistência à permeação de gases ou maior hidrofobicidade, sem comprometer a atividade antioxidante conferida pelos compostos fenólicos presentes na farinha [14–17].

Enquanto as fibras do epicarpo e do endocarpo do babaçu têm aplicação como reforço em compósitos poliméricos, a FMB atua como carga de enchimento rígida, contribuindo para a biodegradabilidade dos materiais [18–23]. Rica em amido e largamente disponível nas regiões Norte e Nordeste do Brasil, a FMB se configura como um recurso renovável regional de alto potencial industrial [24].

A composição da FMB é majoritariamente amido, representando entre 50 e 80% do seu conteúdo, além de incluir quantidades variadas de proteínas, lipídeos, celulose, hemicelulose e lignina [24–27]. A presença de minerais, como ferro, cálcio e magnésio, e de compostos fenólicos bioativos, como catequina, epicatequina e epigalocatequina galato, também torna a FMB atrativa para uso em embalagens com funcionalidade bioativa [11,12,17,24,28].

No entanto, a adição da FMB ao PBAT pode provocar uma redução na compatibilidade entre a matriz polimérica e a carga. Uma abordagem para minimizar esse efeito é o uso de plastificantes, que contribuem para aumentar a ductilidade e tenacidade do compósito final, além de facilitar a dispersão da carga e reduzir a rigidez [29–31]. O plastificante possui também a capacidade de expandir e romper os grânulos de amido, levando à desestruturação das regiões cristalinas e à solubilização parcial das cadeias

poliméricas, processo conhecido como gelatinização que dá a formação do amido termoplástico [32,33].

A mistura de diferentes fontes de amido também se torna uma estratégia interessante, uma vez que amidos de fontes diferentes possuem morfologias e propriedades distintas o que pode diferenciar o amido termoplástico de acordo com sua fonte e, conseqüentemente, as propriedades em blendas biopoliméricas [34–36].

2. OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o efeito da fonte de amido em blendas biodegradáveis de PBAT/TPS, utilizando um amido modificado de milho (AMM) e farinha de mesocarpo de babaçu (FMB) buscando compreender a influência dessas fontes nas propriedades mecânicas, térmicas e morfológicas. Tal abordagem contribui para o desenvolvimento de produtos com menor impacto ambiental e ampliação do potencial de aplicação de biopolímeros em embalagens de uso único.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais

Para este estudo foi utilizado o polibutileno(adipato-co-tereftalato) (PBAT) de nome comercial ecoflex® F Blend C1200, do fabricante BASF SE. De acordo com o fabricante, o PBAT tem temperatura de fusão entre 110 e 120°C e índice de fluidez entre 2,7 e 4,9 g/10 min (190°C e 2,16 kg). A farinha de mesocarpo de babaçu (FMB) utilizada foi obtida a partir da moagem industrial do mesocarpo de babaçu realizado pela empresa Florestas Brasileiras S.A. (Itapecuru-Mirim, Maranhão, Brasil). O amido comercial utilizado foi um amido de milho modificado (AMM) de nome comercial Stamul PG, fornecido pela Horizonte Amidos. Glicerol fornecido pela Anidrol com alto grau de pureza foi empregado como plastificante para produção de amido termoplástico.

3.2. Formulação e processamento dos materiais

Para a mistura dos materiais foi utilizado um reômetro de torque Thermo Scientific Haake Rheomix OS com rotores do tipo *roller*. Antes de serem incorporados na câmara, os materiais fonte de amido (FMB e AMM) foram misturados manualmente com o glicerol até terem seus grânulos umectados pelo plastificante. Inicialmente o PBAT foi colocado na câmara de mistura e, após estabilização do torque, cerca de 1 minuto, foram introduzidos o restante dos materiais e misturados até atingir a marca de 5 minutos desde a introdução do PBAT. A mistura dos materiais ocorreu na temperatura de 150°C e com velocidade de 60 rpm para todas as formulações. A nomenclatura e respectiva composição das amostras está disposta na Tabela 1.

Todas as formulações foram injetadas em um equipamento Thermo Scientific HAAKE™ Mini-Jet II, utilizando temperatura do cilindro de 150°C, temperatura do molde de 60°C e pressão de injeção de 400 bar por 10 segundos, seguido de pressão de recalque de 250 bar por mais 10 segundos. Após as injeções, os corpos de prova injetados foram armazenados em dessecadores com sílica-gel por 48 horas antes das caracterizações mecânicas.

Amostra	PBAT (%)	TPS (%)	Razão FMB:AMM
PBAT_FMB	70	30	1:0
PBAT_FMB_AMM	70	30	1:1
PBAT_AMM	70	30	0:1

Tabela 1. Composição das formulações e suas nomenclaturas.

3.3. Caracterizações

As análises termogravimétricas foram conduzidas em uma balança termogravimétrica modelo Q50 (TA Instruments), sob atmosfera de nitrogênio com fluxo de 90 mL/min. Amostras com massa aproximada de 10 mg foram aquecidas de 25°C a 700°C, com uma taxa de aquecimento de 20°C/min. A análise das curvas termogravimétricas foi realizada por meio do software TA Universal Analysis.

A análise de calorimetria diferencial exploratória (DSC) foi realizada em um equipamento modelo Q20 (TA Instruments), sob atmosfera de nitrogênio com fluxo de 50 mL/min. Amostras com massa de aproximadamente 10 mg foram submetidas a um ciclo térmico composto por um aquecimento inicial de 25°C a 200°C, com taxa de 10°C/min, seguido de um resfriamento até -50°C na mesma taxa e um segundo aquecimento até 200°C sob igual taxa de aquecimento.

O cálculo da cristalinidade relativa (X_c) foi realizado com base na entalpia de fusão (ΔH_f) obtida no segundo aquecimento, utilizando a seguinte equação (1).

$$X_c(\%) = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^{PBAT}} \times \frac{1}{\phi_{PBAT}} \times 100 \quad (1)$$

Onde ΔH_f é a entalpia de fusão da amostra (J/g), ΔH_f^{PBAT} é a entalpia de fusão teórica do PBAT 100% cristalino (114 J/g), e ϕ_{PBAT} é a fração mássica de PBAT na formulação (0,70 para as blendas e 1,00 para o PBAT puro). Este cálculo permite estimar o grau de cristalinidade da fase de PBAT, considerando a interferência das fases TPS na organização da matriz polimérica.

