



**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA
AFRO-BRASILEIRA
INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO RURAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SOCIOBIODIVERSIDADE E
TECNOLOGIAS SUSTENTÁVEIS**

MARIA MABELLE PEREIRA COSTA PAIVA

**SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO POR FTIR DE BIOPLÁSTICO FUNCIONALIZADO
A PARTIR DO AMIDO DA BATATA INGLESA (*Solanum tuberosum*)**

REDENÇÃO

2026

MARIA MABELLE PEREIRA COSTA PAIVA

**SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO POR FTIR DE BIOPLÁSTICO FUNCIONALIZADO
A PARTIR DO AMIDO DA BATATA INGLESA (*Solanum tuberosum*)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sociobiodiversidade e Tecnologias Sustentáveis da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, como requisito para obtenção do Título de mestre Sociobiodiversidade e Tecnologias Sustentáveis

Orientador: Prof. Dr. Aluísio Marques da Fonseca

Coorientadora: Dra. Lívia Paulia Dias Ribeiro

REDENÇÃO

2026

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Sistema de Bibliotecas da UNILAB
Catalogação de Publicação na Fonte.

Paiva, Maria Mabelle Pereira Costa.

P149s

Síntese e caracterização por FTIR de bioplástico funcionalizado a partir do amido da batata inglesa *Solanum Tuberosum* / Maria Mabelle Pereira Costa Paiva. - Redenção, 2026.

63f: il.

Dissertação - Curso de Sociobiodiversidade e Tecnologias Sustentáveis, Programa De Pós-graduação Sociobiodiversidade e Tecnologias Sustentáveis, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2026.

Orientador: Prof. Dr. Aluísio Marques da Fonseca.

Coorientadora: Dra. Livia Paulia Dias Ribeiro.

1. Bioplástico. 2. Amido de batata. 3. Sustentabilidade. 4. Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR). 5. Polímeros biodegradáveis. I. Título

CE/UF/BSCA

CDD 668.4

MARIA MABELLE PEREIRA COSTA PAIVA

**SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO POR FTIR DE BIOPLÁSTICO FUNCIONALIZADO
A PARTIR DO AMIDO DA BATATA INGLESA (*Solanum tuberosum*)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sociobiodiversidade e Tecnologias Sustentáveis da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, como requisito para obtenção do Título de mestre Sociobiodiversidade e Tecnologias Sustentáveis

Aprovada em: 03 de fevereiro de 2026

Profº. Drº. Aluisio Marques da Fonseca
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB

Profª. Drª. Livia Paulia Dias Ribeiro
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB

Prpº. Drº. Emmanuel Silva Marinho
Universidade Estadual do Ceará - UECE

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder saúde, força e sabedoria ao longo de toda esta caminhada, guiando meus passos nos momentos de desafios e conquistas.

Aos meus pais, pelo amor incondicional, incentivo constante e por acreditarem em mim mesmo diante das dificuldades. Ao meu esposo, pelo companheirismo, paciência, apoio e compreensão durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu orientador, professor Aluísio, pela dedicação, confiança, orientação científica e valiosas contribuições que foram fundamentais para a realização desta pesquisa. À minha coorientadora, Lívia Paulia, pelo apoio, disponibilidade e pelas importantes sugestões que enriqueceram este estudo.

Ao professor Emmanuel, por ter participado da banca de avaliação, contribuindo com análises criteriosas e apontamentos relevantes para o aprimoramento do trabalho.

Ao Grupo de Pesquisa GIQ, pelo compartilhamento de conhecimentos, pelas discussões científicas e pelo ambiente colaborativo que tanto contribuiu para meu crescimento acadêmico e profissional.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte desta trajetória e contribuíram para a concretização deste trabalho.

RESUMO

Os polímeros derivados do petróleo são amplamente utilizados na indústria de embalagens em função de suas propriedades e baixo custo; entretanto, sua baixa biodegradabilidade resulta em acúmulo ambiental e impactos negativos. Nesse contexto, os bioplásticos surgem como alternativas sustentáveis, destacando-se o amido da batata inglesa (*Solanum tuberosum*) por sua abundância, biodegradabilidade e viabilidade econômica, possibilitando a obtenção de filmes biodegradáveis com propriedades funcionais adequadas. O presente estudo teve como objetivo geral avaliar a obtenção de bioplásticos a partir do amido da batata inglesa, analisando suas propriedades estruturais e funcionais, bem como sua viabilidade técnica, econômica e ambiental. A pesquisa foi desenvolvida em três etapas principais: revisão de literatura, execução experimental e caracterização e análise dos dados. A etapa experimental envolveu a produção de filmes bioplásticos por meio de dois experimentos distintos. No primeiro experimento, foram obtidos filmes contendo exclusivamente amido de batata inglesa. No segundo, o procedimento foi reproduzido com a adição de extrato de repolho roxo (*Brassica oleracea*), visando à obtenção de bioplásticos funcionalizados com propriedades indicadoras de pH. A caracterização dos filmes obtidos em ambos os experimentos foi realizada por meio da espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), permitindo avaliar as interações químicas estabelecidas na matriz polimérica. Os resultados do primeiro experimento indicaram que o bioplástico preserva características estruturais do amido original, apresentando modificações na região da carbonila, o que sugere a formação de novas interações intermoleculares durante o processamento e confirma a obtenção de uma matriz polimérica coesa. No segundo experimento, os filmes funcionalizados apresentaram coloração inicial rosada homogênea, evidenciando a incorporação efetiva das antocianinas à matriz polimérica. A exposição dos filmes a meios com diferentes valores de pH revelou resposta cromática clara e reprodutível: em meio ácido ($\text{pH} \approx 2$), observou-se a preservação e intensificação da coloração rosada, enquanto em meio básico ($\text{pH} \approx 12$) ocorreram alterações cromáticas para tonalidades amareladas, acompanhadas de perda de homogeneidade do filme. Esses resultados demonstram o comportamento sensível ao pH dos bioplásticos funcionalizados, evidenciando seu potencial como filmes indicadores naturais. Assim, o amido da batata inglesa, especialmente quando funcionalizado com extrato de repolho roxo, mostra-se uma alternativa promissora para o desenvolvimento de bioplásticos biodegradáveis e inteligentes, contribuindo para a substituição de polímeros sintéticos convencionais e para a mitigação de impactos ambientais.

Palavras-chave: Bioplástico. Amido de batata. Sustentabilidade. FTIR. Polímeros biodegradáveis.

ABSTRACT

Petroleum-derived polymers are widely used in the packaging industry due to their properties and low cost; however, their low biodegradability results in environmental accumulation and negative impacts. In this context, bioplastics emerge as sustainable alternatives, with potato starch (*Solanum tuberosum*) standing out due to its abundance, biodegradability, and economic viability, enabling the production of biodegradable films with suitable functional properties. This study aimed to evaluate the production of bioplastics from potato starch, analyzing their structural and functional properties, as well as their technical, economic, and environmental feasibility. The research was conducted in three main stages: literature review, experimental execution, and data characterization and analysis. The experimental stage involved the production of bioplastic films through two distinct experiments. In the first experiment, films composed exclusively of potato starch were obtained. In the second, the procedure was reproduced with the addition of red cabbage extract (*Brassica oleracea*), aiming to obtain functionalized bioplastics with pH-indicator properties. The characterization of the films obtained in both experiments was performed using Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), allowing the evaluation of chemical interactions within the polymeric matrix. The results of the first experiment indicated that the bioplastic preserved the structural characteristics of the original starch, with modifications in the carbonyl region, suggesting the formation of new intermolecular interactions during processing and confirming the development of a cohesive polymeric matrix. In the second experiment, the functionalized films exhibited an initial homogeneous pink coloration, evidencing the effective incorporation of anthocyanins into the polymeric matrix. Exposure of the films to media with different pH values revealed a clear and reproducible chromatic response: in acidic medium (pH $\approx$ 2), the pink coloration was preserved and intensified, whereas in basic medium (pH $\approx$ 12), color changes to yellowish tones were observed, accompanied by loss of film homogeneity. These results demonstrate the pH-sensitive behavior of the functionalized bioplastics, highlighting their potential as natural indicator films. Thus, potato starch, especially when functionalized with red cabbage extract, represents a promising alternative for the development of biodegradable and intelligent bioplastics, contributing to the replacement of conventional synthetic polymers and to the mitigation of environmental impacts.

