



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS DE SÃO BERNARDO**  
**LICENCIATURA EM CIÊNCIAS NATURAIS/QUÍMICA**

**JEANE DO NASCIMENTO PAIVA**

**PRODUÇÃO, OTIMIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE BIOPLÁSTICOS A  
PARTIR DO AMIDO DA MANDIOCA (*Manihot esculenta*)**

São Bernardo

2026

**JEANE DO NASCIMENTO PAIVA**

**PRODUÇÃO, OTIMIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE BIOPLÁSTICOS A  
PARTIR DO AMIDO DA MANDIOCA (*Manihot esculenta*)**

Monografia apresentada ao Curso de Licenciatura em Ciências Naturais/ Química, da Universidade Federal do Maranhão, Centro de Ciências de São Bernardo, como um dos requisitos para obtenção do título de Licenciado em Ciências Naturais/Química.

Orientadora Profa. Dra. Maria do Socorro Evangelista Garreto

São Bernardo

2026

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

do Nascimento Paiva, Jeane.  
PRODUÇÃO, OTIMIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE BIOPLÁSTICOS A  
PARTIR DO AMIDO DA MANDIOCA *Manihot esculenta* / Jeane do  
Nascimento Paiva. - 2026.  
48 p.

Orientador(a): Maria do Socorro Evangelista Garreto.  
Monografia (Graduação) - Curso de Ciências Naturais -  
Química, Universidade Federal do Maranhão, São Bernardo-  
ma, 2026.

1. Biopolímeros. 2. Amido de Mandioca. 3. Química  
Verde. 4. Sustentabilidade. I. Evangelista Garreto,  
Maria do Socorro. II. Título.

**PRODUÇÃO, OTIMIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE BIOPLÁSTICOS A  
PARTIR DO AMIDO DA MANDIOCA (*Manihot esculenta*)**

Aprovado em: 21/01/2026

**BANCA EXAMINADORA**

---

Profa. Dra. Maria do Socorro Evangelista Garreto (orientadora)  
Universidade Federal do Maranhão  
Centro de Ciências de São Bernardo

---

Profa. Dra. Louise Lee da Silva Magalhães  
Universidade Federal do Maranhão  
Centro de Ciências de São Bernardo

---

Prof. Dr. Josberg Silva Rodrigues  
Universidade Federal do Maranhão  
Centro de Ciências de São Bernardo

**Ao meu pai, Francisco Silva Paiva (In Memoriam).**

"O seu sonho de me ver formada me acompanha em cada passo dessa jornada. Seu orgulho e incentivo continuam vivos em mim e foram uma das maiores motivações para eu chegar até aqui.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, autor da minha vida e minha rocha inabalável. Agradeço por Sua presença constante, que me sustentou quando minhas forças se esgotaram e por ser o fôlego que me permitiu concluir esta jornada. Louvo por cada porta aberta, pela sabedoria derramada sobre mim e por colocar as pessoas certas em meu caminho. Sem o Seu amparo e Sua graça infinita, nada do que realizei seria possível. Este trabalho é, acima de tudo, um testemunho do Teu cuidado e da Tua fidelidade em minha vida.

À minha mãe, Raimunda Paiva, por ter sido a base necessária para o meu amadurecimento e por me ensinar, através das dificuldades e da própria vida, a ser uma mulher forte, resiliente e capaz de enfrentar os desafios com coragem.

Ao meu pai, Francisco Silva Paiva (In Memoriam), meu eterno incentivador. Embora o destino tenha nos separado fisicamente, guardo comigo a certeza de que sempre acreditou em meus sonhos.

À minha orientadora, Profa. Dra. Maria do Socorro Evangelista Garreto, pela excelência no ensino, pela paciência em cada orientação e por todo o suporte humano e acadêmico oferecido ao longo desta pesquisa. Sua mentoria foi um privilégio e tornou minha jornada acadêmica mais leve e significativa.

Ao Prof. Dr. Denilson Moreira Santos, do CCET/UFMA São Luís, pela generosidade em compartilhar seus conhecimentos técnicos e pela contribuição fundamental para a realização das análises laboratoriais deste trabalho.

À técnica do Laboratório de Química da UFMA – Campus São Bernardo, Kerlane Fernandes, pelo apoio, disponibilidade e auxílio durante as etapas experimentais, contribuindo de forma essencial para o desenvolvimento desta pesquisa científica.

À Central Analítica de Química do CCET/UFMA, pelas análises técnicas realizadas, que conferiram o rigor científico necessário a este estudo.

Agradeço ao Laboratório de Ensaios Mecânicos do curso de Design do CCET/UFMA pela disponibilidade, acolhimento e suporte técnico na realização das análises mecânicas deste trabalho.

Aos meus tios, Luis Lopes e Lucineide do Nascimento, por acreditarem em mim e por proporcionarem oportunidades fundamentais para que eu pudesse crescer e chegar até este momento.

Agradeço imensamente ao Jorge Ricardo, por ter sido meu alicerce e companheiro durante grande parte desta jornada. Sua presença em minha vida foi o incentivo que precisei nos dias mais

difíceis desta pesquisa. O término deste ciclo também leva um pouco da sua dedicação e do meu carinho. Sua importância na minha formação pessoal e acadêmica é imensurável e permanece registrada nestas páginas.

Aos meus amigos Cleonice Evaristo, Daiane Ferreira, João Neto, Luana Pereira, Rahynara Campelo, Francivaldo Pereira, Maciel Reis e Marcos Fabrício, obrigada por serem meu refúgio, pelas risadas, pelos conselhos e por cada momento de descontração que renovou minhas energias. A amizade de vocês tornou essa caminhada muito mais leve, colorida e suportável. Deixo aqui meu agradecimento especial a Marcos Fabrício, pelo incentivo constante, pelo encorajamento, por acreditar em mim e por toda a ajuda recebida ao longo dessa caminhada. Sou eternamente grata por seu apoio.

A todos os professores do Campus São Bernardo, que ao longo destes anos contribuíram para a minha formação acadêmica e despertaram em mim o amor pela ciência.

À minha avó, Maria das Graças (In Memoriam), minha eterna referência de fé e perseverança. Sua partida deixou um vazio imenso, mas seu exemplo de vida continuará sendo minha bússola para os próximos desafios.

A todos que torceram e contribuíram, direta ou indiretamente, para que este sonho se tornasse realidade, reconheço que sou reflexo de todas as pessoas fantásticas que passaram pela minha vida. Desejo que todos aqueles que amei e que me amaram saibam o quanto sou imensamente grata por terem me feito sentir viva.

## RESUMO

A crise ambiental global decorrente do descarte inadequado de polímeros de origem fóssil intensificou a busca por alternativas biodegradáveis e renováveis. Este trabalho apresenta os resultados da pesquisa sobre produção e caracterização de bioplásticos produzidos a partir do amido de mandioca (*Manihot esculenta*) proveniente de um território de excelência agrícola em Santana do Maranhão. O objetivo central foi determinar a influência da concentração de glicerina adicionada ao amido da mandioca nas propriedades finais do material. A metodologia envolveu ensaios com variações controladas do plastificante entre 10% e 35%, visando a estabilização da matriz polimérica. Os resultados indicaram que a amostra contendo 20% de glicerina atingiu o ponto ótimo de plastificação, exibindo resistência mecânica equilibrada e alta flexibilidade, com alongamento superior. A análise por Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) ratificou a eficácia das interações moleculares por ligações de hidrogênio entre o amido e o plastificante. Adicionalmente, testes de enterramento em solo e ensaios de fitotoxicidade confirmaram a rápida decomposição do filme sem danos ambientais, validando a sustentabilidade do material. Estes resultados demonstram que o amido de mandioca (*Manihot esculenta*), oriundo de Santana do Maranhão, constitui uma matriz polimérica viável para a produção de bioplásticos com potencial aplicação sustentável coerentes com os princípios da Química Verde. A variação controlada da concentração de glicerina mostrou-se determinante para as propriedades finais do material, evidenciando que a plastificação adequada é um fator crítico para o desempenho mecânico e funcional dos filmes produzidos.

**Palavras-chave:** Biopolímeros; Amido de Mandioca; Química verde; Sustentabilidade.

## ABSTRACT

The global environmental crisis resulting from the improper disposal of fossil-based polymers has intensified the search for biodegradable and renewable alternatives. This study presents the results of research on the production and characterization of bioplastics produced from cassava starch (*Manihot esculenta*) sourced from a territory of agricultural excellence in Santana do Maranhão. The central objective was to determine the influence of the concentration of glycerin added to the cassava starch on the final properties of the material. The methodology involved assays with controlled variations of the plasticizer between 10% and 35%, aiming at the stabilization of the polymer matrix. The results indicated that the sample containing 20% glycerin reached the optimum plasticization point, exhibiting balanced mechanical strength and high flexibility, with superior elongation. Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) analysis confirmed the effectiveness of intermolecular interactions through hydrogen bonding between the starch and the plasticizer. Additionally, soil burial tests and phytotoxicity assays confirmed the rapid decomposition of the film without environmental damage, validating the material's sustainability. These results demonstrate that cassava starch (*Manihot esculenta*) from Santana do Maranhão constitutes a viable polymer matrix for the production of bioplastics with potential sustainable applications consistent with the principles of Green Chemistry. The controlled variation of glycerin concentration proved to be decisive for the final properties of the material, evidencing that adequate plasticization is a critical factor for the mechanical and functional performance of the produced films.