A medição do índice de fluidez (IF) foi realizada em um plastômetro CEAST Italy MeltFlow Modular Line, seguindo o método A da norma ASTM D1238. As condições empregadas para teste das formulações foram carga de 2,16 kg e 120 segundos de residência. As temperaturas empregadas para a medição do IF foram 130, 140, 150 e 160°C. Ao medir o IF em pelo menos três temperatura diferentes, pode-se calcular a energia de ativação do fluxo viscoso (E_a) baseando-se em uma modificação da equação de Arrhenius, conforme equação (2).

$$IF = B e^{-E_a/RT} \quad (2)$$

E_a é calculado pela inclinação da reta $\ln(IF)$ versus a inversa da temperatura $1/T$ o termo B é uma constante, enquanto R é a constante dos gases (8,314 J/mol K) e T a temperatura em Kelvin. A equação (2), ao ser linearizada, gera a equação (3), onde a inclinação da $\ln(IF) \times 1/T$ é igual ao termo $-E_a/R$.

$$\ln(IF) = \ln(B) - \frac{E_a}{R} \times \frac{1}{T} \quad (3)$$

O ensaio de tração foi realizado em corpos de prova injetados seguindo as diretrizes da norma ASTM D638. O teste foi conduzido em um equipamento INSTRON EMIC, modelo 23-5D, com célula de carga de 1 kN. As amostras foram submetidas a uma taxa de deformação de 50 mm/min. A tensão e alongamento foram registrados até a ruptura dos materiais.

As propriedades de flexão foram avaliadas por ensaio de flexão em 3 pontos de acordo com a norma ASTM D790 no equipamento INSTRON EMIC 23-5D em corpos de prova retangulares $63,50 \times 12,75 \times 3,25$ mm. A distância entre apoios (*span*) foi de 50 mm e a taxa de aplicação de carga foi de 2 mm/min. Por possuírem alta flexibilidade, as amostras apresentam deformação elevada e, portanto, a carga e a deflexão foram registradas até a deformação de 5%.

A resistência ao impacto foi determinada pelo ensaio de impacto Izod, conforme a norma ASTM D256. Os corpos de prova utilizados foram de formato retangular de dimensões de $63,50 \times 12,75 \times 3,25$ mm e com entalhe previamente realizado em entalhador NotchVis. O teste foi executado em equipamento Resil Impactor da CEAST, utilizando um martelo de 1 J.

A avaliação da morfologia dos materiais foi realizada através da microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície de fratura das amostras ensaiadas no teste de impacto. As micrografias foram adquiridas em um equipamento JOEL modelo JSM 6010-LA e as imagens obtidas utilizando um detector de elétrons secundário, operando a uma voltagem de 15 kV. Todas as amostras foram previamente recobertas com uma fina camada de ouro para o aumento da condutividade.

4. RESULTADOS

4.1. Propriedades Térmicas

A Figura 1 apresenta as curvas de termogravimetria (TG) e derivada da termogravimetria (DTG) das blendas formuladas com PBAT e diferentes fontes de amido para formação do TPS. De forma inesperada, observou-se que a formulação PBAT_AMM apresentou maior estabilidade térmica inicial e maior resíduo final em comparação à amostra PBAT_FMB, que contém exclusivamente farinha de mesocarpo de babaçu. Este comportamento contraria a expectativa inicial, uma vez que os componentes fibrosos da FMB, como celulose, hemicelulose e lignina [23] normalmente conferem maior estabilidade térmica devido à sua estrutura aromática da lignina e à geração de resíduos carbonáceos durante a degradação [37].

Uma possível explicação para esse comportamento está na modificação química do amido de milho comercial utilizado (AMM). Dependendo do tipo de modificação, como reticulação, oxidação ou esterificação, o amido pode apresentar maior resistência térmica, com formação de estruturas mais estáveis e, portanto, menos suscetíveis à degradação por calor [38,39]. Além disso, essas modificações também podem reduzir a hidrofiliabilidade do amido, resultando em menor teor de umidade residual, o que retardaria a perda inicial de massa observada nas curvas.

Por outro lado, a FMB, por ser um material de origem natural e não purificado, pode conter resíduos de lipídios, proteínas e açúcares que iniciam degradação em temperaturas mais baixas [27], como pode ser observado pela curva de DTG em temperaturas abaixo de 300°C. Fibras do babaçu, por exemplo, se mostraram menos resistentes à degradação térmica quando comparadas a outras fibras naturais como a de madeira e cana-de-açúcar [40] característica que pode ser devido à falta de tratamento e purificação da matéria prima.

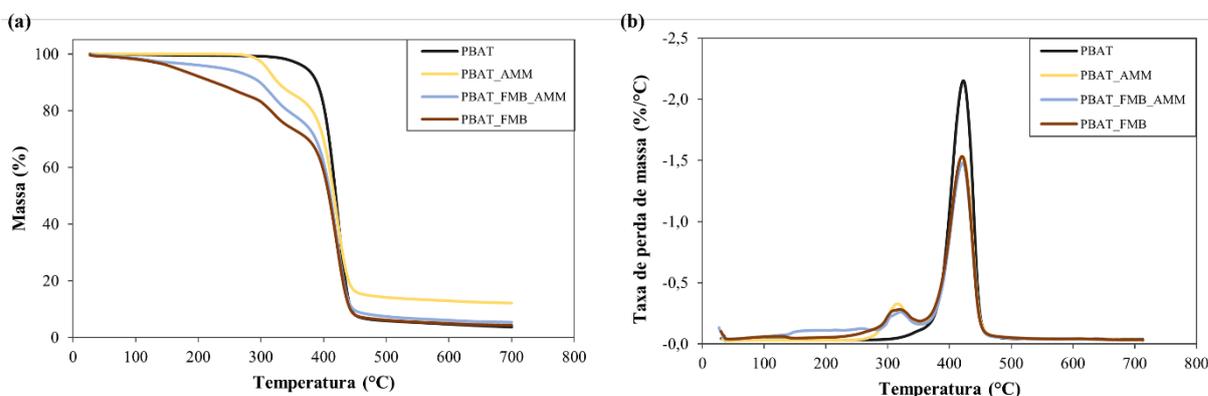


Figura 1. Curvas de TG (a) e DTG (b) das amostras de PBAT e blendas com TPS.