Keywords: Bioplastic. Potato starch. Sustainability. FTIR. Biodegradable polymers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Classificação de plásticos convencionais e bioplásticos.....	16
Figura 2: Conceito de Economia Circular.....	18
Figura 3: Estrutura da amilose e representação helicoidal (a) e da amilopectina e seus formatos com ramificação (b).....	26
Figura 4: Estrutura básica da antocianina.....	37
Figura 5: Principais antocianidinas em plantas.....	38
Figura 6: Alterações de cor do extrato rico em antocianinas do repolho roxo em função do pH.....	41
Figura 7 - Partículas de batata em meio aquoso (a), filtração comum da mistura (b) e filtração a vácuo (c).....	46
Figura 8 – Remoção do material do funil (a) e pesagem do material (b).....	46
Figura 9 – Adição dos reagentes (9a) e gel em placa de Petri (9b).....	47
Figura 10 – Repolho roxo cortado (a), Repolho roxo pesado (b) e Repolho roxo adicionado à água (c).....	48
Figura 11 – Filtração simples do extrato (a) e extrato do repolho roxo (b).....	48
Figura 12 – Pesagem do amido (a), adição do extrato do repolho roxo (b) e matriz polimétrica (c).....	49
Figura 13: Identificação dos grupos funcionais por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR).....	55
Figura 14 – Béquer a esquerda (solução de NaOH, pH $\approx$ 12. Béquer a direita H ₂ SO ₄ (pH $\approx$ 2).....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características dos grânulos de amido de diferentes espécies vegetais.....	18
---	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Principais diferenças da amilose e amilopectina.....	24
Quadro 2. Principais bandas de absorção no FTIR das amostras analisadas e suas atribuições.....	49

LISTA DE SÍMBOLOS

α – Ligação do tipo alfa
 β – Ligação do tipo beta
 α -1,4 – Ligação glicosídica alfa entre os carbonos 1 e 4
 α -1,6 – Ligação glicosídica alfa entre os carbonos 1 e 6
C1 – Carbono 1
C4 – Carbono 4
–OH – Grupo hidroxila
O–H – Ligação oxigênio–hidrogênio
C–H – Ligação carbono–hidrogênio
C–O – Ligação carbono–oxigênio
C=O – Ligação carbonila
C₆H₁₂O₆ – Fórmula molecular da glicose
 μm – Micrômetro
% – Porcentagem
m/m – Razão massa/massa
p/p – Razão peso/peso
n – Grau de polimerização
T_g – Temperatura de transição vítrea
°C – Grau Celsius
nm – Nanômetro
cm⁻¹ – Número de onda
pH – Potencial hidrogeniônico
C₂H₄O₂ – Fórmula molecular do ácido acético
H₂SO₄ – Ácido sulfúrico
NaOH – Hidróxido de sódio
CO₂ – Dióxido de carbono
H₂O – Água
≈ – Aproximadamente

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1	Definição de bioplásticos.....	14
2.2	Classificação dos bioplásticos.....	16
2.3	(Bio) degradabilidade dos bioplásticos	19
2.4	Amido da batata inglesa como matéria prima.....	23
2.5	Estrutura química do amido: amilose e amilopectina.....	25
2.6	Propriedades funcionais do amido.....	29
2.7	Estudos sobre a produção de bioplásticos a partir de amidos de diferentes fontes vegetais.....	33
2.8	Filmes bioplásticos à base de amido de batata funcionalizado com extrato de repolho roxo	35
2.8.1	Antocianinas como compostos funcionais.....	36
2.8.2	Repolho roxo como fonte de antocianinas.....	39
2.8.3	Funcionalização de matrizes poliméricas com pigmentos naturais.....	39
2.8.4	Filmes poliméricos indicadores de pH.....	40
2.9	Limitações dos métodos de produção de bioplásticos.....	42
3	MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1	Matéria-prima e reagentes.....	45
3.2	Produção do bioplástico – Experimento 1	45
3.2.1	Extração do amido da batata inglesa.....	45
3.2.2	Preparação e secagem do bioplástico	47
3.3	Produção do bioplástico funcionalizado – experimento 2.....	47
3.3.1	Obtenção do extrato do repolho roxo.....	47
3.3.2	Preparação e secagem do bioplástico funcionalizado.....	49
3.4	Caracterização por FTIR	50
3.5	Avaliação do pH	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
4.1	Caracterização de filmes bioplásticos de amido (experimento 1).....	51
4.1.1	Análise do espectro de infravermelho por transformação de Fourier.....	53
4.2	Caracterização do bioplástico funcionalizado (experimento 2)	56
4.2.1	Comportamento do bioplástico funcionalizado em meios ácido e básico	56
5	CONCLUSÃO.....	59
	REFERÊNCIAS	

1. INTRODUÇÃO

Os polímeros derivados do petróleo têm sido amplamente utilizados em diversas aplicações, especialmente na fabricação de embalagens, principalmente devido às suas vantagens, como baixo custo, leveza, resistência, fácil processamento e durabilidade. Além disso, destacam-se por oferecerem alta proteção contra umidade, contaminantes e danos físicos, sendo relativamente fáceis de moldar em diferentes formatos, o que os torna ideais para uso em embalagens de alimentos, cosméticos, produtos eletrônicos, entre outros (Kowser *et al.*, 2025).

Contudo, apesar de seus benefícios, esses polímeros apresentam sérios problemas ambientais. Uma das principais desvantagens é que eles não são biodegradáveis, ou seja, não se decompõem de forma natural no ambiente, permanecendo por centenas de anos nos ecossistemas. Como consequência, acumulam-se em aterros sanitários, rios, mares e outros ambientes, gerando grandes volumes de resíduos sólidos e impactos ambientais significativos. Esse cenário tem intensificado a preocupação global com a sustentabilidade e impulsionado o desenvolvimento de alternativas mais ecológicas, como os bioplásticos.

Os bioplásticos, ou biopolímeros, “são um tipo de plástico feito de recursos renováveis, biodegradável, produzido por processos biológicos ou uma combinação dessas características” (Dutta; Sit 2024, p.59). Uma de suas principais vantagens é a redução da dependência de recursos fósseis não renováveis, como o petróleo, contribuindo para um modelo de produção mais sustentável.

O amido, especialmente o amido da batata inglesa (*Solanum tuberosum*), tem se mostrado uma excelente matriz polimérica para a produção de bioplásticos, oferecendo uma solução viável para reduzir a dependência de plásticos convencionais. Trata-se de um carboidrato natural composto por unidades de glicose, sendo uma das fontes mais abundantes de biomassa no mundo, presente em culturas como milho, arroz e batata. Os biopolímeros à base de amido são geralmente obtidos através da mistura do amido com plastificantes, como o glicerol, que melhoram a flexibilidade e a processabilidade do material. Essa combinação de componentes resulta em um bioplástico com potencial para diversas aplicações, incluindo a fabricação de embalagens, filmes e revestimentos, bem como em aplicações agrícolas, médicas, engenharia elétrica, construção civil, cosmética, automotivas, dentre outras (Coppola *et al.*, 2021; Jayakumar *et al.*, 2023). Nesse contexto, Santana *et al.*, (2018) destacam que os plastificantes são substâncias de baixa

volatilidade adicionada a um material polimérico (geralmente um plástico) com o objetivo de aumentar sua flexibilidade, extensibilidade e processabilidade, ao reduzir as interações intermoleculares entre as cadeias do polímero. Essa adição promove uma diminuição da temperatura de transição vítrea (Tg) do material, tornando-o mais maleável sem alterar significativamente sua estrutura química.

Apesar de seu potencial, os bioplásticos à base de amido ainda apresentam limitações, como fragilidade, elevada absorção de umidade e instabilidade química, fatores que restringem sua aplicabilidade em larga escala. Dessa forma, torna-se fundamental aprofundar os estudos sobre sua estrutura química e as interações moleculares que influenciam suas propriedades físico-químicas, justificando a necessidade de pesquisas que avaliem seu desempenho e estabilidade.

Diante desse contexto, este trabalho tem como objetivo geral avaliar a obtenção de bioplásticos a partir do amido da batata inglesa, incluindo bioplásticos funcionalizados com extrato de repolho roxo (*Brassica oleracea*), identificando suas propriedades e características, bem como sua viabilidade técnica, econômica e ambiental. Como objetivos específicos, busca-se: (i) produzir bioplásticos utilizando o amido da batata inglesa como matriz polimérica; (ii) desenvolver bioplásticos funcionalizados com extrato de repolho roxo (*Brassica oleracea*), visando à obtenção de filmes com propriedades indicadoras de pH. (iii) caracterizar suas propriedades químicas e estruturais; e (iv) registrar e analisar os espectros FTIR dos bioplásticos produzidos por meio do espectrômetro Bruker VERTEX 70v, a fim de identificar grupos funcionais e interações moleculares que impactam sua estabilidade e desempenho.

Assim, a presente pesquisa se justifica por contribuir para o desenvolvimento de materiais poliméricos sustentáveis, agregando valor a uma biomassa amplamente disponível, ao mesmo tempo em que fornece subsídios científicos para a substituição gradual dos polímeros sintéticos convencionais por alternativas biodegradáveis e ambientalmente responsáveis.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Definição de bioplásticos

Para a compreensão do conceito de bioplásticos, é importante destacar que, assim como os plásticos convencionais, esses materiais são constituídos por polímeros.

Os polímeros são macromoléculas formadas pela repetição de unidades estruturais denominadas meros, ligadas entre si por ligações covalentes.

O número de unidades repetitivas presentes em uma cadeia polimérica é denominado grau de polimerização, geralmente representado pela letra *n* ou pela sigla *DP* (do inglês *Degree of Polymerization*). De modo geral, quanto maior o grau de polimerização, maior é o comprimento da cadeia polimérica, o que pode resultar em propriedades como maior resistência mecânica e estabilidade estrutural do material (Mano e Mendes, 2004).