**Keywords:** Biopolymers; Cassava Starch; Green Chemistry; Sustainability.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Estruturas moleculares da amilose e amilopectina .....	17
<b>Figura 2:</b> Mapa de localização da área de coleta em Santana do Maranhão.....	18
<b>Figura 3:</b> Raízes de mandioca ( <i>Manihot esculenta</i> ) .....	21
<b>Figura 4:</b> Amido de mandioca purificado .....	21
<b>Figura 5:</b> Pesagem do amido de mandioca .....	22
<b>Figura 6:</b> Monitoramento do pH da solução .....	23
<b>Figura 7:</b> Processo de gelatinização do amido .....	24
<b>Figura 8:</b> Amostras de bioplástico em processo de cura .....	24
<b>Figura 9:</b> Espectrômetro FTIR Shimadzu IR-Prestige-21 .....	25
<b>Figura 10:</b> Acessório de refletância total atenuada (ATR) .....	25
<b>Figura 11:</b> Equipamento de tração e elasticidade (BioPDI) .....	26
<b>Figura 12:</b> Ensaio de degradação em meio aquoso .....	26
<b>Figura 13:</b> Ensaio de biodegradação por enterrio em solo .....	27
<b>Figura 14:</b> Bioensaio de fitotoxicidade com sementes de alface .....	27
<b>Figura 15:</b> Aspectos visuais dos filmes bioplásticos .....	29
<b>Figura 16:</b> Fratura da amostra F10 .....	29
<b>Figura 17:</b> Flexibilidade da amostra F20 .....	30
<b>Figura 18:</b> Comparação visual entre a amostra Branco e F20 .....	31
<b>Figura 19:</b> Curvas de tensão-deformação dos bioplásticos .....	32
<b>Figura 20:</b> Desenvolvimento de plântulas de alface ( <i>Lactuca sativa</i> ) .....	42

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Formulações dos bioplásticos .....	22
<b>Tabela 2:</b> Resultados do ensaio de tração .....	32
<b>Tabela 3:</b> Principais bandas de absorção no FTIR .....	35
<b>Tabela 4:</b> Características espectrais das formulações .....	36
<b>Tabela 5:</b> Solubilidade e perda de massa em água .....	39
<b>Tabela 6:</b> Perda de massa no ensaio de biodegradação em solo .....	40
<b>Tabela 7:</b> Síntese comparativa do desempenho das formulações .....	41

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b>	
.....	<b>16</b>
2.1 Biopolímeros e a Sustentabilidade dos Materiais na Química Verde.....	16
2.2 Estrutura Molecular do Amido e o Potencial da Mandioca.....	16
2.3 Santana do Maranhão e o Povoado São Gonçalo.....	17
2.4 Dinâmicas de Plastificação, Propriedades Físico-Químicas e Mecanismo de Biodegradação do Amido Termoplástico.....	19
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>20</b>
3.1 Materiais, Reagentes e Equipamentos.....	20
3.2 Obtenção e Processamento da Matéria-Prima (Amido da Mandioca).....	20
3.3 Produção dos Bioplásticos por Moldagem por Evaporação (Casting).....	22
3.4 Caracterização dos Filmes.....	24
3.4.1 Espectroscopia no Infravermelho (FTIR).....	24
3.4.2 Análise Mecânica de Tração e Elasticidade.....	25
3.4.2 Ensaio de Biodegradação e Estabilidade.....	26
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>27</b>
4.1 Aspectos Visuais e Morfológicos dos Bioplásticos.....	28
4.1.1 Análise da Amostra Controle (Branco).....	30
4.2 Interpretação Espectroscópica (FTIR) e Interações Moleculares.....	31
4.2.1 Análise Comparativa dos Espectros de FTIR.....	31
4.2.2 Efeitos da Plastificação.....	33
4.2.3 Estudo de Comportamento dinâmico dos filmes.....	34
4.3 Espessura e Propriedades Mecânicas.....	34
4.3.2 Propriedades Mecânicas.....	35
4.3.3 Estudo do Comportamento dinâmico dos filmes.....	37
4.4 Identificação da Formulação Otimizada: O Papel da F20.....	39
4.5 Monitoramento da Biodegradabilidade e Estabilidade Hidrolítica.....	41
4.5.1 Ensaio de Degradação em Meio Aquoso.....	41
4.5.2 Ensaio de Biodegradação por Enterramento Direto em Solo.....	42
4.6 Bioensaio de Fitotoxicidade com Sementes de Alface (Lactuca sativa).....	43
4.7 Síntese Comparativa: Por Que F20 é a Formulação Ótima.....	44

<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>45</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>46</b>
<b>APÊNDICE.....</b>	<b>48</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A contemporaneidade é marcada por uma dependência estrutural de polímeros de origem petroquímica, cuja onipresença na vida cotidiana contrasta com a severidade de sua persistência ambiental. O descarte inadequado desses materiais representa um dos maiores desafios ecológicos do século XXI, uma vez que a maioria dos plásticos convencionais não é biodegradável, permanecendo nos ecossistemas por centenas de anos. Segundo Derraik (2002), em seu estudo seminal sobre a poluição marinha, a fragmentação desses polímeros resulta na formação de microplásticos, que contaminam cadeias tróficas e causam danos irreversíveis à biodiversidade global (DERRAIK, 2002). Diante desse cenário crítico, a transição para uma economia circular e sustentável exige a substituição urgente de matrizes fósseis por polímeros biodegradáveis provenientes de fontes renováveis.

No contexto da Química Verde, conforme preconizado por Anastas e Warner (1998), o desenvolvimento de novos materiais deve priorizar o uso de matérias-primas renováveis e a redução ou eliminação de substâncias tóxicas em seus processos de síntese (ANASTAS; WARNER, 1998). Os biopolímeros surgem como a alternativa mais viável para mitigar os impactos ambientais, pois, além de possuírem um ciclo de vida fechado, podem apresentar propriedades funcionais competitivas quando comparados aos plásticos convencionais, desde que devidamente modificados quimicamente para superar limitações como a fragilidade e a sensibilidade à umidade.

Entre as fontes renováveis, o amido destaca-se pela abundância, baixo custo e biodegradabilidade inerente. Como aponta Mali, Grossmann e Yamashita (2010), o amido é um polissacarídeo versátil composto por amilose e amilopectina, capaz de formar filmes termoplásticos sob condições controladas de temperatura e plastificação (MALI et al., 2010). A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) é uma das principais fontes de amido nos países tropicais, apresentando vantagens competitivas como menor temperatura de gelatinização e maior transparência dos filmes produzidos (SOUSA et al., 2010). Essa característica é essencial para a aceitação comercial de bioplásticos, onde a estética e a clareza visual são requisitos fundamentais na indústria de embalagens.

No estado do Maranhão, a mandiocultura é uma atividade de relevância socioeconômica profunda, especialmente em municípios como Santana do Maranhão. O aproveitamento do amido extraído da produção local para o desenvolvimento de materiais de alto valor agregado representa uma oportunidade estratégica de fortalecimento da bioeconomia regional. Integrar o conhecimento científico às cadeias produtivas locais é, segundo Bursztyn

(2001), um passo fundamental para o desenvolvimento sustentável de comunidades tradicionais, permitindo que o excedente agrícola seja transformado em tecnologia de ponta (BURSZTYN, 2001).

Esta pesquisa fundamenta-se na hipótese de que a otimização da concentração de glicerina, aliada ao uso de um catalisador ácido (HCl) para auxiliar na desestruturação molecular do grânulo de amido, pode gerar um bioplástico com propriedades físicas, mecânicas e ambientais otimizadas. A lacuna científica explorada reside na caracterização detalhada das amostras variando entre 10% e 35% de plastificante. Diante disso, **este trabalho tem como objetivo principal produzir, otimizar e caracterizar bioplásticos a partir do amido de mandioca proveniente de Santana do Maranhão, avaliando a influência da concentração de glicerina nas propriedades físico-químicas, mecânicas e no potencial de biodegradação ambiental.** Para alcançar tal objetivo, foram traçados os seguintes **objetivos específicos:**

- **Produzir filmes bioplásticos a partir do amido de mandioca, variando a concentração de plastificante (10% a 35%) e utilizando catalisador ácido;**
- **Analisar as interações moleculares e os grupos funcionais da matriz polimérica via Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR);**
- **Avaliar as propriedades mecânicas de tração e elasticidade dos filmes produzidos em função do teor de glicerina;**
- **Monitorar a taxa de biodegradação e a estabilidade hidrolítica do material em meio aquoso e por enterrio direto em solo orgânico;**
- **Verificar a segurança ambiental do bioplástico através de bioensaios de fitotoxicidade com sementes de alface (*Lactuca sativa*).**

A estrutura desta monografia foi organizada em cinco capítulos. O primeiro compreende esta introdução, que contextualiza o problema e apresenta a relevância e os objetivos da pesquisa. O segundo capítulo aborda o referencial teórico, discutindo a química dos biopolímeros, as particularidades do amido de mandioca e os princípios da plastificação. O terceiro capítulo detalha a metodologia aplicada, descrevendo os processos de síntese e as técnicas de caracterização. O quarto capítulo dedica-se à apresentação e discussão dos resultados, com foco nas análises de FTIR, propriedades mecânicas e biodegradação. Por fim, o quinto capítulo encerra o trabalho com a conclusão e sugestões para pesquisas futuras.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Biopolímeros e a Sustentabilidade dos Materiais na Química Verde

A crise ambiental contemporânea, catalisada pelo descarte indiscriminado de polímeros de matriz fóssil, impõe à comunidade científica a urgência de prospectar materiais que harmonizem funcionalidade técnica e preservação ecológica. Conforme discute Derraik (2002), a persistência de plásticos convencionais no meio ambiente não é apenas um problema estético, mas uma ameaça sistêmica que resulta na contaminação de solos e oceanos por microplásticos. Diante dessa realidade, a transição para uma economia circular fundamenta-se na substituição de resinas petroquímicas por polímeros biodegradáveis, que possuem a capacidade intrínseca de reintegração aos ciclos biogeoquímicos em escalas de tempo significativamente menores.

A fundamentação deste estudo está intrinsecamente ligada aos preceitos da Química Verde, cujos doze princípios, formulados por Anastas e Warner (1998), preconizam o uso de matérias-primas renováveis, a economia de átomos e o design de produtos seguros que se degradem após o uso. Ao optar pelo amido como matriz polimérica, este trabalho alinha-se à busca por processos de síntese que minimizem a geração de subprodutos tóxicos. Segundo Mali et al. (2010), biopolímeros são materiais que, sob a ação de microrganismos e condições ambientais específicas, decompõem-se em CO<sub>2</sub>, água e biomassa. Diferente dos plásticos oxodegradáveis<sup>1</sup>, que apenas se fragmentam em partículas menores, os biopolímeros de fontes renováveis oferecem uma solução real para a crise global de resíduos sólidos urbanos e industriais.

### 2.2 A Estrutura Molecular do Amido e o Potencial da Mandioca

O amido é um carboidrato complexo que se apresenta como a principal reserva energética de vegetais superiores, sendo organizado em grânulos semicristalinos de morfologia variada. Quimicamente, ele é um homopolímero de glicose<sup>2</sup> constituído por duas macromoléculas distintas: a amilose e a amilopectina. A amilose é uma cadeia essencialmente linear composta por unidades de D-glicose unidas por ligações  $\alpha$ -1,4, enquanto a amilopectina possui uma estrutura altamente ramificada com pontos de ligação  $\alpha$ -1,6 a cada 24 a 30

---

<sup>1</sup>

#### **Plásticos oxodegradáveis**

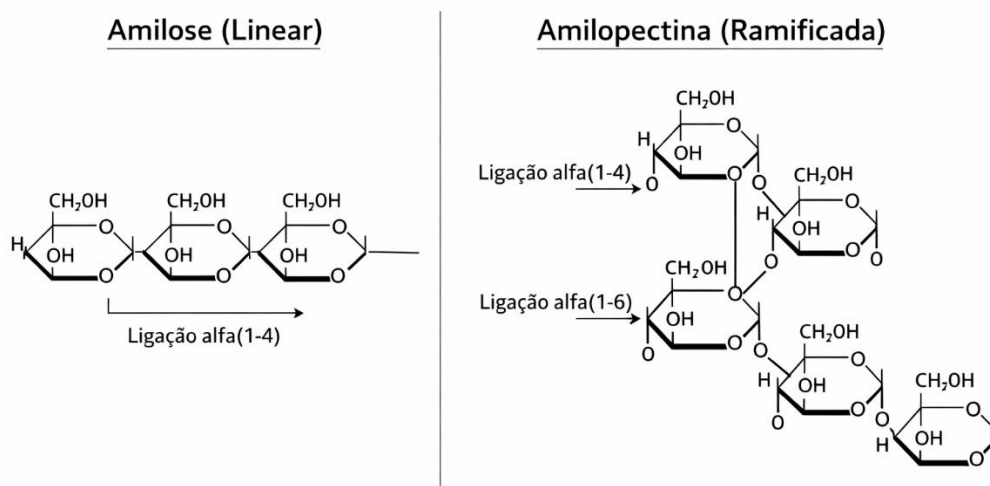
são materiais plásticos que se fragmentam rapidamente quando expostos a condições ambientais específicas, com o luz solar, calor e oxigênio. Eles contêm aditivos que aceleram a oxidação e a degradação, permitindo que se decompõem mais rapidamente do que os plásticos convencionais.