A Figura 2 apresenta as curvas de DSC obtidas durante o segundo aquecimento e o resfriamento do PBAT puro e das blendas com TPS. Os valores das temperaturas de transição, entalpias e cristalinidade extraídos dessas curvas são apresentados na Tabela 1, contendo os valores de transição vítrea (T_g), temperatura e entalpia de fusão (T_f e ΔH_f), temperatura e entalpia de cristalização (T_c e ΔH_c), e o cálculo da cristalinidade relativa (X_c).

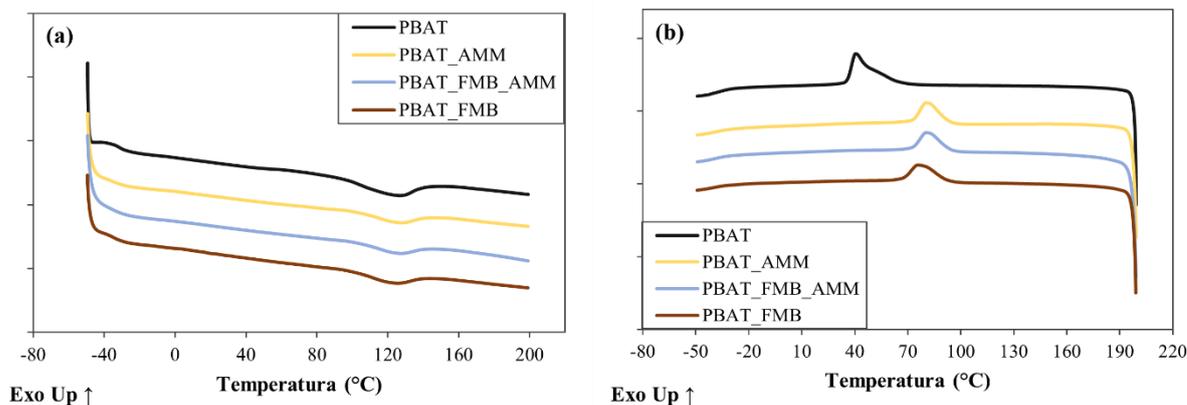


Figura 2. Curvas de DSC obtidas durante o segundo aquecimento (a) e resfriamento (b) das amostras de PBAT e blendas com TPS.

A amostra de PBAT puro apresentou o maior grau de cristalinidade com um valor 15%, seguido das demais blendas que ficaram com valores bastante próximos entre si e com uma cristalinidade abaixo dos 10%. A redução da cristalinidade nas blendas indica que a presença de TPS interfere negativamente na organização cristalina da matriz de PBAT. Isso é atribuído à dispersão do TPS na matriz, que atua como obstáculo físico à recristalização, além da possível incompatibilidade entre as fases, dificultando a reorganização ordenada das cadeias poliméricas

durante o resfriamento. Outros autores apresentam essa mesma tendência de diminuição da cristalinidade do PBAT com adição de TPS [41–43], apesar de ser esperado para amidos modificados, como é o caso do amido de milho utilizado neste trabalho, haver um aumento da cristalinidade em alguns casos [43,44].

Amostra	T _g (°C)	T _f (°C)	ΔH _f (J/g)	T _c (°C)	ΔH _c (J/g)	X _c (%)
PBAT	-22,63	125,13	17,59	40,49	19,75	15,43
PBAT_FMB	-28,80	119,85	7,656	76,02	12,37	9,6
PBAT_FMB_AMM	-22,39	122,13	6,222	80,37	11,21	7,8
PBAT_AMM	-26,17	126,12	6,776	80,31	11,85	8,5

Onde: T_g = Temperatura de transição vítrea; T_f = Temperatura de fusão; ΔH_f = Entalpia de fusão; T_c = Temperatura de cristalização; ΔH_c = Entalpia de cristalização; X_c = Cristalinidade.

Tabela 2. Valores relacionados às transições térmicas e cristalinidades das amostras.

A presença de TPS também afetou a temperatura de cristalização (T_c). Enquanto o PBAT puro cristalizou a 40,49 °C, as blendas apresentaram T_c mais elevadas próximas aos 80°C. Esse aumento pode ser atribuído à presença de componentes naturais na FMB ou da própria estrutura do TPS, que atuam como nucleantes, promovendo o início da cristalização em temperaturas mais altas, ainda que o processo de cristalização seja menos intenso [41]. No entanto, as entalpias de cristalização (ΔH_c) nas blendas foram significativamente menores que no PBAT puro, evidenciando que a quantidade total de cristais formados foi menor, mesmo com início antecipado da cristalização.

As transições vítreas (T_g), observadas entre -29°C e -22°C ficaram com valores próximos, mas com uma tendência para a leve diminuição da T_g das blendas. Esse deslocamento da temperatura de transição vítrea para valores menores pode sugerir maior mobilidade molecular possivelmente causado pelo plastificante glicerol ou à presença de componentes de baixa massa molar na FMB, ainda que sem mudança significativa.

A fusão das amostras, representada pelo pico endotérmico entre 119°C e 126°C, também foi influenciada pela presença do tipo de TPS. A blenda PBAT_AMM apresentou a maior temperatura de fusão (126,12°C), próxima ao valor do PBAT puro (125,13°C). Já a blenda PBAT_FMB, com T_f de 119,85°C, revelou maior variação na temperatura de fusão, possivelmente causada pela heterogeneidade da FMB, mas ainda sem mudança significativa. Mais uma vez, a amostra contendo os dois tipos de amido obteve um comportamento intermediário.

4.2. Propriedades Reológicas

O índice de fluidez (IF) das amostras foi avaliado em diferentes temperaturas, conforme apresentado na Tabela 3. Com base nos valores obtidos, foram construídas curvas de ln (IF) em função da inversa da temperatura (1/T), ajustadas linearmente pela equação de Arrhenius, permitindo o cálculo da energia de ativação do fluxo viscoso (E_a). Os respectivos valores de E_a e os coeficientes de determinação (R²) das regressões também estão apresentados.

Entre as formulações, a amostra PBAT_FMB apresentou os menores valores de IF em todas as temperaturas, indicando maior resistência ao fluxo, comportamento compatível com a

presença de partículas vegetais estruturais, como celulose e lignina, e outros resíduos da FMB. Esses componentes podem restringir o movimento das cadeias poliméricas, contribuindo para o aumento da viscosidade da blenda. Essa formulação também apresentou o maior valor de E_a , mostrando maior sensibilidade térmica do seu fluxo viscoso.