No entanto, os bioplásticos são polímeros derivados de recursos renováveis oferecendo uma alternativa sustentável aos plásticos à base de petróleo. Eles têm várias vantagens como baixa pegada de carbono, biodegradabilidade e versatilidade, mas também enfrentam desafios como fragilidade, alta absorção de água, baixa capacidade de cristalização e baixa temperatura de degradação térmica, além de apresentar dificuldades de inserção no mercado, desafios financeiros e maior necessidade de políticas governamentais, entre outra. Apesar desses desafios, a legislação de apoio e a mudança no comportamento do consumidor estão impulsionando o mercado de materiais, tornando-os uma solução promissora para a poluição plástica e as preocupações ambientais (Costa *et al.*, 2023).

O termo bioplástico refere-se tanto aos plásticos de base biológica, produzidos a partir de matérias-primas de origem biogênica, quanto aos plásticos biodegradáveis, os quais podem incluir materiais de origem petroquímica (Folino *et al.*, 2020). Dessa forma, o conceito de bioplástico engloba materiais que podem ser de base biológica, biodegradáveis ou que reúnam ambas as propriedades. Essa natureza multifacetada confere aos bioplásticos maior flexibilidade de aplicação e potencial para redução de impactos ambientais quando comparados aos plásticos convencionais, especialmente quando associados a estratégias de economia circular e gestão sustentável de resíduos (Folino, Pangallo e Calabrò, 2023).

Os plásticos de base biológica são definidos como aqueles cuja matéria-prima é proveniente de recursos renováveis, tais como plantas, proteínas e lipídios, de modo que o carbono incorporado ao material tem origem biogênica. Em contraste, os plásticos convencionais são majoritariamente produzidos a partir de recursos fósseis, como o petróleo. Por sua vez, os plásticos biodegradáveis correspondem a polímeros capazes de sofrer decomposição no ambiente por ação de microrganismos, como bactérias, fungos e algas, desde que submetidos a condições ambientais adequadas. Durante o processo de

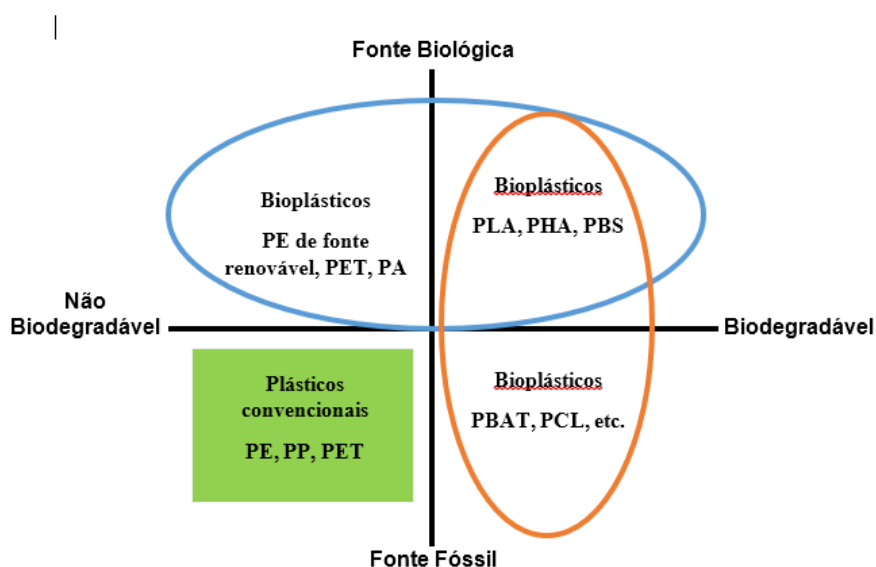
biodegradação, esses materiais são convertidos em substâncias mais simples, como dióxido de carbono, água, metano, biomassa ou compostos inorgânicos, integrando-se aos ciclos naturais da matéria (Folino *et al.*, 2020).

Entretanto, é importante destacar que as propriedades de base biológica e biodegradabilidade não são necessariamente concomitantes. Nem todos os plásticos de base biológica são biodegradáveis em condições ambientais naturais. O ácido polilático (PLA), por exemplo, é um polímero de origem renovável amplamente classificado como bioplástico, porém sua biodegradação ocorre de forma eficiente apenas sob condições controladas, como aquelas encontradas em sistemas de compostagem industrial. Por outro lado, existem plásticos biodegradáveis que podem ser produzidos a partir de matérias-primas de origem petroquímica, evidenciando a necessidade de distinção conceitual entre essas classificações.

2.2 Classificação dos bioplásticos

Os bioplásticos não são uma categoria única, mas um grupo diverso de materiais que podem ter variações em relação à sua origem (biológica) e à sua capacidade de se decompor (biodegradabilidade ou compostabilidade). Dessa forma, eles podem ser classificados em três macro categorias (European Bioplastics, 2017), cada uma apresentando características e comportamentos distintos no meio ambiente (Figura 1).

Figura 1 - Classificação de plásticos convencionais e bioplásticos



Fonte: EUROPEAN BIOPLASTICS, 2017(adaptado).

- 1) Plásticos não biodegradáveis de base biológica ou parcialmente biológica, como bio-PE (Polietileno), bio-PA (Poliamida) ou bio-PET (Polietileno tereftalato) e polímeros de desempenho técnico de base biológica, como bio-PTT que combina as propriedades técnicas dos plásticos convencionais com a origem renovável da matérias-prima.
- 2) Plásticos de base biológica e biodegradáveis, como o ácido polilático (PLA), o polihidroxialcanoato (PHA) e o polibutileno succinato (PBS)
- 3) Plásticos que são baseados em recursos fósseis e são biodegradáveis, como o PBAT (polibutileno adipato tereftalato).

A produção de biopolímeros está associada ao uso de materiais orgânicos renováveis, conhecidos como biomassa, cuja origem influencia diretamente o tipo de bioplástico obtido. De modo geral, essa biomassa pode ser classificada em três gerações — primeira, segunda e terceira —, cada uma caracterizada pelo emprego de recursos distintos, com vantagens e limitações específicas. Os bioplásticos de primeira geração são produzidos diretamente a partir de matérias-primas renováveis provenientes de culturas agrícolas, como milho, cana-de-açúcar, batata, soja, beterraba, tapioca e cevada. A principal preocupação associada a essa geração refere-se ao conflito de uso com a produção de alimentos, uma vez que as mesmas culturas agrícolas são utilizadas para alimentação humana e animal, o que pode impactar os preços dos alimentos e intensificar a pressão sobre áreas agrícolas. Em contraposição, os bioplásticos de segunda geração utilizam subprodutos ou resíduos oriundos das culturas da primeira geração, como palha de milho, resíduos de cana-de-açúcar, madeira e fibras vegetais, incluindo cânhamo e linho. Essa abordagem busca reduzir o desperdício e o impacto ambiental, ao valorizar materiais que, de outra forma, seriam descartados ou subutilizados. Já os bioplásticos de terceira geração envolvem o uso de microrganismos, como algas e bactérias, capazes de sintetizar polímeros, a exemplo dos polihidroxialcanoatos (PHA). Esses materiais são biodegradáveis e apresentam potencial para diversas aplicações, incluindo embalagens e dispositivos médicos. Uma de suas principais vantagens é o fato de não competirem com a produção de alimentos, além de poderem ser obtidos a partir de sistemas que não demandam grandes extensões de terra arável (Folino *et al.*, 2020; Oberti; Paciello, 2022).

Nesse contexto, os bioplásticos emergem como uma alternativa promissora aos plásticos convencionais, devido à sua capacidade de atender a aplicações semelhantes e serem mais sustentáveis, oferecendo benefícios adicionais, como “redução da pegada de

carbono, melhor funcionalidade e fornecem opções adicionais na gestão de resíduos, como a reciclagem orgânica” (Oberti; Paciello, 2022, p.1410). Ademais, a biodegradabilidade de determinados bioplásticos contribui para a mitigação dos impactos ambientais, especialmente por serem produzidos a partir de matérias-primas biogênicas, como plantas e microrganismos, favorecendo a construção de sistemas mais sustentáveis e reduzindo o descarte de resíduos plásticos recalcitrantes no meio ambiente (Emadian, Onay; Demirel, 2017, p.527).

Esses aspectos tornam os bioplásticos compatíveis com os princípios da economia circular (Figura 2), em contraste com os plásticos convencionais, que dependem majoritariamente de recursos fósseis e geram resíduos de difícil reciclagem. Enquanto a produção de bioplásticos pode envolver o aproveitamento de resíduos e processos mais sustentáveis, a fabricação de plásticos tradicionais caracteriza-se como um processo linear e irreversível, baseado no consumo de recursos não renováveis e associado a maiores impactos ambientais (Folino *et al.*, 2020).

A economia circular compreende um conjunto de práticas e princípios voltados à minimização dos impactos ambientais, fundamentando-se “nos diferentes ciclos da cadeia de produção de produtos descartados para limitar o desperdício, minimizar o uso de matérias-primas totalmente novas, maximizar o potencial de um material e reduzir a quantidade de resíduos que se dispersam no meio ambiente” (Oberti e Paciello, 2022, p.1408).

Figura 2 - Conceito de Economia Circular



Fonte: ALI *et al.*, 2023 (adaptada).

Assim, busca-se preservar o meio ambiente e evitar a exaustão desses recursos por meio da economia circular que promove a restauração e a regeneração por design, e visa “redesenhar os sistemas de descarte de resíduos, minimizando as externalidades negativas por meio da reimaginação de produtos e serviços por meio da inovação em todo o sistema” (Ali *et al.*, 2023, p.2). Dessa forma, estabelece-se um ciclo de vida mais sustentável para os produtos, alinhado à redução de impactos ambientais e à transição de modelos lineares de produção e consumo para sistemas circulares.