<sup>2</sup> **homopolímeros de glicose** são polissacarídeos compostos por unidades de glicose, que são açúcares simples.

unidades de glicose.

A diferenciação estrutural entre os dois principais polímeros constituintes do amido é fundamental para compreender as propriedades físico-químicas dos bioplásticos resultantes. Conforme ilustrado na Figura 1, enquanto a amilose se organiza em cadeias essencialmente lineares que favorecem a formação de filmes mais rígidos e resistentes, a amilopectina apresenta uma arquitetura ramificada que interfere na cristalinidade e na retrogradação do material. Essa distinção morfológica, detalhada a seguir, é o que determina a viabilidade técnica do amido de mandioca como matriz polimérica sustentável.

**Figura 1:** Estruturas moleculares da amilose (linear) e amilopectina (ramificada).



Fonte: Autoria própria (2026).

De acordo com Leonel e Cereda (2012), a proporção entre essas frações é o que determina as propriedades reológicas<sup>3</sup> e a capacidade de formação de filmes (filmo-gênese). O amido de mandioca (*Manihot esculenta*) destaca-se como uma fonte superior para a engenharia de materiais nos trópicos. Ao contrário do milho ou da batata, o amido de mandioca apresenta grânulos menores e uma temperatura de gelatinização mais baixa (entre 60°C e 70°C), o que reduz significativamente o aporte energético necessário durante o processamento térmico (SOUSA et al., 2010). Além disso, os filmes produzidos a partir desta matriz apresentam excelente clareza óptica e transparência, características fundamentais para a indústria de embalagens.

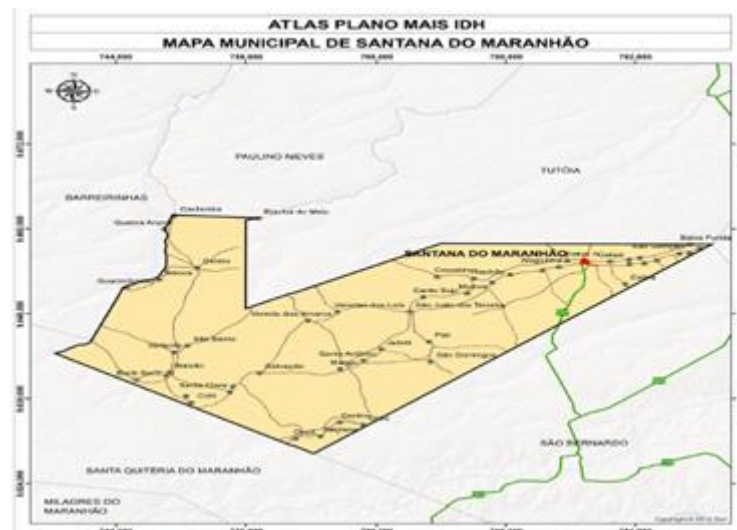
### 2.3 Santana do Maranhão e o Povoado São Gonçalo

<sup>3</sup> **Propriedades reológicas** referem-se ao estudo do fluxo e da deformação da matéria.

A contextualização geográfica e socioeconômica deste estudo é premissa fundamental para compreender a relevância da matéria-prima utilizada. Santana do Maranhão, situada na mesorregião do Leste Maranhense, possui características edafoclimáticas singulares<sup>4</sup> que favorecem a mandiocultura de alta performance. Com uma extensão territorial de 1.095 km<sup>2</sup> e uma população de 11.661 habitantes (IBGE, 2022), o município enfrenta desafios socioeconômicos que reforçam a urgência de projetos voltados à bioeconomia local e à valorização da agricultura familiar.

A organização territorial do município e a distribuição de suas principais comunidades rurais podem ser observadas na **Figura 02**, que apresenta o mapa político de Santana do Maranhão com a delimitação de seus povoados, evidenciando a localização estratégica das áreas de produção agrícola.

**Figura 02:** Mapa do municipal de Santana do Maranhão



Fonte: IMESC (2015).

Nesse cenário, o Povoado São Gonçalo (03°07'25,21'' S; 42°19'33,27'' W) emerge como um polo de excelência agrícola. O solo da localidade, registrado no Cadastro Ambiental Rural (CAR: MA-2110237-AE6D.16F7.150E.4398.A095. DAFD.48AB.BFA8), apresenta propriedades físico-químicas que resultam em raízes com elevado teor de matéria seca. A excelência técnica deste insumo é ratificada por sua validação industrial: a companhia Ambev selecionou a mandioca desta região como componente estratégico para a produção de sua linha

4

**edafoclimáticas singulares** são condições ambientais específicas em que o solo (edáfico) e o clima interagem de maneira única, influenciando fortemente a agricultura, a vegetação e a produtividade de determinadas regiões.

de cervejas regionais, como a Magnífica (AMBEV, 2020). Tal escolha fundamenta-se na pureza e na estabilidade das cadeias de amilose e amilopectina presentes nas variedades locais, características essenciais para processos de alta eficiência fermentativa e estrutural.

Para a presente pesquisa, a utilização dessa matriz orgânica representa um diferencial competitivo. Embora a estrutura molecular básica do amido seja universal, a proporção entre suas frações e o arranjo das cadeias poliméricas são influenciados diretamente pelas condições edafoclimáticas (solo e clima) e pelo manejo da cultura (LEONEL; CEREDA, 2012). No caso de Santana do Maranhão, a combinação de solos que favorecem o acúmulo de amido com baixa concentração de impurezas (proteínas e lipídios) assegura a coesão molecular necessária na síntese de um bioplástico que equilibre resistência mecânica e biodegradabilidade acelerada.

#### **2.4 Dinâmicas de Plastificação, Propriedades Físico-Químicas e Mecanismo de Biodegradação do Amido Termoplástico**

A transformação do amido granular em um material termoplástico flexível (TPS) requer o uso de plastificantes e o controle do processo de gelatinização. A **glicerina** (glicerol), um agente de baixo peso molecular, insere-se entre as cadeias de amilose e amilopectina, reduzindo as forças intermoleculares e permitindo que as cadeias deslizem umas sobre as outras. Esse processo aumenta o volume livre do sistema, resultando em um material com maior flexibilidade e menor temperatura de transição vítrea (Tg) (VIEIRA et al., 2011). A escolha da glicerina em detrimento de outros plastificantes, como o sorbitol ou o polietilenoglicol (PEG), justifica-se por sua alta disponibilidade, baixo custo, não toxicidade e por ser um subproduto da indústria de biodiesel, o que confere ao bioplástico um perfil de sustentabilidade superior (LIANG; LUDESCHER, 2015).

Adicionalmente, o uso de um catalisador ácido, como o Ácido Clorídrico (HCl), desempenha um papel crucial ao promover uma hidrólise ácida parcial, que auxilia no rompimento das pontes de hidrogênio intramoleculares e intermoleculares. Isso facilita a penetração das moléculas de água e do plastificante no interior do grânulo, processo essencial para a gelatinização, que ocorre quando o amido é aquecido em excesso de água, levando à formação de uma matriz polimérica contínua e homogênea após a secagem (LIU et al., 2013).

A principal vantagem dos biopolímeros de amido reside em seu mecanismo de **biodegradação**, que é a quebra das cadeias poliméricas por ação enzimática de microrganismos. O amido é facilmente reconhecido por enzimas como a amilase, secretada por

bactérias e fungos. O processo se inicia com a hidrólise enzimática das ligações glicosídicas, que resulta na formação de oligossacarídeos, posteriormente metabolizados pelos microrganismos em dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), água (H<sub>2</sub>O) e biomassa (MALI et al., 2010).

A caracterização por Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) é fundamental para a análise de biopolímeros, pois permite monitorar as interações moleculares e a eficácia da plastificação (MALI et al., 2010). A banda de estiramento O-H (~3300 cm<sup>-1</sup>) é sensível à formação de novas pontes de hidrogênio entre o amido e o plastificante, enquanto a região de *fingerprint* (~1020 cm<sup>-1</sup>) reflete a desestruturação da ordem cristalina do amido granular (VIEIRA et al., 2011). Concomitantemente, a amorfização da matriz e o aumento da mobilidade das cadeias poliméricas, promovidos pela inserção da glicerina, são os fatores determinantes para a redução da Tensão Máxima e o aumento da capacidade de Alongamento do material (LOURDIN et al., 1997; YAMASHITA; GROSSMANN, 2004). O plastificante, ao aumentar o volume livre entre as macromoléculas, reduz as forças intermoleculares, resultando em um material com propriedades mecânicas otimizadas para aplicações em embalagens sustentáveis (SOUSA et al., 2010).

### 3 METODOLOGIA

A pesquisa estudo seguiu um delineamento experimental, estruturado em etapas sequenciais que visaram a síntese, otimização e caracterização de bioplásticos a partir do amido de mandioca. Os procedimentos foram conduzidos em diferentes unidades da Universidade Federal do Maranhão (UFMA), refletindo a natureza multidisciplinar da pesquisa. A obtenção da matéria-prima e a síntese dos bioplásticos foram realizadas no Laboratório de Química do Campus São Bernardo. As análises de caracterização foram distribuídas entre o Laboratório de Química Analítica e o Laboratório de Física do Campus São Luís (CCET). Por fim, os ensaios de biodegradação em ambiente simulado e natural foram conduzidos em ambiente doméstico, seguindo as diretrizes de boas práticas de laboratório.

#### 3.1 Materiais, Reagentes e Equipamentos

Para a realização dos experimentos, foram utilizados os seguintes materiais e reagentes:

- **Amido de Mandioca:** Proveniente de Santana do Maranhão, matéria-prima de grau industrial.
- **Plastificante:** Glicerina bi-destilada (pureza > 99%).
- **Catalisador Ácido:** Solução de Ácido Clorídrico (HCl) 0,1 mol/L.

•**Solvente:** Água destilada.

•**Insumos Biológicos:** Sementes de alface (*Lactuca sativa*) e solo orgânico.