Amostra	IF (g/10min)				E_a (kJ/mol)	R^2
	130°C	140°C	150°C	160°C		
PBAT	28,19	41,90	64,69	86,02	6,55	0,9973
PBAT_FMB	12,58	19,74	36,42	51,34	8,35	0,9915
PBAT_FMB_AMM	20,69	41,99	49,66	67,57	6,51	0,9412
PBAT_AMM	31,33	51,44	66,41	92,31	6,07	0,9906

Tabela 3. Índice de fluidez (IF) em diferentes temperaturas, energia de ativação do fluxo viscoso (E_a) e coeficiente de determinação (R^2) para as amostras analisadas.

A formulação PBAT_AMM, contendo apenas TPS à base de amido de milho modificado, apresentou IFs elevados e uma das menores energias de ativação, sugerindo uma matriz com menor resistência interna ao fluxo. Isso pode estar relacionado à melhor compatibilidade entre o AMM plastificado e o PBAT, além de uma dispersão mais homogênea da fase TPS. A maior fluidez observada nesta formulação também é consistente com os efeitos esperados de modificações químicas no amido [39].

A formulação PBAT_FMB_AMM, contendo ambas as fontes de amido, apresentou valores intermediários de IF e E_a . Isso indica uma combinação dos efeitos estruturantes da FMB e da maior fluidez conferida pelo AMM. A fase TPS proveniente do amido de milho modificado pode estar atuando de forma a compatibilizar as demais fases do material, TPS de FMB e matriz de PBAT.

Por fim, o PBAT puro exibiu IFs crescentes e uma E_a de 6,55 kJ/mol, servindo como referência para a análise das demais formulações. A energia de ativação relativamente baixa evidencia a boa fluidez intrínseca do PBAT, sendo influenciada, nas blendas, pela adição de TPS e cargas naturais.

Esses resultados demonstram que o comportamento reológico das blendas é fortemente influenciado pela natureza e composição da fase TPS, impactando diretamente na processabilidade dos materiais. A formulação com FMB apresentou maior resistência ao escoamento e maior E_a , enquanto a presença de AMM favorece o fluxo. A combinação de FMB e AMM na formulação de TPS aproxima os valores de fluidez e E_a do PBAT puro, reduzindo o efeito da viscosidade concedido pela FMB.

4.3. Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas das blendas de PBAT com amido termoplástico produzido a partir de diferentes fontes de amido estão apresentadas na Tabela 4. Observa-se que a variação na composição da fase TPS, utilizando farinha de mesocarpo de babaçu ou amido de milho modificado, influenciou significativamente o desempenho mecânico das formulações.

Amostra	Tração			Flexão		Impacto
	σ_T (MPa)	ϵ_R (%)	E_T (MPa)	σ_F (MPa)	E_F (MPa)	RI (J/m)
PBAT_FMB	8,33 ± 0,21	53,1 ± 12,9	106,2 ± 4,7	6,04 ± 0,53	140,2 ± 15,3	65,6 ± 7,2
PBAT_FMB_AMM	6,13 ± 0,14	239,6 ± 83,3	61,9 ± 2,1	3,09 ± 0,10	58,2 ± 1,2	131,5 ± 8,5
PBAT_AMM	6,92 ± 0,29	489,5 ± 55,2	42,0 ± 1,9	2,55 ± 0,02	47,5 ± 1,4	NB *

Onde: σ_T = Resistência à tração; ϵ_R = Alongamento na ruptura; E_T = Módulo de elasticidade em tração; σ_F = Resistência à flexão; E_F = Módulo de elasticidade em flexão; RI = Resistência ao Impacto Izod.
*NB = não houve ruptura.

Tabela 4. Resultados das propriedades mecânicas das formulações.

A amostra PBAT_FMB, contendo exclusivamente FMB como fonte de amido, apresentou a maior resistência à tração (σ_T) entre as formulações, com valor médio de 8,33 MPa. Esse resultado pode estar associado à presença de componentes estruturais na FMB, como fibras vegetais e resíduos de lignina, que atuam como cargas rígidas, promovendo maior resistência mecânica. No entanto, essa formulação exibiu o menor alongamento na ruptura (ϵ_R), com apenas 53,1%, evidenciando comportamento mais frágil, típico de materiais com alto teor de cargas rígidas ou pouco compatibilizados. O resultado pode também indicar baixa plastificação do amido presente na FMB.

Por outro lado, a amostra PBAT_AMM, composta apenas por TPS à base de AMM, apresentou o maior alongamento na ruptura (489,5%) e o menor módulo de elasticidade em tração, refletindo o caráter mais flexível e compatível dessa fase com a matriz de PBAT.

A formulação mista, PBAT_FMB_AMM apresentou propriedades mecânicas intermediárias entre as demais com um bom equilíbrio entre rigidez e flexibilidade, o que pode ser atribuído à combinação do efeito enrijecimento da FMB e flexibilidade associada ao AMM plastificado, ainda assim essa formulação teve o menor valor em resistência mecânica.

Nos ensaios de flexão, o comportamento mostra tendências similares às observadas na tração. A amostra PBAT_FMB apresentou a maior resistência à flexão e o maior módulo em flexão. Por outro lado, a amostra PBAT_AMM apresentou menores valores de σ_F e E_F coerentes com sua natureza mais dúctil. Novamente, a amostra PBAT_FMB_AMM apresentou valores intermediários, porém mais próximos ao da amostra que contendo somente AMM na formulação de TPS.

A resistência ao impacto das formulações apresentou variações significativas de acordo com a fonte de amido utilizada na preparação do TPS. Amostras com uma única fonte de TPS mostraram comportamentos contrastantes. O material PBAT_FMB apresentou uma resistência ao impacto significativamente inferior às demais, podendo ser resultado da presença de celulose ou lignina na FMB que, embora aumentem a rigidez, tendem a formar interfaces menos compatíveis com a matriz polimérica, favorecendo a propagação de trincas e reduzindo a capacidade de absorção de energia sob impacto [45]. Novamente, é levantada a possibilidade da pobre plastificação do amido contido na FMB e sua menor compatibilidade com a matriz de PBAT.