Destaca-se, ainda, que a maximização do potencial de um material, no contexto da economia circular, é alcançada por meio do design de produtos concebidos para serem duráveis, reparáveis, reutilizáveis ou recicláveis. Dessa forma, invés de serem descartados após o uso, os produtos podem ser reintegrados ao ciclo produtivo, seja por meio de reutilização direta ou reciclagem, contribuindo para a redução da geração de resíduos e para a otimização do uso de recursos naturais

Ademais, a economia circular fundamenta-se no fortalecimento dos valores ambientais, sociais, materiais e econômicos (Ali *et al.*, 2023). Sob a perspectiva ambiental esse modelo contribui para a redução de impactos como emissões de carbono, poluição e degradação dos ecossistemas. No âmbito social, favorece a criação de empregos verdes e o desenvolvimento de novas indústrias sustentáveis, colaborando para qualidade de vida por meio de práticas responsáveis. Em relação aos materiais, prioriza-se o uso eficiente e inteligente dos recursos, com ênfase na reutilização e na reciclagem. Já plano econômico foca na eficiência dos processos produtivos, na redução de custos associados à extração de recursos e na criação de mercados para produtos sustentáveis e reciclados.

Portanto, neste sistema de produção sustentável, os bioplásticos configuram-se como uma solução inovadora alinhada aos princípios da economia circular, ao utilizarem matérias-primas biogênicas, como plantas e microrganismos, e ao minimizarem o uso de materiais difíceis de reciclagem. Além disso, reforçam a preservação ambiental, ao contrário da produção irreversível e ambientalmente danosa dos plásticos tradicionais.

2.3 (Bio)degradabilidade dos bioplásticos

Os bioplásticos, assim como outros materiais poliméricos, apresentam um ciclo de vida que abrange todas as etapas desde a produção até o fim de sua vida útil, incluindo o descarte ou a decomposição. No entanto, devido à grande variedade desses materiais, cada tipo de bioplástico pode apresentar um ciclo de vida distinto, uma vez que pode ser

produzido a partir de diferentes fontes e, consequentemente, exibir propriedades específicas e diferentes formas de descarte ou processamento.

A degradabilidade dos bioplásticos, ou seja, sua capacidade de se decompor de forma natural, “não depende do tipo de materiais que foram usados para sintetizá-lo, mas das propriedades físico-químicas do próprio bioplástico” (Folino; Pangallo; Calabrò, 2023, p.3). Essa capacidade de degradação é considerada uma "propriedade funcional" ou uma "opção de eliminação" do material quando atinge o final de sua vida útil, que depende de uma combinação de processos e parâmetros abióticos, como radiação UV, temperatura, humidade, pH, bem como de fatores bióticos, incluindo atividade microbiana (Folino *et al.*, 2020).

É importante destacar a diferença entre degradação e biodegradação, uma vez que os ambos os processos envolvem a decomposição de materiais, porém ocorrem por mecanismos distintos e apresentam diferentes resultados. (Folino *et al.*, 2020). A degradação refere-se ao processo no qual um material sofre fragmentação ou quebra em partículas menores, sem que haja, necessariamente, sua completa transformação em substâncias ambientalmente ou inofensivas. Esse processo pode ser induzido por fatores como calor, umidade, luz solar e a ação de enzimática, que promovem o encurtamento e o enfraquecimento da estrutura do polímero, resultando em fragmentos menores e resíduos persistentes de difícil assimilação ambiental (Mohee *et al.*, 2008). Assim, a embora a degradação promova a desintegração física do material, ela pode deixar resíduos que permanecem no ambiente por longos períodos.

Já a biodegradação é um processo natural e mais complexo, no qual compostos orgânicos são transformados em substâncias mais simples e reintegrados aos ciclos biogeoquímicos do meio ambiente. Nesse processo, o material é decomposto por ação de microrganismos, como bactérias, fungos e algas em ambientes específicos, incluindo solo, ambientes marinhos, sistemas aquáticos, ou durante a compostagem. Sob condições aeróbias (presença de oxigênio) , os produtos finais de biodegradação incluem dióxido de carbono, água e biomassa, enquanto em condições anaeróbias (ausência de oxigênio) são formados metano, água e biomassa (Bilo *et al.*, 2018; Mohee *et al.*, 2008).

O processo de biodegradação dos bioplásticos pode ser dividido em três etapas principais: biodeteriorização, biofragmentação e assimilação (Emadian; Onay; Demirel, 2017; Folino *et al.*, 2020; Harrison *et al.*, 2018):

- 1) **Biodeterioração:** nesta primeira etapa, os bioplásticos começam a sofrer alterações iniciais devido à atividade biológica dos microrganismos. O que acontece é

uma mudança nas propriedades químicas, físicas e mecânicas dos polímeros que compõem os bioplásticos ocorrendo principalmente na superfície do material, onde microrganismos, como bactérias e fungos, interagem diretamente com os polímeros. A porosidade do material desempenha papel fundamental nessa fase, uma vez que materiais mais porosos facilitam a penetração microbiana e a ação de enzimas degradativas.

2) **Biofragmentação:** durante essa etapa, os microrganismos intensificam sua ação sobre os polímeros, promovendo a quebra das longas cadeias de moléculas em unidades menores, chamadas de oligômeros e monômeros, principalmente por meio da ação enzimática. Esses fragmentos apresentam menor massa molecular e maior disponibilidade para assimilação biológica, preparando o material para a etapa subsequente.

3) **Assimilação:** Na etapa final, os oligômeros e monômeros formados durante a biofragmentação são assimilados pelos microrganismos e utilizados como fonte de energia e nutrientes para o metabolismo celular. Esse consumo resulta na conversão do material polimérico em produtos finais da biodegradação, como dióxido de carbono (CO_2), água (H_2O) e biomassa microbiana, correspondendo à incorporação dos elementos do polímero aos ciclos naturais da matéria.

Essas três etapas formam o ciclo de biodegradação dos bioplásticos, transformando-o em compostos simples e ambientalmente seguros, desde que o processo ocorra sob condições adequadas, como presença de umidade, oxigênio e atividade microbiana.

Dessa forma, a biodegradação desempenha um papel essencial na reciclagem dos elementos na biosfera, assegurando sua devolução aos ciclos naturais. Esse processo é influenciado por diversos fatores depende de alguns fatores, como umidade, temperatura, teor de oxigênio, pH, tempo de exposição, disponibilidade de nutrientes, radiação UV e presença de microrganismos. Além disso, característica físico-químicas, como espessura, hidrofobicidade, peso molecular, cristalinidade e ponto de fusão, exercem influência significativa sobre a taxa e a eficiência da biodegradação, (Folino, Pangallo e Calabrò, 2023), conforme detalhado a seguir:

- A espessura do material é um fator determinante, uma vez que materiais mais espessos apresentam menor área superficial em relação ao seu volume, o que dificulta o acesso de microrganismos e enzimas degradativas. Assim, bioplásticos mais finos ou com maior área de superfície tendem a ser biodegradados mais rapidamente.

- A hidrofobicidade refere-se à tendência do material em repelir a água. Bioplásticos mais hidrofóbicos (menos atraentes para a água) podem dificultar a ação microbiana e enzimática, visto que a presença de água é fundamental para reações de hidrólise e para a mobilização de substâncias biodegradáveis. Em contraste, materiais mais hidrofílicos (com maior afinidade por água) favorecem a penetração de água e, conseqüentemente, a atividade microbiana.
- O peso molecular refere-se ao tamanho das moléculas de polímero que formam o bioplástico. Polímeros com alto peso molecular apresentam cadeias mais longas e mais resistentes, exigindo maior tempo e maior atividade enzimática para sua degradação. Por outro lado, polímeros com menor peso molecular possuem cadeias mais curtas, que são mais facilmente fragmentadas por microrganismos.
- A cristalinidade descreve o grau de organização das cadeias poliméricas no material. Bioplásticos com alta cristalinidade possuem uma estrutura mais compacta e organizada, o que dificulta a ação de microrganismos e enzimas às ligações químicas. Em contrapartida, materiais com menor cristalinidade ou estrutura predominantemente amorfa tendem a ser mais suscetíveis à biodegradação.
- O ponto de fusão do biopolímero, definido como a temperatura na qual ocorre a transição do estado sólido para líquido, também influencia sua biodegradabilidade. Materiais com menor ponto de fusão podem sofrer amolecimento ou degradação mais rapidamente em ambientes com variações térmicas, enquanto aqueles com pontos de fusão mais elevados tendem a apresentar maior estabilidade, retardando o processo degradativo.

Como mencionado, a biodegradabilidade dos bioplásticos, entendida como a capacidade desses materiais de se decompor por ação de organismos vivos, depende fortemente das condições ambientais às quais são expostos. Assim a compreensão integrada dos fatores ambientais e das propriedades físico-químicas que governam esse processo é fundamental para a avaliação do impacto ambiental dos bioplásticos e para o desenvolvimento de materiais mais eficientes e sustentáveis. O estudo dessas condições e de suas interações constitui, portanto, um campo em expansão, com potencial para fornecer soluções mais eficazes para o uso e o descarte adequado desses materiais (Folino *et al.*, 2020).