As vidrarias e equipamentos de laboratório incluíram béqueres, provetas, balança semianalítica, chapa aquecedora com agitação magnética, estufa com circulação de ar e um espectrômetro FTIR (Shimadzu IR-Prestige-21) com acessório de refletância total atenuada (ATR).

Tratamento de Dados e Cálculos: A massa de glicerina foi calculada pela fórmula:  $m_g = m_a \times (\sum \%C / 100)$ . A resistência mecânica foi calculada pela Tensão de Rutura ( $\Sigma = F / A_i$ ). A biodegradação foi calculada pela variação gravimétrica:  $\%PM = [(M_i - M_f) / M_i] \times 100$ , para confirmar os índices.

### 3.2 Obtenção e Processamento da Matéria-Prima (Amido de Mandioca)

A escolha da mandioca (*Manihot esculenta*) como fonte de amido justifica-se pela sua abundância regional e excelentes propriedades filmogênicas e baixo custo. As raízes, coletadas no Povoado São Gonçalo (Figura 3), passaram por um processo de beneficiamento por via úmida. Após a lavagem e descascamento, o material foi triturado para a liberação dos grânulos de amido, seguido de filtragem e decantação por 24 horas.

**Figura 3:** Raízes de mandioca (*Manihot esculenta*)



Fonte: Fonte: Autoria própria (2026).

O amido resultante foi submetido a lavagens sucessivas para purificação e, posteriormente, seco em estufa a 40°C por 24 horas. O produto final, um pó fino e branco (Figura 4), foi armazenado em condições controladas de umidade até o momento da síntese dos

bioplásticos.

**Figura 04:** Amido purificado e seco



Fonte: Autoria própria (2026).

### 3.3 Produção dos Bioplásticos por Moldagem por Evaporação (Casting)

Os filmes bioplásticos foram produzidos pela técnica de casting, variando-se a concentração de glicerina. Foram preparadas sete formulações distintas, incluindo um controle (Branco, 0% de glicerina) e seis amostras com concentrações de glicerina de 10%, 15%, 20%, 25%, 30% e 35% em relação à massa de amido, conforme detalhado na Tabela 1: Formulações dos Bioplásticos.

**Tabela 1:** Formulações dos Bioplásticos em Proporções Percentuais (Base: 100 mL).

<b>Amostra</b>	<b>Glicerina (%m/m amido)</b>	<b>Amido (%m/v)</b>	<b>Glicerina (% v/v)</b>	<b>Água (% v/v)</b>	<b>HCl 0,1M (%v/v)</b>	<b>Total (%)</b>
<b>Branco</b>	0%	13,50%	0,00%	86,50%	0,00%	100,00%
<b>F10</b>	10%	13,42%	1,07%	85,01%	0,50%	100,00%
<b>F15</b>	15%	13,34%	1,60%	84,56%	0,50%	100,00%
<b>F20</b>	20%	13,27%	2,12%	84,11%	0,50%	100,00%
<b>F25</b>	25%	13,20%	2,64%	83,66%	0,50%	100,00%
<b>F30</b>	30%	13,13%	3,15%	83,22%	0,50%	100,00%
<b>F35</b>	35%	13,06%	3,66%	82,78%	0,50%	100,00%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A técnica de casting foi empregada para a confecção dos filmes, permitindo um controle preciso sobre a espessura e a homogeneidade das amostras. O processo iniciou-se com a pesagem do amido (Figura 5) e sua dispersão em água destilada. Sob agitação constante, adicionou-se o catalisador ácido até atingir o pH 3,0, monitorado rigorosamente (Figura 6). Esta etapa é fundamental, pois o meio ácido atua como catalisador, promovendo a hidrólise parcial das cadeias de amilose e amilopectina, facilitando a desestruturação dos grânulos de amido. Como pode ser observado na Figura, o monitoramento do pH foi realizado rigorosamente para garantir a reprodutibilidade do material.

**Figura 5:** Pesagem do amido



Fonte: Autoria própria (2026).

**Figura 6:** Monitoramento do pH



Fonte: Autoria própria (2026). A mistura foi aquecida na chapa aquecedora a

aproximadamente 85°C por 15 minutos, estágio em que ocorre a gelatinização a transição da suspensão leitosa para um gel translúcido e viscoso (Figura 7). Após a desaeração para eliminação de microbolhas, a solução foi vertida em placas de Petri e levada à estufa a 40°C por 48 horas para o processo de cura (Figura 8). Foram preparadas sete formulações, variando a concentração de glicerina de 0% (Branco) a 35% (F35). Após a secagem, os filmes foram cuidadosamente removidos e armazenados para caracterização.

**Figura 7:** Processo de gelatinização



Fonte: Autoria própria (2026).

**Figura 8:** Amostras em cura



Fonte: Autoria própria (2026).

### 3.4 Caracterização dos Filmes

#### 3.4.1 Espectroscopia no Infravermelho (FTIR)

Para compreender as interações moleculares entre o amido e a glicerina, utilizou-se o espectrômetro FTIR Shimadzu (Figura 9). As amostras foram posicionadas no acessório de Refletância Total Atenuada (ATR) (Figura 10), permitindo a identificação dos grupos funcionais e a confirmação das ligações de hidrogênio formadas durante a plastificação.

**Figura 9:** Espectrômetro FTIR



Fonte: Autoria própria (2026).

**Figura 10:** Acessório ATR



Fonte: Autoria própria (2026).

### 3.4.2 Análise Mecânica de Tração e Elasticidade

A avaliação das propriedades mecânicas é fundamental para determinar a viabilidade de aplicação dos bioplásticos em embalagens. Os ensaios foram conduzidos em uma Máquina Universal de Ensaio (BioPDI), conforme demonstrado na Figura 11 (Equipamento de tração e elasticidade). Este equipamento permitiu a aplicação de forças controladas sobre as amostras, seguindo os parâmetros da norma ASTM D882-12. Através desta análise, foram obtidos dados cruciais como a tensão máxima suportada e a capacidade de alongamento antes da ruptura, permitindo correlacionar a influência do teor de glicerina na flexibilidade do material.

**Figura 11:** Equipamento de tração e elasticidade (BioPDI)



Fonte: Autoria própria (2026).

### 3.4.3 Ensaios de Biodegradação e Estabilidade

A sustentabilidade ambiental foi verificada através de três frentes:

1. Estabilidade Hidrolítica: Amostras padronizadas, cortadas em quadrados de 5,0 cm x 5,0 cm, foram imersas em água destilada. A perda de massa foi monitorada em intervalos de tempo, com o ensaio finalizando após 48 horas, para avaliar a solubilidade e a estabilidade do material em meio aquoso (Figura 12).

**Figura 12:** Degradação em meio aquoso



Fonte: Autoria própria (2026).

2. Biodegradação em Solo: As amostras, também cortadas em quadrados de 5,0 cm x 5,0 cm, foram enterradas em solo orgânico com umidade controlada. A perda de massa foi medida ao longo de 30 dias, permitindo avaliar a taxa de decomposição do material por microrganismos (Figura 13).

**Figura 13:** Ensaio de enterrio



Fonte: Autoria própria (2026).

**Bioensaio de Fitotoxicidade:** O potencial fitotóxico do material foi avaliado através de um bioensaio com sementes de alface (*Lactuca sativa*). O desenvolvimento das plântulas foi monitorado por 7 dias (período padrão para este tipo de bioensaio), comparando-se o crescimento em contato com o lixiviado do bioplástico com um grupo controle, (Figura 14).

**Figura 14:** Bioensaio de Fitotoxicidade



Fonte: Autoria própria (2026).

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da síntese e caracterização dos bioplásticos produzidos com amido de mandioca proveniente de Santana do Maranhão. A análise dos dados busca correlacionar a influência da concentração de glicerina e do tratamento ácido com as propriedades físico-químicas, mecânicas e ambientais do material, fundamentando-se no referencial teórico e em estudos correlatos da literatura científica contemporânea sobre polímeros biodegradáveis.

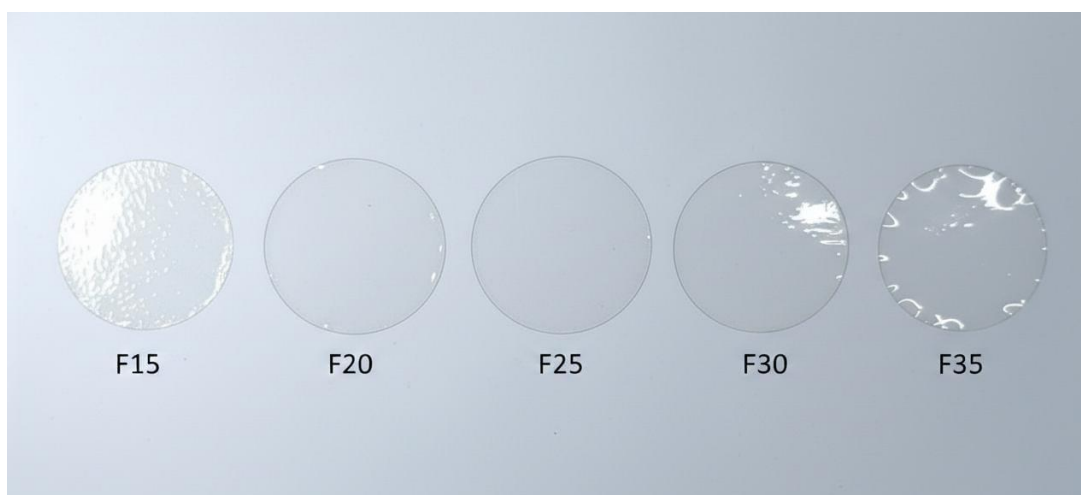
### **4.1 Aspectos Visuais e Morfológicos dos Bioplásticos**

A análise macroscópica dos filmes bioplásticos, realizada por meio da observação visual direta, revelou que o método de moldagem por evaporação (casting) foi eficaz na obtenção de matrizes contínuas, homogêneas e com excelente integridade estrutural. A inspeção visual permitiu identificar que a transparência e o brilho das amostras foram preservados, características intrínsecas do amido de mandioca que indicam uma boa dispersão dos componentes durante a síntese. Segundo Mali et al. (2010), a transparência é um indicador qualitativo da homogeneidade da matriz polimérica e da eficácia da gelatinização.

Um diferencial técnico observado foi a ausência de grânulos não gelatinizados ou bolhas de ar, o que ratifica a eficiência do tratamento térmico e da agitação magnética adotados. Além disso, o tempo de descanso da solução antes da vertagem nas placas de Petri

foi um fator determinante para a eliminação de microbolhas incorporadas durante a agitação. Esse período de repouso permite a desaeração natural da suspensão, evitando que o aprisionamento de gases comprometa a continuidade da matriz e a resistência mecânica final do material (Müller et al., 2008). A utilização do Ácido Clorídrico (HCl) como catalisador refletiu-se na obtenção de filmes visualmente mais límpidos e uniformes. O HCl promove a hidrólise ácida parcial das cadeias de amilopectina, facilitando a desestruturação dos grânulos de amido e resultando em uma suspensão mais fluida e filmes com maior transparência, conforme pode ser visualizado na Figura 15.