Por outro lado, a amostra PBAT_AMM, composta exclusivamente por TPS à base de AMM, não sofreu ruptura durante o ensaio de impacto (NB) nas condições testadas, o que indica elevada tenacidade. Essa resposta está alinhada ao elevado alongamento na ruptura

observado nos ensaios de tração, sugerindo que a matriz PBAT com TPS à base de AMM apresenta elevada tenacidade, característica desejável em embalagens flexíveis

A formulação PBAT_FMB_AMM, que combina em partes iguais a farinha de mesocarpo de babaçu e o amido de milho modificado, exibiu resistência ao impacto de 131,5 J/m, sendo duas vezes superior ao valor médio da amostra PBAT_FMB. Esse resultado indica que o AMM possui efeito de tenacificante, enquanto a FMB de enrijecedora.

Esses resultados sugerem que a FMB atua como uma carga rígida e pouco compatível, conferindo maior rigidez e resistência mecânica, mas reduzindo a ductilidade. Resultados semelhantes foram observados em estudos de blendas poliméricas contendo FMB, como formulações com PLA, PBAT ou PHB [46–49]. Já o AMM contribui para a maior flexibilidade das blendas, resultando em materiais mais dúcteis e resistentes ao impacto. A formulação com ambos os componentes de amido (PBAT_FMB_AMM) se destaca por apresentar propriedades equilibradas dentre as demais.

4.4. Morfologia

A Figura 3 apresenta micrografias de MEV das superfícies de fratura das amostras PBAT_FMB, PBAT_FMB_AMM e PBAT_AMM. As imagens revelam diferenças morfológicas importantes relacionadas à dispersão da fase TPS, à presença de poros e à interação interfacial entre os componentes das blendas.

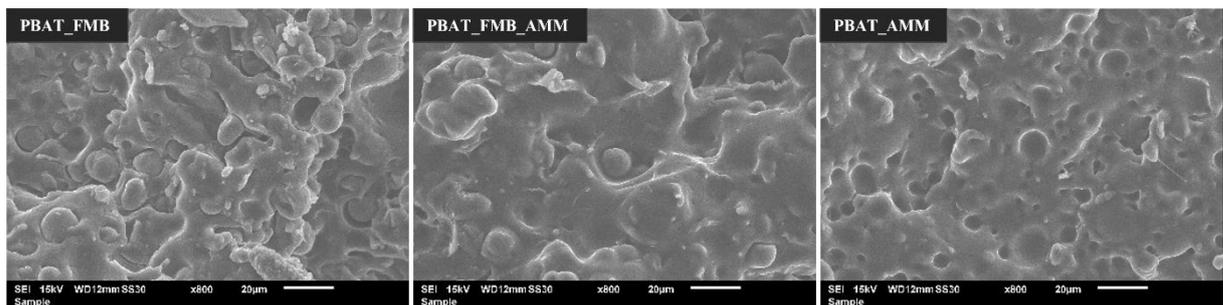


Figura 3. Micrografias das blendas PBAT/TPS (magnificação de 800x).

A micrografia da amostra PBAT_FMB apresenta uma superfície de fratura mais irregular e rugosa, com cavidades alongadas e domínios de fase mal distribuídos. Observam-se partículas da FMB dispersas na matriz polimérica com dimensões e formatos irregulares. Essa morfologia é indicativa de baixa compatibilidade entre o PBAT e os constituintes da farinha de mesocarpo de babaçu. A presença de falhas interfaciais sugere que a FMB possui interação com a matriz limitada, o que está de acordo com os resultados de menor alongamento e resistência ao impacto obtidos nos ensaios mecânicos.

Na amostra PBAT_FMB_AMM, observa-se uma superfície mais homogênea, com menor quantidade de porosidade visível e melhor distribuição dos domínios dispersos. Ainda é possível identificar regiões esféricas associadas aos grânulos de amido, mas com interfaces mais coesas em comparação à amostra com FMB puro. Esse comportamento indica um efeito de compatibilização parcial promovido pela presença do amido de milho modificado plastificado, que pode ter melhorado a interação entre a FMB e a matriz de PBAT. Essa observação é consistente com os resultados observados nos ensaios mecânicos e reológicos.

A amostra PBAT_AMM apresenta uma superfície visivelmente mais contínua e regular, com domínios bem distribuídos. No entanto, são notáveis algumas cavidades arredondadas isoladas, que

podem ter duas origens possíveis: (i) cavidades formadas por extração de domínios da fase TPS durante a fratura no impacto; ou (ii) poros reais formados durante o processamento, oriundos de voláteis ou umidade residual. Ainda que essas estruturas se assemelhem a poros, o seu contorno liso e isolado sugere que sejam mais provavelmente cavidades de tração. Apesar disso, a morfologia geral da amostra indica melhor miscibilidade entre PBAT e TPS, com uma superfície mais homogênea e interfaces menos defeituosas, o que se alinha com os resultados de maior alongamento e resistência ao impacto. Essa morfologia da amostra também pode explicar a menor energia de ativação observada para essa formulação, indicando fluxo mais facilitado durante o processamento.

Essas análises confirmam que a morfologia da fratura está diretamente associada ao tipo de TPS utilizado, sendo a FMB menos compatível com a matriz de PBAT, enquanto o AMM promove uma estrutura mais homogênea e contínua. A presença de AMM na amostra mista apresenta melhora a interação entre os componentes da formulação e corrobora com os demais resultados mecânicos, térmicos e reológicos discutidos anteriormente.

5. CONCLUSÕES

O presente estudo avaliou o efeito da fonte de amido na formulação de blendas de PBAT com amido termoplástico (TPS), utilizando farinha de mesocarpo de babaçu (FMB) e amido de milho modificado (AMM). As formulações foram comparadas quanto às suas propriedades térmicas, reológicas, mecânicas e morfologia, evidenciando o impacto direto da natureza do TPS no desempenho final dos materiais.

As análises térmicas mostraram que a adição de TPS, reduziu a cristalinidade do PBAT e causou leve alteração nas temperaturas de transição vítrea e de fusão das blendas. Observou-se ainda um aumento substancial na temperatura de cristalização para todas as blendas, sugerindo possível efeito nucleante promovido pelos constituintes do TPS, ainda que esse efeito não se tenha traduzido em aumento da cristalinidade.

Os ensaios de TGA revelaram que, ao contrário do esperado, a formulação com AMM apresentou maior estabilidade térmica inicial e maior resíduo final do que a com FMB, o que foi atribuído à modificação química do amido de milho e à presença de impurezas e constituintes termicamente instáveis na FMB.