2.4 Amido de batata inglesa como matéria-prima

A batata (*Solanum tuberosum*) é amplamente reconhecida como um alimento de elevado valor energético, devido ao seu alto teor de carboidratos. No entanto, além dessa função energética, o tubérculo também se destaca por seu conteúdo nutricional relevante, incluindo proteínas e sais minerais essenciais. Composta predominantemente por água (aproximadamente 80%), a batata apresenta em sua fração sólida cerca de 16% de carboidratos, sendo o amido o principal componente. Esse polissacarídeo, em suas diferentes formas, é convertido em glicose no organismo humano por meio da hidrólise enzimática, desempenhando papel fundamental no fornecimento de energia (Suinaga; Pereira, 2015)

O amido extraído da batata inglesa (*Solanum tuberosum*) tem sido amplamente investigado como matéria-prima promissora para a produção de bioplásticos, devido à sua combinação de propriedades funcionais, ampla disponibilidade e caráter sustentável. Trata-se de um polissacarídeo amplamente disponível na natureza e considerado uma das matérias-primas mais promissoras para a produção de polímeros biodegradáveis, em razão de sua abundância, não toxicidade, bioegradabilidade, comestibilidade, baixo custo de comercialização, elevada capacidade de formação de gel e capacidade renovável (Carniel *et al.*, 2023; Kowser *et al.*, 2025). Quando submetido à ação de calor e à presença de plastificantes, o amido pode ser processado como um material termoplástico, característica que amplia suas possibilidades de aplicação industrial. Estruturalmente, o amido apresenta-se sob a forma de grânulos, conferindo à molécula um certo grau de organização, o que resulta em um comportamento parcialmente cristalino e influencia diretamente suas propriedades físico-químicas e sua performance como biopolímero (Jacobs *et al.*, 2020).

No contexto da produção de bioplásticos e de pesquisas envolvendo polímeros naturais, o amido proveniente do tubérculo da batata inglesa é, de modo geral, preferencialmente empregado em relação ao amido obtido das cascas. Essa escolha fundamenta-se, sobretudo, na maior concentração, pureza e estabilidade das propriedades físico-químicas do amido presente no tubérculo quando comparado àquele oriundo da casca.

O tubérculo apresenta elevado teor de amido, podendo corresponder a aproximadamente 75–80 % da matéria seca, conforme reportado por Dupuis e Liu (2019). Essa elevada concentração confere ao tubérculo um substrato amiláceo de maior pureza

e uniformidade favorecendo sua aplicação em processos industriais e em pesquisas científicas que demandam reprodutibilidade e propriedades funcionais bem definidas. Em contrapartida, as cascas da batata, embora representem uma fração significativa da biomassa residual, aproximadamente 14–40 % do peso do tubérculo fresco, apresentam composição mais heterogênea, com menores proporções relativas de amido e maior presença de fibras, proteínas, lipídios e lignina (Kot *et al.*, 2020; Medina-Jaramillo *et al.*, 2025).

Dessa forma, para aplicações que requerem elevado controle de rendimento, pureza e uniformidade, como a produção de filmes bioplásticos, torna-se necessária a realização de etapas adicionais de fracionamento e purificação do amido, uma vez que a presença de componentes não amiláceos pode comprometer o desempenho do material final.

A presença de componentes não amiláceos nas cascas, como fibras alimentares, compostos fenólicos e outros carboidratos complexos, pode interferir nas propriedades reológicas e na funcionalidade do amido extraído, afetando características relevantes dos materiais poliméricos, tais como resistência mecânica, permeabilidade ao vapor de água e comportamento termoplástico (Lopes *et al.*, 2021). Dessa forma, estudos que objetivam avaliar as propriedades intrínsecas do amido — como gelatinização, viscosidade e capacidade de formação de filmes — tendem a evitar fontes com elevada variabilidade composicional, priorizando o uso do amido isolado do tubérculo, cuja caracterização é mais estável e amplamente documentada na literatura científica

Não obstante, as cascas de batata representam um recurso promissor no contexto da valorização de resíduos agroindustriais, uma vez que contêm diversos compostos de interesse tecnológico e nutricional. Estudos têm demonstrado que as cascas são ricas em compostos bioativos, incluindo fenólicos, glicocaloides e polissacarídeos, bem como fibras dietéticas, o que confere a esse resíduo potencial de aplicação em diferentes setores industriais e farmacêuticos (Martínez; Gullón; Yáñez, 2021; Vescovo *et al.*, 2025). Essa composição diversa possibilita a utilização das cascas não apenas como fonte de fibras ou extratos funcionais, mas também como material de reforço em biocompósitos, agregando propriedades mecânicas e estruturais específicas quando combinadas com matrizes poliméricas, como filmes de amido termoplástico derivados de outras partes do vegetal (Medina-Jaramillo *et al.*, 2025).

Contudo, quando o objetivo principal é a obtenção de amido com alto teor e funcionalidade bem definida, o tubérculo da batata inglesa permanece como a fonte mais

adequada e prática para pesquisas acadêmicas e aplicações tecnológicas, em virtude de sua maior concentração amilácea e pureza comparativa.

As principais características do amido, principal matriz dos bioplásticos, são apresentadas no tópico seguinte.

2.5 Estrutura química do amido: amílose e amilopectina

O amido é um biopolímero polissacarídeo natural que serve como uma importante fonte de carboidrato na dieta humana, derivado principalmente de várias fontes vegetais, tais como cereais (arroz, trigo, aveia, milho), raízes (mandioca) e tubérculos (batata, batata-doce, inhame) (Jacobs *et al.*, 2020; Paula e Kringel, 2021,).

Estruturalmente, o amido é um homopolissacarídeo, ou seja, um polissacarídeo constituído de um tipo de monossacarídeo, organizado na forma de grânulos e composto por unidades repetidas de glicose ($C_6H_{12}O_6$). Esses grânulos “podem variar em tamanho, forma, estrutura e composição química, dependendo de sua origem botânica” (Paula; Kringel, 2021, p.46). A tabela 1 apresenta as principais características dos grânulos de amido provenientes de diferentes espécies vegetais.

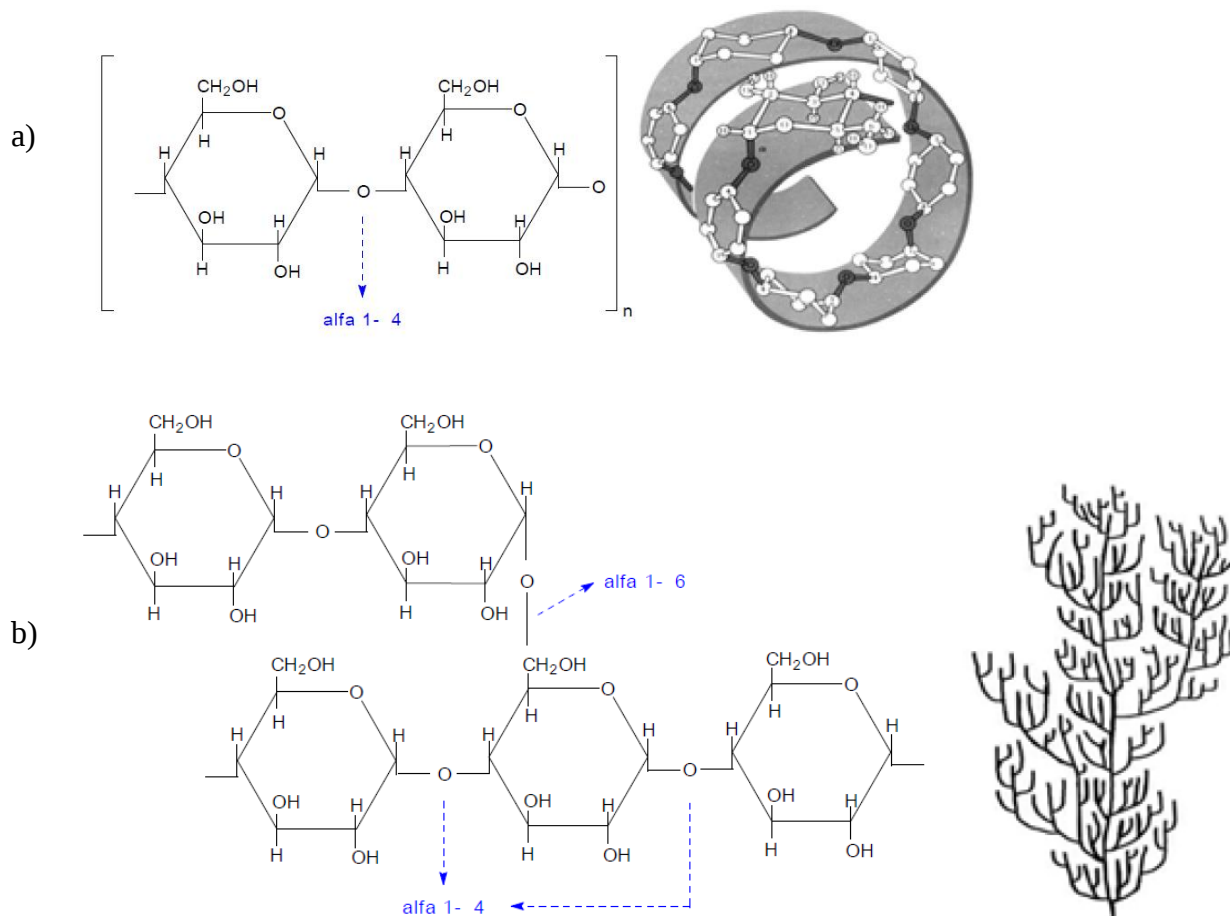
Tabela 1: Características dos grânulos de amido de diferentes espécies vegetais.