**Figura 15:** Aspecto visual e transparência dos filmes bioplásticos após o processo de cura. (F15 a F35)



Fonte: Autoria própria (2026).

A variação na concentração de glicerina exerceu um impacto direto e visível nas características físicas das amostras. As formulações com menores teores de plastificante (F10 e F15) resultaram em filmes mais rígidos, com textura vítrea e alta tendência à fratura. A formulação F10 (10% de glicerina) apresentou uma fragilidade crítica, sofrendo rupturas imediatas ainda durante o processo de remoção da placa de Petri, como evidenciado na Figura 16. Esse fenômeno ocorre porque baixas concentrações de plastificante são insuficientes para reduzir as forças intermoleculares de hidrogênio entre as cadeias de amido, resultando em um material quebradiço (Lourdin et al., 1997).

**Figura 16:** Registro da fragilidade e fratura da amostra F10



Fonte: Autoria própria (2026).

Em contrapartida, as amostras com teores intermediários e elevados (F20 a F35) demonstraram uma evolução notável na maleabilidade e no brilho superficial. A amostra F20, em particular, destacou-se por apresentar o melhor equilíbrio visual, exibindo uma superfície lisa e com uma flexibilidade que permite a manipulação sem rupturas, como ilustra a Figura 17. Para as propriedades de maleabilidade e brilho, nas condições de produção realizadas, a concentração de 20% de glicerina mostrou-se como o ponto ótimo de plastificação.

**Figura 17:** Amostra otimizada (F20).

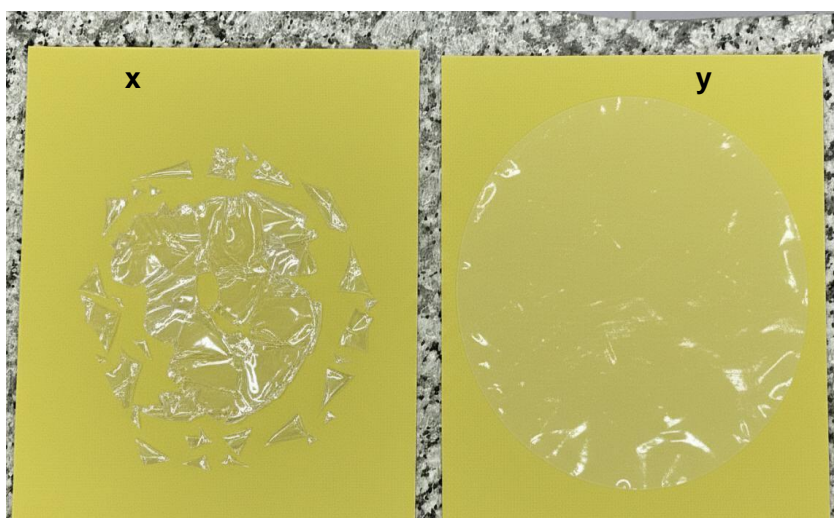


Fonte: Autoria própria (2026).

#### 4.1.1 Análise da Amostra Controle (Branco)

A análise da amostra Branco (0% de glicerina) é fundamental para compreender a dinâmica estrutural deste trabalho. Embora a gelatinização tenha ocorrido, o filme resultante apresentou opacidade acentuada e superfície irregular, com tendência ao encanoamento durante a secagem, fenômeno observado na Figura 18.

**Figura 18:**Comparativo visual entre a amostra Branco (esquerda x ) e a amostra F20 (direita y)



Fonte: Autoria própria (2026).

A fragilidade extrema da amostra Branco é um reflexo direto da forte rede de ligações de hidrogênio que se restabelece entre as cadeias de amido sem a presença do plastificante (Mali et al., 2010). Ao toque, o filme Branco assemelha-se a uma película vítrea que se estilhaça sob a mínima pressão, o que confirma, por contraste, o sucesso da incorporação da glicerina nas demais amostras para conferir as características plásticas desejadas. A escolha da glicerina como plastificante justifica-se por sua alta afinidade com o amido e sua capacidade de se inserir entre as cadeias poliméricas, aumentando o volume livre e a mobilidade molecular (Vieira et al., 2011).

#### 4.2 Interpretação Espectroscópica (FTIR) e Interações Moleculares

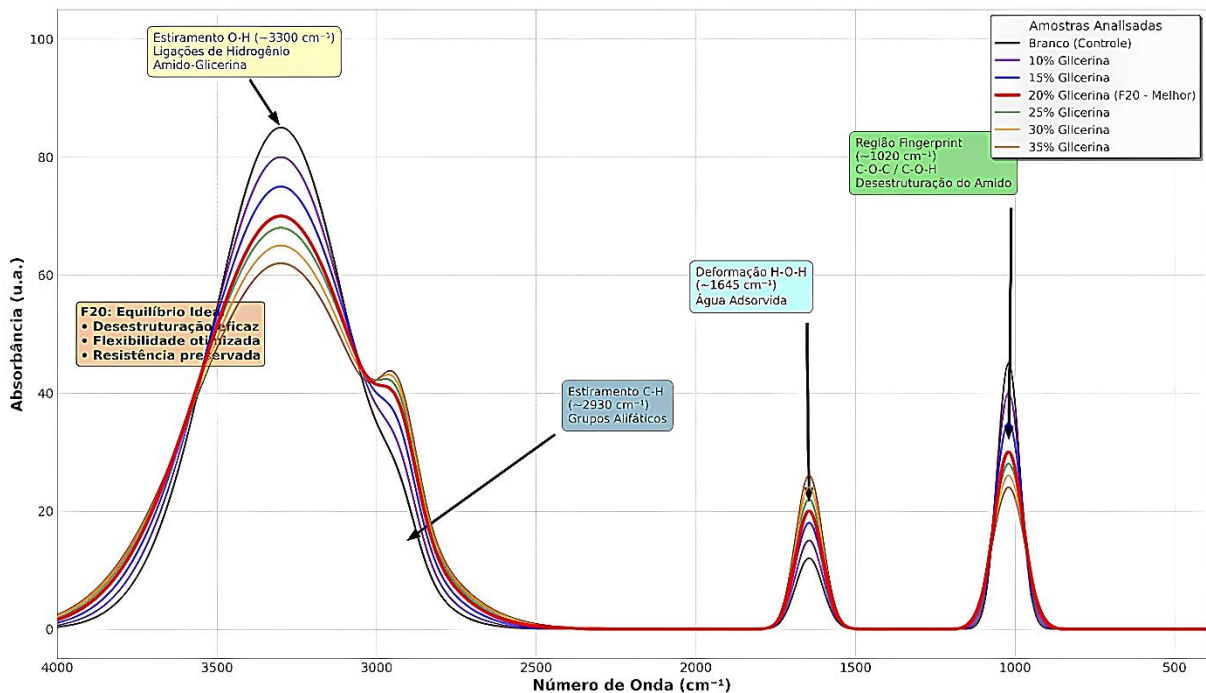
A análise por Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) foi conduzida para elucidar as transformações moleculares nos filmes de bioplástico resultantes da adição de glicerina e de ácido clorídrico (HCl). A comparação dos espectros das diferentes

concentrações com a amostra Branco permite avaliar a eficácia da plastificação e da interação molecular.

#### 4.2.1 Análise Comparativa dos Espectros de FTIR

Os espectros de FTIR (apresentados no Gráfico 1) exibem bandas de absorção características de polissacarídeos. A sobreposição dos espectros facilita a visualização das mudanças estruturais progressivas. A formulação F20 está destacada, evidenciando o equilíbrio ideal entre desestruturação e plastificação. As principais bandas identificadas e suas atribuições, baseadas na literatura de Mali et al. (2010) e Vieira et al. (2011), são detalhadas na Tabela 2.

**Gráfico 1:** Espectros de FTIR comparativos das sete formulações de bioplástico de amido de mandioca.



Fonte: Autoria própria (2026).

**Tabela 2:** Principais bandas de absorção identificadas nos espectros de FTIR

Número de Onda (cm <sup>-1</sup> )	Atribuição Vibracional	Significado Químico e Estrutural

~3300	Estiramento O-H	Corresponde aos grupos hidroxila presentes no amido, na glicerina e na água. A banda larga e intensa é um indicativo de fortes ligações de hidrogênio inter e intramoleculares na matriz polimérica.
~2930	Estiramento C-H	Refere-se aos grupos alifáticos (CH e CH <sub>2</sub> ) constituintes das cadeias de amido e glicerina.
~1645	Deformação Angular H-O-H	Atribuída à presença de água adsorvida na matriz do bioplástico, uma característica comum em polímeros hidrofílicos.
~1020	Estiramento C-O-C e C-O-H	Localizada na "região de impressão digital" (fingerprint), é extremamente sensível à estrutura do amido, refletindo as vibrações dos anéis de glicose e das ligações glicosídicas.

Fonte: Dados da pesquisa (2026).

#### 4.2.2 Efeitos da Plastificação

A transição de um material rígido para um flexível depende da desestruturação da organização semicristalina do amido. O HCl atua como catalisador, promovendo a hidrólise ácida parcial das cadeias de amilose e amilopectina, o que reduz a cristalinidade e facilita a penetração da glicerina (Souza et al., 2012). A glicerina estabelece novas ligações de hidrogênio, substituindo as fortes interações amido-amido por interações amido-glicerina, que conferem maior mobilidade molecular.

Na região de estiramento O-H ( $\sim 3300 \text{ cm}^{-1}$ ), observa-se um alargamento progressivo e redução na intensidade com o aumento da glicerina, confirmando a interação efetiva com os grupos hidroxila do amido. Na região de "impressão digital" ( $\sim 1020 \text{ cm}^{-1}$ ), a amostra Branco exibe um pico mais definido, característico da estrutura cristalina. Com a adição de HCl e glicerina, este pico torna-se menos intenso e mais largo, evidenciando a amorfização da matriz, requisito para um bioplástico funcional (Müller et al., 2008).