A análise reológica demonstrou que a formulação com FMB apresentou o menor índice de fluidez (IF) e maior energia de ativação do fluxo viscoso (E_a), caracterizando um material mais resistente ao escoamento e mais sensível à temperatura. Por outro lado, a amostra com AMM foi a mais fluida, com menor E_a , evidenciando melhor processabilidade e maior compatibilidade entre o TPS e o PBAT nessa formulação.

Nas propriedades mecânicas, a FMB conferiu maior resistência à tração e à flexão, bem como maior rigidez denotado pelos valores superiores de módulo elástico na tração e flexão. No entanto, o alongamento e a resistência ao impacto foram drasticamente comprometidos nessa amostra. Já o AMM favoreceu o alongamento e a tenacidade, enquanto a combinação de ambos os amidos resultou em propriedades mecânicas equilibradas.

A análise morfológica por MEV confirmou essas observações, mostrando que a presença da FMB gera superfícies de fratura mais irregulares e com domínios mal distribuídos e com baixa compatibilidade, visto pelos vazios formados entre as fases. A amostra contendo somente AMM promove uma morfologia mais contínua com maior compatibilidade entre os

componentes. Já a amostra PBAT_FMB_AMM apresentou morfologia intermediária, com distribuição mais homogênea dos domínios e redução de falhas interfaciais em relação à FMB pura, indicando que o AMM contribuiu para uma melhora parcial da dispersão e da adesão entre as fases.

Dessa forma, conclui-se que a FMB atua como uma carga natural rígida com potencial de aplicação em materiais com maior rigidez, enquanto o AMM favorece a obtenção de materiais mais flexíveis e processáveis. A combinação de ambos permite ajustar o perfil de propriedades, sendo promissora para aplicações específicas, como embalagens biodegradáveis com requisitos mecânicos e térmicos balanceados. Além disso, o uso da FMB representa uma alternativa sustentável e regionalmente viável ao amido convencional, contribuindo para o aproveitamento de resíduos agroindustriais.

RECONHECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto SENAI de Inovação em Engenharia de Polímeros pelo suporte técnico e de infraestrutura, à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e ao Laboratório de Polímeros (LAPOL) pelo apoio acadêmico e infraestrutura. Agradecimentos especiais ao Núcleo de Sustentabilidade pelo incentivo à pesquisa em materiais ambientalmente responsáveis e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro por meio da concessão de bolsas de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] J. Jian, Z. Xiangbin, H. Xianbo, "An overview on synthesis, properties and applications of poly(butylene-adipate-co-terephthalate)-PBAT", 2020 *Adv. Ind. Eng. Polym. Res.* 3, 19–26. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2020.01.001>.
- [2] S.K. Nayak, "Biodegradable PBAT/Starch nanocomposites", 2010 *Polym. - Plast. Technol. Eng.* 49, 1406–1418. <https://doi.org/10.1080/03602559.2010.496397>.
- [3] V. Tserki, P. Matzinos, E. Pavlidou, D. Vachliotis, C. Panayiotou, "Biodegradable aliphatic polyesters. Part I. Properties and biodegradation of poly(butylene succinate-co-butylene adipate)", 2006 *Polym. Degrad. Stab.* 91, 367–376. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2005.04.035>.
- [4] Q. Wu, Y. Liu, K. Jian, S. Jiang, F. Weng, C. Wu, "Constructing a special interface structure of starch/PBAT composites with a novel “many-to-many” strategy", 2024 *Compos. Sci. Technol.* 252, 110593. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2024.110593>.
- [5] B. Lin, C. Li, F. Chen, C. Liu, "Continuous Blown Film Preparation of High Starch Content Composite Films with High Ultraviolet Aging Resistance and Excellent Mechanical Properties", 2021 *Polymers (Basel)*. 13, 3813. <https://doi.org/10.3390/polym13213813>.
- [6] C. Aversa, M. Barletta, "Addition of Thermoplastic Starch (TPS) to Binary Blends of Poly(lactic acid) (PLA) with Poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT): Extrusion Compounding, Cast Extrusion and Thermoforming of Home Compostable Materials", 2022 *Chinese J. Polym. Sci. (English Ed.)* 40, 1269–1286. <https://doi.org/10.1007/s10118-022-2734-0>.
- [7] Y.G. Fang, J.Y. Lin, Y.C. Zhang, Q.W. Qiu, Y. Zeng, W.X. Li, Z.Y. Wang, "A reactive