Origem botânica	% do amido (base seca)	Forma	Tamanho (µm)
Arroz	76,0-90,0	Poliédrico	Poliédrico
Trigo	65,0-77,0	Lenticular e esférico	2,0-10,0/10,0-35,0
Aveia	56,0-60,0	Poligonal	18,0-29,0
Milho	70,0-73,0	Poliédrico e esférico	7,0-25,0
Mandioca	25,0-30,0	Oval	3,0-43,0
Batata	10,0-25,0	Lenticular	10,0 – 110,0

Fonte: Adaptado de: Halal, El *et al.*, 2019

Esse polissacarídeo é formado por duas frações principais: amilose e amilopectina (Figura 3), que têm propriedades e estruturas químicas distintas, mas complementares, resultando em um material altamente funcional e eficiente (Alves, 2016; Jacobs *et al.*, 2020).

Figura 3 - Estrutura da amilose e representação helicoidal (a) e da amilopectina e seus formatos com ramificação (b)



Fonte: Adaptado de (Moraes, 2009; Nelson e Cox, 2014)

A amilose (figura 3a) é uma molécula predominantemente linear, composta por unidades de glicose ligadas por ligações α -glicosídicas α - (1,4), apresentando baixo grau de ramificações que não exercem influência significativa sobre suas propriedades físicas. Essa fração apresenta peso molecular elevado (150.000 a 600.00 daltons) e comprimento médio da cadeia da ordem de 10^3 unidades de glicose. A ligação entre as unidades de glicose na amilose ocorre entre o C1 de uma molécula de glicose e o C4 da molécula adjacente. A letra " α " indica que a ligação é do tipo alfa, ou seja, a orientação do grupo hidroxila (-OH) no carbono anomérico (C1) é para baixo, em relação ao anel cíclico de glicose. Essas ligações conferem à amilose uma estrutura helicoidal ou espiral, aspecto relevante para seu comportamento físico e função biológica (Franco *et al.*, 2001; Liberato, 2020).

Os amidos podem ser classificados, de acordo com o teor de amilose, em amidos cerosos, normais e com elevado teor de amilose. A variação no conteúdo de amilose

influencia as propriedades físicas e funcionais do amido, como a solubilidade, a gelatinização e a formação de géis (Paula e Kringel, 2021).

O amido ceroso possui um teor muito baixo de amilose, cerca de 1%, a exemplo do amido de amaranto, que tem características particulares e desejadas pela indústria alimentícia, como a gelatinização em temperaturas mais baixas, elevada clareza de pasta e pico de viscosidade moderado. O amido normal tem um teor de amilose entre 17% e 24%, sendo encontrado na maioria das fontes comerciais, como milho, batata e trigo. Já o amido com alto teor de amilose contém aproximadamente 70% ou mais dessa fração, apresentando propriedades diferenciadas (Olagunju; Omoba, 2024; Paula e Kringel, 2021).

Por outro lado, a amilopectina (Figura 3b) corresponde a fração ramificada do amido e constitui a maior parte da molécula, variando em proporção conforme a fonte botânica. É formada por unidades de D-glicose (monômeros de açúcar) ligadas por ligações α -1,4, que compõem as regiões lineares e α -1,6, responsáveis pelas ramificações. A amilopectina apresenta grau de polimerização (quantidade de unidades de glicose que formam a molécula) da ordem de 10^4 a 10^5 , ou seja, a molécula pode conter de 10.000 a 100.000 unidades de glicose em sua estrutura, o que a caracteriza como uma macromolécula altamente complexa. Seu peso molecular vai de 1 a 6 milhões de daltons, dependendo da fonte do amido. O comprimento médio das ramificações corresponde a aproximadamente 20 a 25 unidades de glicose, influenciando diretamente nas propriedades como solubilidade e interação com a água durante os processos de aquecimento e resfriamento (Franco *et al.*, 2001; Polesi, 2011).

Segundo Liberato (2020) as propriedades físicas e biológicas da amilopectina são profundamente afetadas pela presença de 4 a 5% de ligações intercadeias (ligações entre diferentes cadeias de glicose). Há fortes evidências de que a amilopectina seja a principal responsável pela cristalinidade do grânulo de amido. Essas ligações contribuem para a estabilidade da estrutura tridimensional da amilopectina, influenciando a formação e o comportamento das regiões cristalinas, o que afeta diretamente características como textura, viscosidade e opacidade dos produtos derivados do amido. O quadro 1 apresenta um resumo comparativo das principais diferenças entre as duas frações constituintes do amido: amilose e amilopectina.

Quadro 1: Principais diferenças da amilose e amilopectina

Características	Amilose	Amilopectina	Referências
Estrutura	Linear (cadeias não ramificadas)	Ramificada (cadeias principais com ramificações)	Franco <i>et al.</i> , 2001; Liberato, 2020)
Tipo de ligação	α -1,4 (ligações glicosídicas lineares)	α -1,4 (linha) e α -1,6 (ramificações)	(Franco <i>et al.</i> , 2001)
Proporção do amido (varia com a conte botânica)	20% a 30% do amido total	Aproximadamente 70% a 80% do amido total	(Franco <i>et al.</i> , 2001; Gonçalves, 2007)
Estrutura	Hélice/Espiral	Tridimensional	(Franco <i>et al.</i> , 2001)
Propriedade de viscosidade	Menor viscosidade	Maior viscosidade devido à ramificação	(Paula e Kringel, 2021)
Hidrólise	Hidrolisada pela enzima α -amilase nas ligações α -1,4	Hidrolisada pela β -amilase nas ligações α -1,4 e pelas enzimas pululanase ou isoamilase nas ramificações α -1,6	(Paula e Kringel, 2021; Torres, Leonel e Mischan, 2012)

Fonte: Elaboração própria

Convém destacar que o arranjo das moléculas de amilose e amilopectina nos grânulos de amido resulta na formação de zonas com diferentes densidades. A região onde a amilopectina se concentra é caracterizada por uma estrutura mais densa e cristalina (Jacobs *et al.*, 2020). “Sendo mais compacta dificulta a entrada de moléculas, como as de água e enzimas, apresentando-se portanto mais resistente ao processo de hidrólise” (Franco *et al.*, 2001, p.127).

Tendo em vista os dados descritos acima, destaca-se que a hidrólise corrobora na explicação de como as enzimas atuam sobre as frações do amido e como essas reações podem ser controladas para gerar produtos específicos. Assim, a α -amilase é uma enzima que catalisa a hidrólise (quebrada em unidades menores) de ligações α -1,4-glicosídicas em moléculas de amido, produzindo glicose e outros oligossacarídeos. Já a amilopectina pode ser hidrolisada por diferentes enzimas, dependendo da localização das ligações glicosídicas. O processo de hidrólise ocorre da seguinte forma: a β -amilase atua sobre a porção linear da amilopectina, ou seja, as cadeias de glicose unidas por ligações α -1,4. A β -amilase quebra essas ligações, produzindo dextrinas limites, que são cadeias residuais da amilopectina que ainda contêm os pontos de ramificação (ligações α -1,6). Pululanase

e Isoamilase: Quando a pululanase ou a isoamilase atuam sobre as ramificações da amilopectina, elas quebram as ligações α -1,6, que são responsáveis pela formação das ramificações. Isso resulta na produção de maltose, que é um disacarídeo formado por duas moléculas de glicose (Paula e Kringel, 2021).

2.6 Propriedades funcionais do amido

É importante destacar que os grânulos de amido apresentam uma organização supramolecular composta por duas regiões distintas: regiões cristalinas e amorfas (Jacobs et al., 2020; Souza, 2019). As regiões cristalinas são formadas predominantemente pelas cadeias lineares da amilopectina, que se organizam em duplas hélices altamente ordenadas. Essas regiões desempenham papel essencial na estabilidade estrutural do grânulo, bem como na resistência à penetração de água e à ação de agentes químicos e enzimáticos. Por sua vez, as regiões amorfas são constituídas principalmente pela amilose e pelos pontos de ramificação da amilopectina, contribuindo para a heterogeneidade estrutural do amido e funcional do amido.

O tamanho e a forma dos grânulos de amido, a proporção dentre amilose e amilopectina, bem como a presença e a natureza de outros componentes influenciam de maneira significativa propriedades como viscosidade, clareza da pasta, solubilidade, a capacidade de retenção de água, gelatinização e retrogradação (Franco *et al.*, 2001; Paula; Kringel, 2021).