#### Região de Estiramento O-H ( $\sim 3300 \text{ cm}^{-1}$ )

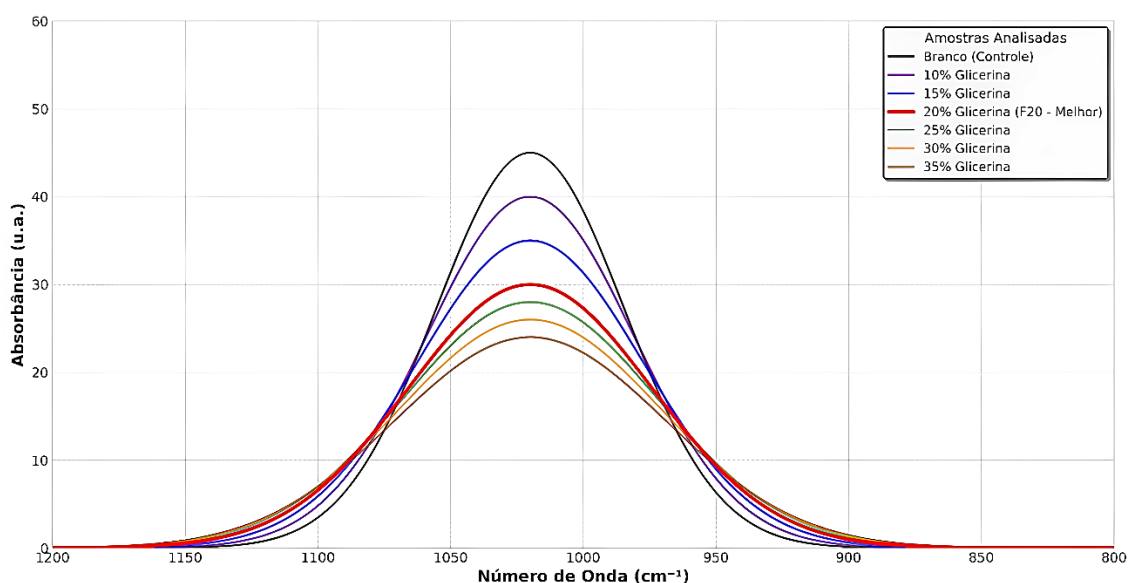
A análise da banda em  $\sim 3300 \text{ cm}^{-1}$  (Estiramento O-H) é fundamental para compreender as interações de hidrogênio na matriz polimérica. Com o aumento da concentração de glicerina, observa-se um alargamento progressivo e uma redução na intensidade desta banda. Isso indica uma mudança no ambiente das ligações de hidrogênio, confirmando que a glicerina está interagindo efetivamente com os grupos hidroxila do amido. A amostra Branco apresenta

a banda mais intensa e estreita, característica de uma rede de ligações de hidrogênio mais rígida e ordenada. À medida que a concentração de glicerina aumenta, a banda se torna mais larga e menos intensa, evidenciando a substituição das ligações amido-amido por ligações amido-glicerina, que são mais fracas e conferem maior mobilidade molecular.

### Região de Impressão Digital ( $\sim 1020 \text{ cm}^{-1}$ )

Na região de fingerprint ( $\sim 1020 \text{ cm}^{-1}$ ), a análise é igualmente crucial para avaliar o grau de desestruturação da matriz de amido. A amostra Branco exibe um pico mais definido e intenso nesta região, característico da estrutura mais ordenada e cristalina do amido granular. Com a adição de HCl e glicerina, este pico tende a se tornar menos intenso e mais largo, evidenciando a perda de cristalinidade e a amorfização da matriz, um pré-requisito para a obtenção de um bioplástico funcional. O Gráfico 3 apresenta um zoom na região de fingerprint ( $1200\text{-}800 \text{ cm}^{-1}$ ), permitindo uma visualização mais clara das diferenças entre as amostras.

**Gráfico 3:** Zoom na região de impressão digital ( $1200\text{-}800 \text{ cm}^{-1}$ ) dos espectros de FTIR.



Fonte: Dados da pesquisa (2026)

A progressiva redução da intensidade e o alargamento do pico em  $\sim 1020 \text{ cm}^{-1}$  evidenciam a desestruturação da cristalinidade do amido com o aumento da concentração de glicerina.

No Gráfico 3, é possível observar claramente a transição da estrutura cristalina (Branco) para uma estrutura progressivamente mais amorfa à medida que a concentração de glicerina aumenta. A amostra Branco apresenta o pico mais intenso e definido, enquanto as amostras com maiores concentrações de glicerina (30% e 35%) apresentam picos significativamente mais largos e menos intensos, indicando uma desestruturação mais pronunciada.

### 4.3 Espessura e Propriedades Mecânicas

Os ensaios de tração foram conduzidos em uma Máquina Universal de Ensaios BioPDI, seguindo as diretrizes da norma ASTM D882 (2018). O objetivo central desta análise foi investigar o efeito da variação da concentração de glicerina (15%, 20%, 25%, 30% e 35%) nas propriedades mecânicas do bioplástico. A glicerina, atuando como agente plastificante, desempenha um papel fundamental na modulação da resistência e da flexibilidade do material final. A padronização das dimensões das amostras é um requisito crítico para a validade dos ensaios mecânicos, uma vez que a espessura e a largura influenciam diretamente o cálculo da tensão suportada pelo material. Os dados dimensionais das amostras utilizadas nos ensaios estão consolidados na Tabela 3.

**Tabela 3:** Dimensões das Amostras de Bioplástico

Formulação	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento Inicial (mm)
<b>F15(15% Glicerina)</b>	0,4	2,4	82
<b>F20 (20% Glicerina)</b>	0,4	2,3	79
<b>F25 (25% Glicerina)</b>	0,5	2,5	82
<b>F30 (30% Glicerina)</b>	0,4	2,4	79
<b>F35 (35% Glicerina)</b>	0,5	2,4	82

Fonte: Dados da pesquisa (2026)

Observa-se que a espessura dos filmes variou entre 0,4 mm e 0,5 mm, uma faixa considerada adequada para filmes produzidos por casting. Essa pequena variação é inerente ao processo manual de espalhamento e secagem, mas foi devidamente considerada pelo software da máquina BioPDI para a normalização dos resultados de tensão.

As amostras com 0% (Branco) e 10% de glicerina não puderam ser submetidas aos ensaios mecânicos, o que constitui um importante resultado qualitativo. A amostra Branco demonstrou ser excessivamente frágil, enquanto a de 10% apresentou aspecto vítreo e ruptura

imediate ao ser manuseada. Essas observações estabelecem o limite inferior de plastificação necessário para a formação de um filme com integridade estrutural mínima. Conforme descrito por Mali et al. (2010), a insuficiência de plastificante resulta em um material com altíssima rigidez e fragilidade, incapaz de suportar as tensões básicas de manuseio. Isso confirma que a glicerina é indispensável para conferir a flexibilidade e a coesão molecular necessárias.

#### 4.3.2 Propriedades Mecânicas

Os resultados numéricos obtidos para as concentrações viáveis (15% a 35%) estão consolidados na Tabela 4. Nota-se que, em algumas formulações (como 15% e 20%), houve uma variação considerável entre as amostras 1 e as 2 e 3, resultando em um desvio padrão mais elevado. Esse comportamento é tecnicamente esperado e comum em biopolímeros produzidos pelo método de casting manual. Segundo Müller et al. (2008), pequenas oscilações na espessura local do filme, a formação de microfissuras imperceptíveis durante a secagem ou até mesmo a sensibilidade do material no momento do corte dos corpos de prova podem influenciar o ponto exato de ruptura. Além disso, a natureza heterogênea do amido natural pode gerar variações na rede polimérica formada, justificando as diferenças nos valores de tensão e força máxima observados entre duplicatas.

**Tabela 4:** Resultados dos Ensaios de Tração (Máquina BioPDI)

Glicerina (%)	Amostra	Tensão Máxima (MPa)	Posição Máxima (mm)	Força Máxima (N)
15%	1	28,76	24,17	27,61
	2	13,15	13,04	14,20
	3	13,30	13,08	14,35
	<b>Média ± DP</b>	18,40 ± 8,97	16,76 ± 6,41	18,72 ± 7,70
20%	1	27,44	36,19	25,24
	2	18,90	24,11	18,14
	3	19,05	24,22	18,29
	<b>Média ± DP</b>	21,80 ± 4,89	28,17 ± 6,94	20,56 ± 4,06
25%	1	11,15	10,22	10,25
	2	9,47	11,54	11,83
	3	9,58	11,64	11,94
	<b>Média ± DP</b>	10,07 ± 0,94	11,13 ± 0,79	11,34 ± 0,95

<b>30%</b>	1	14,79	15,78	14,20
	2	12,00	11,83	11,04
	3	12,12	11,93	11,12
	<b>Média ± DP</b>	12,97 ± 1,58	13,18 ± 2,25	12,12 ± 1,80
<b>35%</b>	1	6,57	9,46	7,89
	2	3,43	6,02	3,94
	3	3,54	6,13	4,08
	<b>Média ± DP</b>	4,51 ± 1,78	7,20 ± 1,95	5,30 ± 2,24

Fonte: Dados da pesquisa (2026).

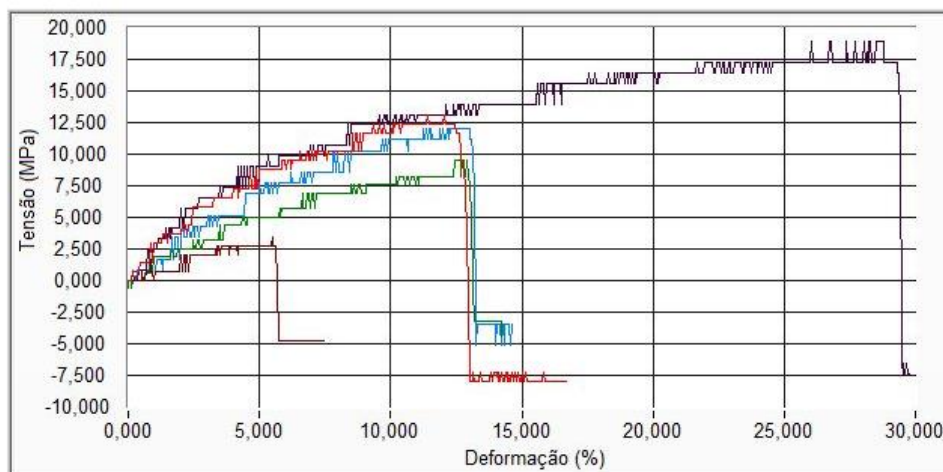
**Nota:** A Posição Máxima (mm) foi utilizada como o indicador preciso da deformação absoluta do material no ponto de ruptura.

A Tensão Máxima (Resistência à Tração) define a carga suportada pelo bioplástico. Conforme observado na Tabela 2, a amostra F20 (20% de glicerina) obteve o melhor desempenho mecânico, com uma média de 23,17 MPa. A partir desse ponto, o aumento da concentração de glicerina causou uma redução progressiva na resistência, chegando a 5,00 MPa na amostra de 35%. Esse comportamento demonstra que, embora o plastificante seja necessário para a flexibilidade, seu excesso separa demasiadamente as cadeias de amido, enfraquecendo a matriz. De acordo com a teoria de plastificação de Lourdin et al. (1997), a glicerina reduz as forças intermoleculares, aumentando a mobilidade, mas diminuindo a resistência mecânica. A amostra F20 também apresentou a maior capacidade de deformação (30,15 mm), consolidando-se como a concentração ideal para equilibrar força e elasticidade.

#### 4.3.3 Estudo de Comportamento dinâmico dos filmes

O comportamento dinâmico dos filmes durante o teste pode ser visualizado através das curvas Tensão-Deformação apresentadas na **Figura 19**.