- compatibilization with the compound containing four epoxy groups for polylactic acid/poly(butylene adipate-co-terephthalate)/thermoplastic starch ternary biocomposites", 2024 *Int. J. Biol. Macromol.* 262, 129998. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129998>.
- [8] F. Ivanič, D. Johec-Mošková, I. Janigová, I. Chodák, "Physical properties of starch plasticized by a mixture of plasticizers", 2017 *Eur. Polym. J.* 93, 843–849. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2017.04.006>.
- [9] F. De Li, L. Te Li, Z. Li, E. Tatsumi, "Determination of starch gelatinization temperature by ohmic heating", 2004 *J. Food Eng.* 62, 113–120. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00199-7](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00199-7).
- [10] L. Avérous, P.J. Halley, "Biocomposites based on plasticized starch", 2009 *Biofuels, Bioprod. Biorefining* 3, 329–343. <https://doi.org/10.1002/bbb.135>.
- [11] L.A. Borges, K.K. Ramos, M.H.F. Felisberto, E.R.N. Franciosi, P. Efraim, "Babassu Mesocarp: A Sustainable Source for Obtaining Starch and New Products", 2023 *Starch/Staerke* 75, 2200203. <https://doi.org/10.1002/star.202200203>.
- [12] I. Hudson da Silva Souza, J.P. Nogueira, M. Rajan, M.T. Santos Leite Neta, N. Narain, "Babassu Oil (*Orbynia phalerata*), an Artisanal Product: Process Optimization of Seed Roasting on Yield, Phenolic Compounds, and Antioxidant Capacity", 2021 *Eur. J. Lipid Sci. Technol.* 123, 2000163. <https://doi.org/10.1002/ejlt.202000163>.
- [13] A. Zanine, Y. Portela, D. Ferreira, M. Parente, H. Parente, E. Santos, J. Oliveira, A. Perazzo, T. Nascimento, I.A. da Cunha, C. de Sà, N. Machado, F.N. Santos, F.C. Sousa, R. Costa, "Babassu Byproducts in Total Mixed Ration Silage Based on Sugarcane for Small Ruminants Diets", 2022 *Agronomy* 12, 1641. <https://doi.org/10.3390/agronomy12071641>.
- [14] S.C.S. Rodrigues, F.A.S. De Mesquita, L.H. De Carvalho, T.S. Alves, R. Folkersma, R.S.D.R.M. Araújo, A.D. Oliveira, R. Barbosa, "Thermal and Mechanical Properties of Polymeric Films Based on PLA, PBAT, Corn Starch, and Babassu Mesocarp Starch by Flat Extrusion for Packaging", 2023 *J. Food Eng. Technol.* 12, 48–58. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/abeaca>.
- [15] S.C. Saraiva Rodrigues, A.S. da Silva, L.H. de Carvalho, T.S. Alves, R. Barbosa, "Morphological, structural, thermal properties of a native starch obtained from babassu mesocarp for food packaging application", 2020 *J. Mater. Res. Technol.* 9, 15670–15678. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.11.030>.
- [16] B.C. Maniglia, L. Tessaro, A.P. Ramos, D.R. Tapia-Blácido, "Which plasticizer is suitable for films based on babassu starch isolated by different methods?", 2019 *Food Hydrocoll.* 89, 143–152. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.10.038>.
- [17] B.C. Maniglia, L. Tessaro, A.A. Lucas, D.R. Tapia-Blácido, "Bioactive films based on babassu mesocarp flour and starch", 2017 *Food Hydrocoll.* 70, 383–391. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.04.022>.
- [18] F. dos A. Rodrigues Campos, F. Chagas Rodrigues de Souza, L. Rosa Ribeiro da Silva, E. Santos Castro, Sustainable production and mechanical characterization of extruded wood-plastic composite made from HDPE and babassu fiber, in: *ABCM Int. Congr. Mech. Eng.*, 2021. <https://doi.org/10.26678/abcm.cobem2021.cob2021-0480>.
- [19] S.A. Arruda, J.C. de Sousa, J.C. Lima, M. do Bom Conselho Vitorino, E.L. Canedo, Y.M.B. de Almeida, "Nonisothermal melt crystallization kinetics of PHB/babassu compounds", 2018 *Mater. Res.* 21, e20180213. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2018-0213>.
- [20] Y.S. Chaves, S.N. Monteiro, L.F.C. Nascimento, T.G. del Rio, "Mechanical and Ballistic Properties of Epoxy Composites Reinforced with Babassu Fibers (*Attalea speciosa*)", 2024 *Polymers (Basel)*. 16, 913. <https://doi.org/10.3390/polym16070913>.

- [21] J.B. de Moura Furtado, P.A.F. Filho, T.P. Oliveira, M.R. de Sousa Caetano, I.M. de Souza Araujo, F.C. Figueiredo, J.R. dos Santos Júnior, "Enhancement of the photodegradative potential of polymer composites containing babassu fiber", 2020 *Mater. Res.* 23, e20190438. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2019-0438>.
- [22] A.K. da S. Raposo, L.C. Paixão, A.A. Rocha, I.A. Lopes, G.A.S. Santos, G.A.C. Ribeiro, A.S. de Menezes, A.K.D. Barros Filho, A.A. Santana, "Characterization of Biodegradable Films Produced from Mixtures of Alginate, Starch and Babassu Fibers", 2021 *J. Polym. Environ.* 29, 1212–1226. <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01952-z>.
- [23] Y.S. Chaves, P.H.P.M. da Silveira, S.N. Monteiro, L.F.C. Nascimento, "Babassu Coconut Fibers: Investigation of Chemical and Surface Properties (*Attalea speciosa*)", 2023 *Polymers (Basel)*. 15, 3863. <https://doi.org/10.3390/polym15193863>.
- [24] S.M. Silva, L.F. Polesi, G.S.R. Pinheiro, A.M. Ferreira, G.T. de S. Sora, G. Oliveira-Folador, "Extracion, characterization and application of amazon fruit starches : a review", 2022 *Open Sci. Res.* 1, 120–136.
- [25] R.R. De Almeida, L.G. Lacerda, F.S. Murakami, G. Bannach, I.M. Demiate, C.R. Soccol, M.A. Da Silva Carvalho Filho, E. Schnitzler, "Thermal analysis as a screening technique for the characterization of babassu flour and its solid fractions after acid and enzymatic hydrolysis", 2011 *Thermochim. Acta* 519, 50–54. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2011.02.029>.
- [26] J. Oliveira, Y.J.S. Santos, C.A.M. Liviz, G.T. de Souza, L.C. de Paula, L.F. Polesi, G.O. Folador, "Pectic substances from babassu mesocarp flour: extraction and characterization", 2024 *J. Eng. Exact Sci.* 10, 18911. <https://doi.org/10.18540/jcecvl10iss5pp18911>.
- [27] B.A. Cinelli, J.A. López, L.R. Castilho, D.M.G. Freire, A.M. Castro, "Granular starch hydrolysis of babassu agroindustrial residue: A bioprocess within the context of biorefinery", 2014 *Fuel* 124, 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.01.076>.
- [28] B.C. Maniglia, D.R. Tapia-Blácido, "Isolation and characterization of starch from babassu mesocarp", 2016 *Food Hydrocoll.* 55, 47–55. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.11.001>.
- [29] T. Bourtoom, "Plasticizer effect on the properties of biodegradable blend from rice starch-chitosan", 2008 *Songklanakarin J. Sci. Technol.* 30, 149–155.
- [30] M.L. Sanyang, S.M. Sapuan, M. Jawaid, M.R. Ishak, J. Sahari, "Effect of plasticizer type and concentration on tensile, thermal and barrier properties of biodegradable films based on sugar palm (*Arenga pinnata*) starch", 2015 *Polymers (Basel)*. 7, 1106–1124. <https://doi.org/10.3390/polym7061106>.
- [31] L. Martino, M.A. Berthet, H. Angellier-Coussy, N. Gontard, "Understanding external plasticization of melt extruded PHBV-wheat straw fibers biodegradable composites for food packaging", 2015 *J. Appl. Polym. Sci.* 132, 41611. <https://doi.org/10.1002/app.41611>.
- [32] P. Chen, L. Yu, L. Chen, X. Li, "Morphology and Microstructure of Maize Starches with Different Amylose/Amylopectin Content", 2006 *Starch - Stärke* 58, 611–615.
- [33] J. Lelievre, "Starch gelatinization", 1974 *J. Appl. Polym. Sci.* 18, 293–296. <https://doi.org/10.1002/app.1975.070190225>.
- [34] A. Hejna, J. Lenža, K. Formela, J. Korol, "Studies on the Combined Impact of Starch Source and Multiple Processing on Selected Properties of Thermoplastic Starch/Ethylene-Vinyl Acetate Blends", 2019 *J. Polym. Environ.* 27, 1112–1126. <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01406-1>.
- [35] I.A. do S. Matusinho, T.F. Ramos, J.B. de Oliveira, E.F. Pedroso, P.P. de Souza, P.S. d. O. Patricio, "Influence of Starch Source on Properties of Blends Based on Thermoplastic Starch and Poly(Butylene-Adipate-Co-Terephthalate)", 2024 *Carbohydr. Polym.*