A viscosidade do amido corresponde a uma propriedade observada após a formação de pastas, obtidas pelo aquecimento de dispersões aquosas de amido e a temperatura de gelatinização (Paula; Kringel, 2021). Durante o aquecimento, as pontes de hidrogênio que mantêm os grânulos coesos se rompem, permitindo que os grupos hidroxilas, das unidades de glicoses das áreas cristalinas sejam hidratados. Com isso, o grânulo de amido incha progressivamente até atingir a temperatura de gelatinização, quando sua estrutura cristalina perde a coesão devido ao rompimento contínuo dessas interações. Em muitos casos, os grânulos podem perder parcial ou totalmente sua integridade estrutural, resultando em aumento expressivo da viscosidade da pasta. Amidos provenientes de diferentes fontes botânicas, como batata, trigo e milho, apresentam variações tanto nas temperaturas de gelatinização quanto nos valores máximos de viscosidade.

Os fatores que influenciam a viscosidade das pastas de amido incluem suas características físico-químicas, a concentração da dispersão e a composição dos grânulos. A presença de lipídios ou fosfolipídeos complexados com a amilose, por exemplo, pode reduzir a capacidade de hidratação e o intumescimento dos grânulos, diminuindo a viscosidade. Em contraste, amidos com elevado teor de amilopectina apresentam maior capacidade de intumescimento, favorecendo o aumento da viscosidade em temperaturas mais baixas. Já amidos com alto teor de amilose tendem a apresentar viscosidade máxima mais baixa, devido à menor proporção de amilopectina e à formação de complexos amilose-lipídios; entretanto, após o resfriamento, a amilose contribui significativamente para a formação de géis mais firmes (Franco et al., 2001; Paula; Kringel, 2021).

A clareza das pastas de amido é outro fator relevante para a aceitação de produtos alimentícios, visto que a opacidade ou translucidez pode ser desejável em diferentes aplicações. Amidos com maior tendência à retrogradação, ou seja, que recristalizam à medida que a pasta esfria, geralmente originam pastas mais opacas, devido ao agrupamento das moléculas de amido, que dificulta a passagem de luz (Souza, 2019). Por outro lado, a presença de cadeias relativamente curtas de amilose e amilopectina também pode aumentar a opacidade, pois limita a formação de estruturas altamente ordenadas que favoreceriam a translucidez (Alcázar-Alay; Meireles, 2015). Além disso, a origem botânica exerce influência direta: amidos de batata e mandioca tendem a formar pastas mais claras, enquanto amidos de cereais, como milho e trigo, geralmente produzem pastas mais opacas, em função da presença de lipídios e proteínas associadas.

Assim, amidos com altos teores de amilose, como os de milho, trigo e arroz, formam pastas mais opacas e com maior tendência à formação de géis durante o resfriamento. Em contraste, os amidos de batata e mandioca, que apresentam menores teores de amilose, formam pastas mais claras e, embora apresentem aumento de viscosidade com o resfriamento, não originam géis tão densos ou opacos (Paula; Kringel, 2021). Além disso, os amidos cerosos, ricos em amilopectina, comportam-se de maneira semelhante aos amidos de batata e mandioca, apresentando menor tendência à retrogradação. A adição de açúcares, como sacarose e glicose, pode aumentar a transparência das pastas, enquanto a adição de sais, como cloreto de sódio, pode elevar a opacidade, especialmente em amidos de batata (Souza, 2019).

Para a avaliação da clareza das pastas de amido, um parâmetro frequentemente empregado é a transmitância, que expressa a porcentagem de luz transmitida por uma dispersão diluída de amido (geralmente 1% m/m) em um comprimento de onda

específico, como 650 nm (Alcázar-Alay; Meireles, 2015). Segundo esses autores produtos como o amido de batata apresentam transmitância entre 42 e 96%, sendo classificados como pastas de alta claridade, enquanto o amido de mandioca apresenta valores entre 51 e 81%.

O inchamento e a solubilidade do amido em água estão diretamente relacionados ao tamanho e à estrutura dos grânulos de amido. Grânulos menores, como os encontrados no amido de amaranto, tendem a apresentar menor capacidade de inchamento e solubilidade, enquanto grânulos maiores, como os do amido de milho, banana e trigo, mostram-se mais solúveis em água quente (a 95 °C). De maneira geral, os grânulos de amido nativo são insolúveis em água fria. Entretanto, quando aquecidos em excesso de água, as moléculas de amido começam a se reorganizar, resultando na quebra de sua estrutura semicristalina e na associação de moléculas de água com os grupos hidroxila presentes nas cadeias de amilose e amilopectina, o que causa o intumescimento e aumenta tanto o tamanho quanto a solubilidade dos grânulos (Paula e Kringel, 2021).

O intumescimento do amido está fortemente associado ao conteúdo de amilopectina, uma vez que sua estrutura altamente ramificada favorece a absorção de água e o aumento do volume dos grânulos. Em contrapartida, a amilose, devido à sua conformação predominantemente linear, tende a atuar como um agente limitante do inchamento, contribuindo para a estabilização estrutural do grânulo. Durante o aquecimento em meio aquoso, ocorre a desorganização das regiões cristalinas da amilopectina, caracterizadas por arranjos em dupla hélice, com ruptura das ligações de hidrogênio. Esse processo facilita a lixiviação parcial da amilose para a fase contínua, contribuindo para o aumento da viscosidade e da solubilidade da suspensão de amido (Paula e Kringel, 2021; Prestes, 2013).

A gelatinização do amido é um processo irreversível que resulta na transformação dos grânulos de amido em uma pasta viscoelástica, ocorrendo na presença de um excesso de água. Esse fenômeno envolve a perda da cristalinidade e da ordem molecular do grânulo, promovida pela ruptura das ligações de hidrogênio que, inicialmente, mantinham sua estrutura intacta (Jacobs *et al.*, 2020). O processo tem início no hilo do grânulo, a partir do qual ocorre um rápido inchaço em direção à periferia, manifestando-se inicialmente nas regiões amorfas, em detrimento das regiões cristalinas, devido à maior fragilidade das ligações de hidrogênio (Denardin; Silva, da, 2009; Singh *et al.*, 2003).

As características de intumescimento e gelatinização são influenciadas por diversos fatores estruturais e composicionais, como a estrutura molecular da amilopectina (incluindo o comprimento da cadeia unitária, extensão da ramificação, o peso molecular e a polidispersidade), além da composição do amido e a arquitetura do grânulo, especialmente a proporção entre regiões cristalinas e amorfas. A amilopectina é o principal componente responsável pela formação das regiões cristalinas dos grânulos de amido. Por sua vez, a presença de amilose contribui para a redução do ponto de fusão dessas regiões cristalinas e diminui a energia necessária para o início do processo de gelatinização (Singh *et al.*, 2003).

Esse processo é fundamental na produção de biofilmes, especialmente em aplicações como embalagens biodegradáveis. Após a gelatinização, o amido forma uma pasta que pode ser moldada para criar filmes flexíveis e resistentes, características essenciais para a produção de biofilmes com boas propriedades de resistência e elasticidade. Além disso, o amido pode ser combinado com outros materiais, como glicerol e polímeros naturais, para melhorar suas propriedades de barreira contra umidade e oxigênio, tornando-o uma alternativa ecológica aos plásticos convencionais (Brazeiro e Imthorn, 2021).

Quando o amido gelatinizado é armazenado e resfriado, ele pode passar por um processo conhecido como retrogradação. Nesse processo, as moléculas de amido perdem energia, fortalecendo as ligações de hidrogênio e promovendo a reassociação das cadeias em uma estrutura mais ordenada. A reassociação leva ao enredamento e à formação de zonas de junção entre as moléculas de amido, o que resulta na criação de áreas cristalinas dentro do gel. À medida que essas áreas cristalinas se desenvolvem, o índice de refração do gel é alterado. Assim, a luz que passa pelo gel se comporta de maneira diferente, resultando em um aumento da opacidade do gel. Como consequência, o gel torna-se progressivamente mais turvo à medida que a retrogradação avança (Denardin; Silva, da, 2009)

Além disso, o processo de reassociação das moléculas de amilose pode resultar na sinérese, definida como a expulsão de água do gel. A sinérese ocorre quando as moléculas de amido se reorganizam, formando uma estrutura mais compacta, o que leva à contração da rede polimérica e à liberação de água. A quantidade de água liberada durante o armazenamento é um fator determinante para a intensidade da sinérese, influenciando a textura e a consistência do gel ao longo do tempo (Weber, Queiroz e Chang, 2008).

Como discutido, a combinação das duas frações, amilose e amilopectina, confere ao amido características únicas, amplamente exploradas em aplicações industriais e alimentícias, incluindo a produção de bioplásticos. O amido apresenta propriedades que permitem sua modificação para a obtenção de biopolímeros, destacando-se a capacidade de gelificação, a biodegradabilidade e a flexibilidade. A biodegradabilidade dos biofilmes de amido representa uma vantagem relevante, possibilitando a substituição de plásticos derivados do petróleo por materiais mais sustentáveis. Esses biofilmes apresentam diversas aplicações, especialmente nas indústrias alimentícia e farmacêutica, onde podem ser empregados como materiais de embalagem ecológicos e funcionais.

2.7 Estudos sobre a produção de bioplásticos a partir de amidos de diferentes fontes vegetais

A utilização de fontes botânicas para a produção de bioplásticos tem se destacado como uma alternativa promissora diante da crescente demanda por materiais sustentáveis. Nesse contexto, o amido extraído de matérias-primas como a mandioca, o milho, as sementes de jaca e a batata inglesa vem sendo amplamente investigado em diversos estudos, com o objetivo de promover a conscientização ambiental e aprimorar as propriedades físico-químicas, térmicas e mecânicas dos bioplásticos.