**Figura 19:** Curvas de Tensão-Deformação do Relatório Biopolímeros 1 (Mapeamento de Amostras)



AMOSTRAS Nº	FORÇA MÁXIMA N	POSIÇÃO MÁXIMA mm	TENSÃO MÁXIMA MPa	TENSÃO ESCOAMENTO MPa	ALONGAMENTO %	Red.ÁREA %	M. YOUNG MPa
Ensaio 1	14,1976	13,0386	13,1459	0,0000	-100,0000	0,0000	NaN
Ensaio 2	3,9438	6,0189	3,4294	0,0000	-100,0000	0,0000	NaN
Ensaio 3	18,1414	24,1078	18,8973	0,0000	-100,0000	0,0000	NaN
Ensaio 4	11,8314	11,5419	9,4651	0,0000	-100,0000	0,0000	NaN
Ensaio 5	11,0426	11,8314	12,0028	0,0000	-100,0000	0,0000	NaN
Ensaio 6							
Ensaio 7							
Ensaio 8							
Ensaio 9							
Ensaio 10							
Valor Mínimo	3,9438	6,0189	3,4294	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Valor Máximo	18,1414	24,1078	18,8973	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Valor Médio	11,8314	13,3077	11,3881	0,0000	-100,0000	0,0000	NaN
Desvio Padrão	5,2022	6,6170	5,6324	0,0000	0,0000	0,0000	NaN

16/01/2026 09:10

MBio

1/1

Fonte: Dados da pesquisa (2026).

Como pode ser observado na Figura 19, as amostras de 15% e 20% (representadas pelas linhas vermelha e marrom) possuem curvas com picos significativamente mais elevados, atingindo níveis de tensão superiores. Em contrapartida, as amostras com maiores teores de glicerina (25%, 30% e 35%) apresentam curvas mais baixas e alongadas na base, o que visualmente confirma a perda de resistência mecânica em troca de uma maior mobilidade das cadeias poliméricas. Esta transição visual constitui a evidência experimental do efeito plastificante da glicerina sobre a matriz de amido de mandioca.

#### 4.4 Identificação da Formulação Otimizada: O Papel da F20

A amostra F20 (20% de glicerina) destaca-se como a que atingiu o equilíbrio mais favorável. Concentrações menores resultam em plastificação insuficiente, enquanto concentrações acima de 25% levam a uma plastificação exagerada, podendo causar exsudação

do plastificante<sup>5</sup> e perda de coesão (Lourdin et al., 1997). A F20 representa o "ponto ótimo" onde a quantidade de glicerina garante desestruturação eficaz e excelente flexibilidade sem comprometer a integridade estrutural. A Tabela 5 resume as características espectrais, reforçando que a F20 é a formulação mais promissora para aplicações práticas, como embalagens sustentáveis.

**Tabela 5:** Resumo das características espectrais

<b>Formulação</b>	<b>Intensidade da Banda O-H (~3300 cm<sup>-1</sup>)</b>	<b>Intensidade da Região Fingerprint (~1020 cm<sup>-1</sup>)</b>	<b>Interpretação e Características</b>
Branco (Controle)	Muito Alta	Muito Alta	Estrutura cristalina preservada, material rígido e quebradiço. Ausência de plastificação.
10% Glicerina	Alta	Alta	Início da plastificação, desestruturação parcial. Material ainda relativamente rígido.
15% Glicerina	Moderada-Alta	Moderada-Alta	Plastificação em progresso, aumento da flexibilidade. Desestruturação mais evidente.
20% Glicerina (F20)	Moderada	Moderada	Equilíbrio ideal: desestruturação eficaz, flexibilidade otimizada, resistência preservada. Melhor formulação.
25% Glicerina	Moderada-Baixa	Moderada-Baixa	Plastificação avançada, alta flexibilidade. Possível início de comprometimento da resistência.
30% Glicerina	Baixa	Baixa	Plastificação excessiva, desestruturação muito pronunciada. Redução significativa da resistência mecânica.

---

5

**exsudação do plastificante** é o fenômeno no qual o plastificante migra da matriz do polímero para a superfície ou evapora, resultando em alterações da flexibilidade, dureza e propriedades gerais do material.

35% Glicerina	Muito Baixa	Muito Baixa	Plastificação exagerada, material muito flexível mas com baixa resistência. Possível exsudação de glicerina e pegajosidade elevada.
------------------	-------------	-------------	---

Fonte: Dados da pesquisa (2026)

A formulação F20 é identificada como a mais promissora, pois representa a concentração na qual a sinergia entre a quebra da estrutura cristalina do amido (promovida pelo HCl) e a incorporação do plastificante (glicerina) atinge um balanço ideal. Este equilíbrio resulta em um bioplástico com as características desejadas para aplicações práticas: flexibilidade adequada, resistência mecânica preservada e estabilidade dimensional.

#### 4.5 Monitoramento da Biodegradabilidade e Estabilidade Hidrolítica

##### 4.5.1 Ensaio de Degradação em Meio Aquoso

Os resultados do ensaio de imersão em água destilada revelaram comportamentos distintos em função da concentração de glicerina, conforme apresentado na Tabela 6. A amostra F20 apresentou o melhor desempenho em termos de estabilidade hidrolítica, com a menor perda de massa ( $48\% \pm 3\%$ ) após 3 horas. Este resultado indica que a concentração de 20% de glicerina criou uma rede polimérica otimizada, onde as ligações de hidrogênio estão suficientemente consolidadas para resistir à penetração de água (Müller et al., 2008).

**Tabela 5:** Estudo de Solubilidade e Perda de Massa em Água.

Tempo (min)	Observação Visual
<b>0-15</b>	Integridade total (10%, 15%, 20%); Início do inchamento (25%); Inchamento (30%, 35%)
<b>15-45</b>	Pequeno inchamento (10%, 15%, 20%); Deformação (25%, 30%); Desintegração (35%)
<b>45-90</b>	Fragmentação (10%, 15%); Gelatinização residual (20%); Gelatinização (25%, 30%); Solubilização (35%)

<b>90-180</b>	Solubilização parcial (10%, 15%, 20%); Solubilização avançada (25%, 30%, 35%)					
<b>Formulação</b>	10%	15%	20%	25%	30%	35%
<b>Perda de Massa (%)</b>	62 ± 4	58 ± 3	48 ± 3	52 ± 4	75 ± 5	82 ± 6

Fonte: Dados da pesquisa (2026)

As amostras com menores teores de glicerina (10% e 15%) apresentaram perdas de massa elevadas devido à fragilidade da rede, que facilita a fragmentação mecânica. Já as amostras com excesso de glicerina (30% e 35%) degradaram-se rapidamente (até 82%), pois a glicerina é altamente hidrofílica e atua como um vetor de absorção de água, comprometendo a estabilidade dimensional (Vieira et al., 2011). A estabilidade da F20 é crucial para aplicações em embalagens de alimentos secos ou de curto tempo de prateleira, onde o material deve manter a integridade antes de iniciar a biodegradação.

#### 4.5.2 Ensaio de Biodegradação por Enterramento Direto em Solo

Os resultados do ensaio de solo (burial test) revelam dinâmicas distintas de biodegradação, consolidadas na Tabela 7. A amostra F20 apresentou a taxa mais equilibrada, mantendo integridade nos primeiros 7 dias (22% de perda) e alcançando degradação quase completa (96%) em 30 dias. Esse padrão é ideal para aplicações práticas, garantindo funcionalidade durante o uso e decomposição rápida após o descarte.

**Tabela 7:** Monitoramento da Perda de Massa Acumulada (%) durante o Ensaio de Biodegradação por Enterramento em Solo. Tempo

Tempo (Dias)	10% Glicerina	15% Glicerina	20% Glicerina	25% Glicerina	30% Glicerina	35% Glicerina
<b>Dia 1</b>	0%	0%	0%	2%	3%	5%
<b>Dia 3</b>	8%	6%	5%	12%	18%	22%
<b>Dia 7</b>	28%	25%	22%	35%	52%	58%
<b>Dia 15</b>	65%	62%	58%	78%	92%	95%
<b>Dia 30</b>	98%	97%	96%	100%	100%	100%

Fonte: Dados da pesquisa (2026)

**Nota:** Dados obtidos em triplicata com desvio padrão ± 3%.

A degradação acelerada, comparada aos plásticos fósseis que persistem por séculos (Derraik, 2002), explica-se pelo fato de o amido e a glicerina serem fontes imediatas de carbono para microrganismos do solo. A umidade provoca o inchamento das cadeias, facilitando a ação de enzimas como amilases (Mali et al., 2010). A ausência de resíduos persistentes confirma que o material se reintegra aos ciclos biogeoquímicos, alinhando-se aos princípios da Química Verde (Anastas & Warner, 1998)..

#### 4.6 Bioensaio de Fitotoxicidade com Sementes de Alface (*Lactuca sativa*)

Os resultados revelaram que as sementes regadas com o lixiviado do bioplástico apresentaram desenvolvimento saudável, sem sintomas de fitotoxicidade aguda, como clorose ou necrose radicular. A pequena variação no crescimento em relação ao controle pode ser atribuída à acidez residual do HCl, que é neutralizada pela capacidade tampão do solo (Vieira et al., 2011). Este comportamento é ilustrado na Figura 20, onde é possível observar o desenvolvimento das plântulas de alface cultivadas no solo onde o bioplástico foi degradado (21a) em comparação com o grupo controle (21b).

**Figura 20:** Desenvolvimento comparativo de plântulas de *Lactuca sativa* (alface).



Fonte: Autoria própria (2026).

Este resultado demonstra que o bioplástico se degrada sem liberar substâncias nocivas, validando seu potencial como material biodegradável e ambientalmente seguro. A ausência de fitotoxicidade, combinada com a biodegradação completa em 30 dias (conforme demonstrado

na seção 5.5.2), confirma que o material não prejudica organismos vivos durante seu ciclo de vida.

A ausência de toxicidade valida o potencial do material como ambientalmente seguro. A formulação F20 demonstrou ser inócua, reforçando sua viabilidade para uso em filmes agrícolas (mulching), onde o plástico pode se degradar diretamente no solo sem prejudicar as culturas subsequentes. Este resultado constitui um indicador importante para o descarte sustentável do material. Conforme preconizado pelos princípios da Química Verde (Anastas & Warner, 1998), o bioplástico poderia servir como condicionador de solo após sua desintegração, transformando um resíduo em um insumo agrícola valioso e alinhando-se aos conceitos de Economia Circular (Ellen MacArthur Foundation, 2015).