- Technol. Appl. 7,. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2024.100433>.
- [36] A.B. Martins, A.M. Silveira, F.D.P. Morisso, R.M.C. Santana, "Gelatinized and nongelatinized starch/pp blends: effect of starch source and carboxylic and incorporation", 2021 *J. Polym. Res.* 28,. <https://doi.org/10.1007/s10965-020-02372-2>.
- [37] M. Li, Y. Jia, X. Shen, T. Shen, Z. Tan, W. Zhuang, G. Zhao, C. Zhu, H. Ying, "Investigation into lignin modified PBAT/thermoplastic starch composites: Thermal, mechanical, rheological and water absorption properties", 2021 *Ind. Crops Prod.* 171,. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113916>.
- [38] E. Ojogbo, R. Blanchard, T. Mekonnen, "Hydrophobic and Melt Processable Starch-Laurate Esters: Synthesis, Structure–Property Correlations", 2018 *J. Polym. Sci. Part A Polym. Chem.* 56, 2611–2622. <https://doi.org/10.1002/pola.29237>.
- [39] V.S. de Borba, C.O. Silveira, J.B. Alves, V.M. Gropelli, E. Badiale-Furlong, "Modificações Do Amido E Suas Implicações Tecnológicas E Nutricionais", 2021 *Ciência e Tecnol. Aliment. Pesqui. e Práticas Contemp.* 428–457. <https://doi.org/10.37885/210504724>.
- [40] A.L. De Lemos, C.J. Mauss, R.M.C. Santana, "Characterization of natural fibers: Wood, sugarcane and babassu for use in biocomposites", 2017 *Cellul. Chem. Technol.* 51, 711–718.
- [41] R.A. Garalde, R. Thipmanee, P. Jariyasakoolroj, A. Sane, "The effects of blend ratio and storage time on thermoplastic starch/poly(butylene adipate-co-terephthalate) films", 2019 *Heliyon* 5,. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01251>.
- [42] H. Pan, D. Ju, Y. Zhao, Z. Wang, H. Yang, H. Zhang, L. Dong, "Mechanical properties, hydrophobic properties and thermal stability of the biodegradable poly(butylene adipate-co-terephthalate)/maleated thermoplastic starch blown films", 2016 *Fibers Polym.* 17, 1540–1549. <https://doi.org/10.1007/s12221-016-6379-x>.
- [43] K. Wadaugsorn, T. Panrong, P. Wongphan, N. Harnkarnsujarit, "Plasticized hydroxypropyl cassava starch blended PBAT for improved clarity blown films: Morphology and properties", 2022 *Ind. Crops Prod.* 176,. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114311>.
- [44] P. Wongphan, T. Panrong, N. Harnkarnsujarit, "Effect of different modified starches on physical, morphological, thermomechanical, barrier and biodegradation properties of cassava starch and polybutylene adipate terephthalate blend film", 2022 *Food Packag. Shelf Life* 32,. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100844>.
- [45] E. da S.B. Ferreira, F.S. da Silva, C.B.B. Luna, A.R. de M. Costa, F.M. de Sousa, L.H. de Carvalho, R.M.R. Wellen, E.M. Araújo, "Toward Producing Biopolyethylene/Babassu Fiber Biocomposites with Improved Mechanical and Thermomechanical Properties", 2024 *Polymers (Basel)*. 16, 419. <https://doi.org/10.3390/polym16030419>.
- [46] L.R.C. da Silva, T.S. Alves, R. Barbosa, F.D.P. Morisso, A. de O. Rios, R.M.C. Santana, "Characterization of Babassu Mesocarp Flour as Potential Bio-Reinforcement for Poly (Lactic Acid)", 2023 *J. Food Ind.* 7, 24–53.
- [47] M.A.B.S. Nunes, V.A.D. Marinho, G.A.M. Falcão, E.L. Canedo, M.A.G. Bardi, L.H. Carvalho, "Rheological, mechanical and morphological properties of poly(butylene adipate-co-terephthalate)/thermoplastic starch blends and its biocomposite with babassu mesocarp", 2018 *Polym. Test.* 70, 281–288. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.07.009>.
- [48] V.C. Beber, S. de Barros, M.D. Banea, M. Brede, L.H. de Carvalho, R. Hoffmann, A.R.M. Costa, E.B. Bezerra, I.D.S. Silva, K. Haag, K. Koschek, R.M.R. Wellen, "Effect of Babassu natural filler on PBAT/PHB biodegradable blends: An investigation of thermal, mechanical, and morphological behavior", 2018 *Materials (Basel)*. 11, 820.

- <https://doi.org/10.3390/ma11050820>.
- [49] N.F. Inocência Silva, J.E. Soares Filho, T.G. Cabral Santos, J. da Silva Chagas, S.A.S. Lucena de Medeiros, E.B. Costa Santos, R.M.R. Wellen, L. Albino da Silva, L. Carvalho, M.A.B.S. Nunes, A. Severino Ferreira e Santos, "Biocomposites based on poly(hydroxybutyrate) and the mesocarp of babassu coconut (*Orbignya phalerata* Mart.): effect of wax removal and maleic anhydride-modified polyethylene addition", 2021 *J. Mater. Res. Technol.* 15, 3161–3170. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.09.008>.