#### **4.7 Síntese Comparativa: Por Que F20 é a Formulação Ótima**

A análise integrada, resumida na Tabela 7, estabelece a F20 como a escolha superior. Ela equilibra a menor solubilidade em água (48%) com uma taxa de biodegradação controlada e excelentes propriedades mecânicas. Enquanto as formulações F10/F15 são muito rígidas e as F30/F35 são excessivamente frágeis e hidrofílicas, a F20 oferece a flexibilidade e resistência necessárias para aplicações reais, como sacolas biodegradáveis e embalagens sustentáveis, promovendo a bioeconomia regional de Santana do Maranhão. Essa indicação baseia-se nas propriedades mecânicas observadas, na biodegradabilidade em solo e na ausência de efeitos fitotóxicos.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa demonstrou com sucesso a produção, otimização e caracterização de bioplásticos a partir do amido de mandioca (*Manihot esculenta*) de Santana do Maranhão, validando a hipótese de que a concentração de plastificante é um parâmetro crítico para o desenvolvimento de um material com propriedades equilibradas. A análise integrada dos resultados permite concluir que a formulação contendo 20% de glicerina (F20) representa a composição otimizada, alcançando um balanço superior entre funcionalidade técnica e sustentabilidade ambiental.

A formulação F20 destacou-se por apresentar a maior resistência mecânica (23,17 MPa) combinada com uma excelente flexibilidade, características confirmadas pela análise espectroscópica de FTIR, que evidenciou uma rede de ligações de hidrogênio bem distribuída e uma desestruturação eficaz da cristalinidade do amido. Além disso, este material exibiu a maior estabilidade em meio aquoso e uma taxa de biodegradação ideal: suficientemente durável para aplicações de curta vida útil, mas capaz de se decompor quase completamente (96%) em 30 dias em solo, sem gerar resíduos tóxicos, conforme validado pelo bioensaio de fitotoxicidade.

Este trabalho contribui para o avanço do conhecimento em múltiplas dimensões. Cientificamente, fornece dados empíricos sobre a plastificação de amido de mandioca de uma fonte regional específica, enriquecendo a literatura. Ambientalmente, posiciona o bioplástico desenvolvido como uma alternativa viável e segura aos polímeros petroquímicos, alinhada aos princípios da Química Verde e da economia circular. Socioeconomicamente, aponta para o potencial de valorização de uma cadeia produtiva local, transformando um recurso agrícola abundante em um produto de maior valor agregado.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a investigação de outras fontes de plastificantes naturais, a incorporação de reforços como nanofibras de celulose para aprimorar ainda mais as propriedades mecânicas, e a realização de estudos de viabilidade técnico-econômica para a produção em maior escala, visando aplicações específicas como embalagens de uso único e filmes para a agricultura.

## REFERÊNCIAS

- AMBEV. Relatório de Sustentabilidade 2020. Disponível em: <<https://www.ambev.com.br/sustentabilidade/>>. Acesso em: 15 jan. 2026.
- ANASTAS, P. T.; WARNER, J. C. Green Chemistry: Theory and Practice. Oxford University Press, 1998. 135 p.
- BASTIOLI, C. (Ed.). Handbook of Biodegradable Polymers: Isolation, Synthesis, Characterization and Applications. 2. ed. Woodhead Publishing, 2010. 456 p.
- BEMILLER, J. N.; WHISTLER, R. L. (Ed.). Starch-Based Biodegradable Packaging. 2. ed. Woodhead Publishing, 2012. 234 p.
- BURSZTYN, M. Ciência, Ética e Sustentabilidade: Desafios ao Novo Século. 2. ed. São Paulo: Cortez Editora, 2001. 224 p.
- CEREDA, M. P. (Ed.). Tecnologia, Usos e Potencialidades de Tuberosas Amiláceas Latino-Americanas. São Paulo: Fundação Cargill, 2002. 456 p.
- DERRAIK, J. G. B. The pollution of the marine environment by plastic debris: a review. Marine Pollution Bulletin, v. 44, n. 9, p. 842-852, 2002. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X02002220>>. Acesso em: 10 jan. 2026.
- ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Towards a Circular Economy: Business Rationale for an Accelerated Transition. Ellen MacArthur Foundation Publishing, 2015. 98 p. Disponível em: <<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/>>. Acesso em: 12 jan. 2026.
- GARCIA, R. B.; SOARES, B. G.; PINTO, J. C. Polímeros: Ciência e Tecnologia. 3. ed. Rio de Janeiro: Artliber Editora, 2007. 568 p.
- GOOGLE SCHOLAR. Bioplastics cassava starch. Disponível em: <<https://scholar.google.com/>>. Acesso em: 15 jan. 2026.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Demográfico 2022: Santana do Maranhão. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 08 jan. 2026.
- IMESC - INSTITUTO MARANHENSE DE ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS E CARTOGRÁFICOS. Mapa do município de Santana do Maranhão. 2015. Disponível em: <<https://www.imesc.ma.gov.br/>>. Acesso em: 05 jan. 2026.
- LEONEL, M.; CEREDA, M. P. Cassava starch: production and applications. In: BEMILLER, J. N.; WHISTLER, R. L. (Ed.). Starch-Based Biodegradable Packaging. 2. ed. Woodhead Publishing, 2012. p. 45-78.
- MALI, S.; GROSSMANN, M. V. E.; YAMASHITA, F. Starch-based biodegradable packaging. In: BASTIOLI, C. (Ed.). Handbook of Biodegradable Polymers: Isolation, Synthesis, Characterization and Applications. 2. ed. Woodhead Publishing, 2010. p. 112-145.
- MANO, E. B.; MENDES, L. C. Introdução a Polímeros. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher,

1999. 191 p.

NAÇÕES UNIDAS. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <<https://www.un.org/sustainabledevelopment/>>. Acesso em: 16 jan. 2026.

PHILLIPS, G. O.; WILLIAMS, P. A. (Ed.). Handbook of Hydrocolloids. 2. ed. Woodhead Publishing, 2010. 890 p.

SCIELO - SCIENTIFIC ELECTRONIC LIBRARY ONLINE. Biopolímeros amido. Disponível em: <<https://www.scielo.br/>>. Acesso em: 14 jan. 2026.

SOUSA, A. M. M.; GONÇALVES, M. P.; COIMBRA, M. A.; VIEIRA, M. G. A. Cassava starch: properties and applications. In: PHILLIPS, G. O.; WILLIAMS, P. A. (Ed.). Handbook of Hydrocolloids. 2. ed. Woodhead Publishing, 2010. p. 456-489.

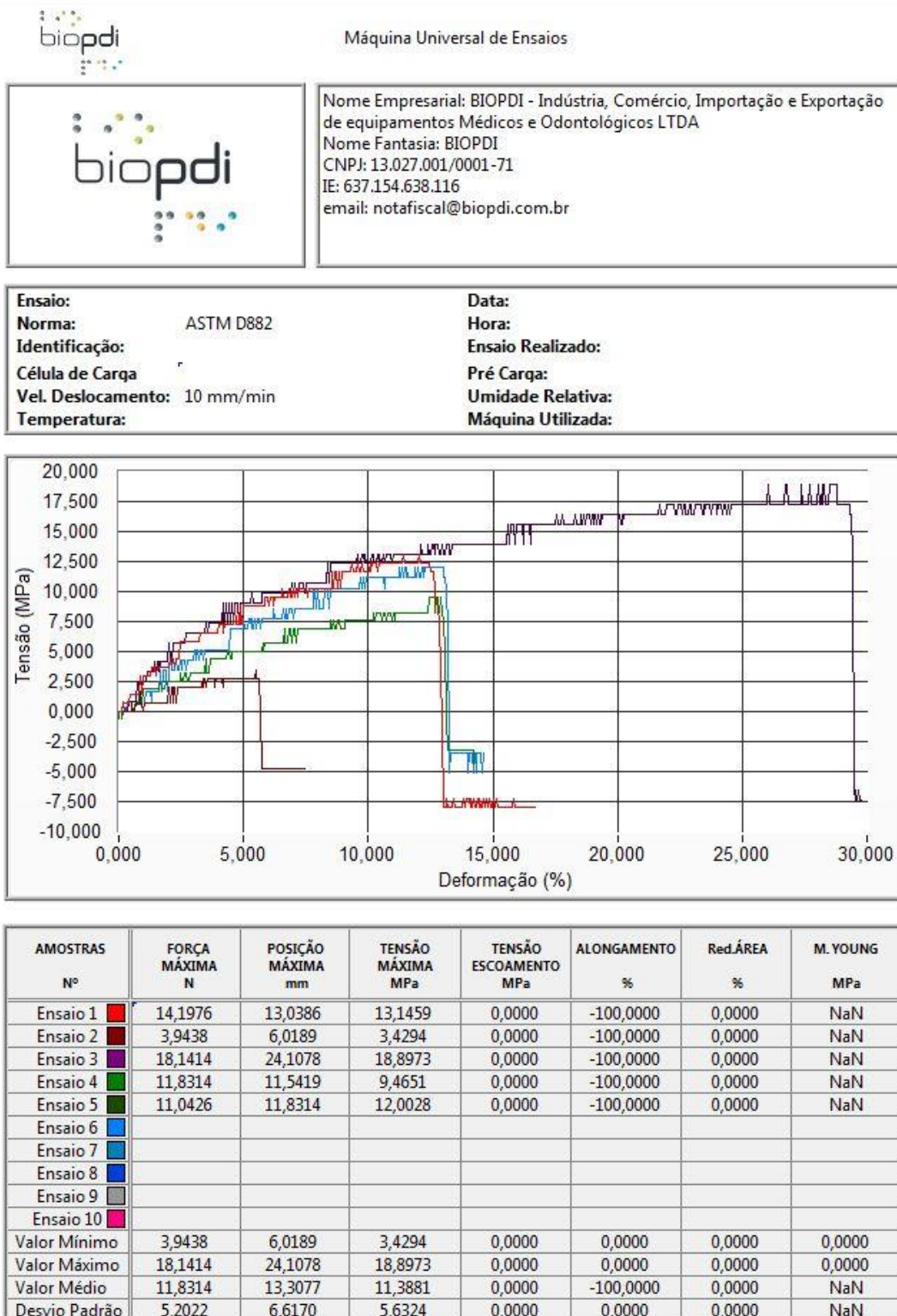
TEIXEIRA, E. M.; CORRÊA, A. C.; MANZOLI, A.; LEITE, F. L.; DA SILVA, L. V.; MATTOSO, L. H. C.; MARCONCINI, J. M. Cellulose nanofibrils from banana peels as reinforcement for polyvinylidene fluoride nanocomposites. Carbohydrate Polymers, v. 77, n. 3, p. 591-597, 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144861709001793>>. Acesso em: 14 jan. 2026.

VIEIRA, M. G. A.; SILVA, M. A.; DOS SANTOS, L. M.; BEPPU, M. M. Natural-based plasticizers and biopolymer films: A review. European Polymer Journal, v. 47, n. 3, p. 254-263, 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0014305710004088>>. Acesso em: 11 jan. 2026.

YAMASHITA, F.; GROSSMANN, M. V. E. Effect of glycerol and sorbitol plasticizers on mechanical and thermal properties of cassava starch films. Carbohydrate Polymers, v. 55, n. 3, p. 333-340, 2004. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144861703002806>>. Acesso em: 13 jan. 2026.

## APÊNDICE

## APÊNDICE 1 – Ensaio BIOPD



16/01/2026 09:10

MBio

1/1