No estudo conduzido por Jacobs *et al.* (2020), foram desenvolvidos biofilmes biodegradáveis à base de amido de mandioca incorporados com polpa de acerola. A pesquisa teve como objetivo avaliar os efeitos dessa adição por meio de análises de espessura, solubilidade em água e microscopia eletrônica de varredura (MEV), além de testes aplicados em peras para verificar a capacidade antioxidante dos filmes. Os resultados indicaram que a incorporação de acerola promoveu aumento gradativo da espessura dos filmes — de 0,30 mm (sem acerola) para 0,37 mm (com 50% de acerola) — bem como redução da solubilidade em água de 30% para 24% no mesmo intervalo de formulação, evidenciando a melhoria nas propriedades funcionais do biopolímero.

Bertotto *et al.*, (2022) também contribuíram para o avanço da pesquisa ao sintetizar filmes biodegradáveis com propriedades antioxidantes, antibacterianas e mecânicas, empregando uma mistura de amido de mandioca e extrato de subproduto de própolis. O material foi caracterizado por cromatografia gasosa para análise de compostos voláteis, visando aplicações em embalagens de alimentos. A inserção do extrato foi controlada até a concentração de 4%, em razão do alto teor de fibras do subproduto, que

poderia comprometer a resistência à tração dos biofilmes secos. Os resultados demonstraram melhorias significativas nas propriedades mecânicas, especialmente tração e elasticidade, além de elevada capacidade antioxidante e ação bactericida. A análise química revelou ampla gama de compostos voláteis, evidenciando o potencial do reaproveitamento de subprodutos de própolis na formulação de bioplásticos funcionais e sustentáveis.

Complementarmente, Kowser *et al.* (2025) desenvolveram dois tipos de filmes bioplásticos: um à base de amido de milho puro e outro contendo amido de milho reforçado com prata metálica. Enquanto o amido de milho apresenta biodegradabilidade intrínseca, a adição de prata reduziu a absorção de água, aumentou as propriedades de barreira e conferiu ação antimicrobiana, aspecto fundamental para embalagens de alimentos. As análises morfológicas, térmicas, antibacterianas e de biodegradabilidade confirmaram que o reforço com prata amplia o espectro de aplicações do bioplástico de milho como alternativa aos plásticos petroquímicos convencionais.

Silva, Brinques e Gurak, (2020) desenvolveram e caracterizaram filmes biodegradáveis de amido de milho contendo farinha de subproduto de brotos (feijão, alfafa, amaranto, brócolis, rabanete e predominantemente trevo). A farinha, obtida por secagem a 50 °C com circulação forçada de ar, apresentou coloração marrom-clara, alta capacidade de retenção de água, baixa solubilidade e elevado teor de fibras. A adição dessa farinha às soluções filmogênicas, em proporções de 2,5% a 10% em relação ao amido, promover alterações nos parâmetros de cor, índice de solubilidade em água e temperatura de fusão dos filmes, sem afetar a solubilidade em ácido e óleo. Os resultados indicam que esse subproduto pode atuar como insumo para melhoria das propriedades tecnológicas dos biofilmes, além de promover o reaproveitamento de resíduos agroindustriais.

Já o trabalho de Santana *et al.*, (2018) explorou a produção de bioplásticos a partir do amido de semente de jaca plastificado com glicerol. As concentrações de amido variaram de 2% a 6% (p/p) e as de glicerol, de 20 a 60 g/100 g de amido. Obtidos pelo método de fundição, os filmes foram caracterizados quanto à cor, propriedades mecânicas, solubilidade, permeabilidade ao vapor de água, morfologia e energia livre de interação hidrofóbica. As micrografias eletrônicas revelaram a presença de grânulos de amido intactos, e os bioplásticos apresentaram comportamento hidrofílico, especialmente nas formulações com 6% de amido e 40% de glicerol. A solubilidade variou de 16,42%

a 23,26%, sendo diretamente proporcional à concentração de amido além de se observar aumento na opacidade e variação na coloração conforme o teor de amido.

Adicionalmente, o estudo de Basiak, Lenart e Debeaufort (2017) contribuiu de forma significativa ao demonstrar como a composição do amido influencia diretamente a estrutura e as propriedades dos filmes biodegradáveis. Ao comparar amidos de milho, trigo e batata, os autores observaram que o maior teor de amilose (27% no milho) resulta em filmes mais espessos e heterogêneos, enquanto a predominância de amilopectina (cerca de 80% na batata) está associada a filmes mais finos, densos e homogêneos. A espessura dos filmes influencia diretamente sua transparência, sendo os filmes de batata mais transparentes, e os de milho e trigo mais opacos. Além disso, o elevado teor de amilopectina no amido de batata favorece menor solubilidade em água, menor permeabilidade ao vapor e ao oxigênio, bem como melhores propriedades mecânicas e de barreira, reforçando seu potencial na produção de produtos biodegradáveis.

A batata como matéria-prima para a produção de bioplásticos no Brasil revela-se estratégica tanto do ponto de vista técnico quanto socioeconômico. Trata-se da hortaliça de maior relevância no país, com produção anual estimada em cerca de 3,5 milhões de toneladas, cultivada em aproximadamente 130 mil hectares distribuídos por sete estados (MG, SP, PR, RS, SC, GO e BA), envolvendo mais de 5 mil produtores (Suinaga e Pereira, 2015). Esse expressivo volume produtivo, aliado à ampla distribuição geográfica, evidencia o potencial de aproveitamento de excedentes e subprodutos da cadeia produtiva como fonte de amido para aplicação em biopolímeros. Além disso, a incorporação de tecnologias sustentáveis, como o desenvolvimento de bioplásticos à base de amido de batata, contribui para a agregação de valor à cultura, a diversificação de usos industriais e o fortalecimento da competitividade do agronegócio brasileiro.

2.8 Filmes bioplásticos à base de amido de batata funcionalizado com extrato de repolho roxo

A incorporação de extratos vegetais ricos em compostos fenólicos em matrizes poliméricas à base de amido tem sido amplamente investigada como uma estratégia promissora para a obtenção de filmes biodegradáveis com propriedades funcionais adicionais, sobretudo no que se refere à sensibilidade a variações de pH. Nesse contexto, a funcionalização de bioplásticos com pigmentos naturais permite agregar valor tecnológico a materiais sustentáveis, ampliando suas possibilidades de aplicação.

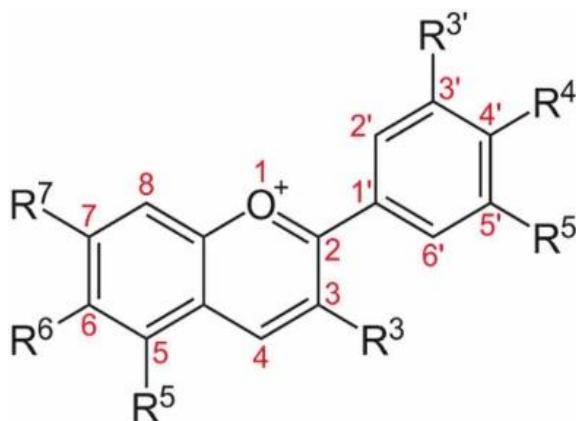
Entre os agentes naturais empregados na formulação de filmes indicadores, o extrato de repolho roxo (*Brassica oleracea* var. *capitata* f. *rubra*) destaca-se pelo seu elevado teor de antocianinas, pigmentos fenólicos hidrossolúveis que apresentam variações cromáticas em resposta às mudanças de pH do meio. A incorporação desses compostos bioativos em matrizes poliméricas biodegradáveis possibilita o desenvolvimento de bioplásticos funcionais capazes de sinalizar visualmente alterações ácido-base, sendo amplamente explorada em sistemas de embalagens inteligentes e sensores colorimétricos (Abedi-firoozjah *et al.*, 2022; Prietto *et al.*, 2017).

Dessa forma, este capítulo discute a produção de filmes bioplásticos funcionalizados com extrato de repolho roxo, com ênfase nos seguintes aspectos: as antocianinas como compostos funcionais, o repolho roxo enquanto fonte natural desses pigmentos, a funcionalização de matrizes poliméricas com corantes naturais e o desenvolvimento de filmes poliméricos com propriedades indicadoras de pH.

2.8.1 Antocianinas como compostos funcionais

As antocianinas constituem uma subclasse dos flavonoides pertencentes ao grupo dos compostos fenólicos hidrossolúveis, sendo amplamente distribuídas em flores, frutos, cereais e hortaliças. Esses pigmentos naturais são responsáveis por uma ampla variedade de colorações observadas nos tecidos vegetais, abrangendo tons de vermelho, púrpura e azul e, em determinadas condições, verde. A variabilidade cromática das antocianinas está diretamente relacionada à sua estrutura química, às condições do meio, especialmente o pH, bem como a fenômenos de copigmentação e complexação com íons metálicos (Castañeda-Ovando *et al.*, 2009).

Do ponto de vista químico-estrutural, as antocianinas correspondem às formas glicosiladas das antocianidinas, enquanto estas últimas representam as formas agliconas. O núcleo estrutural das antocianidinas apresenta um sistema tricíclico formado por dois anéis aromáticos (A e B) ligados a um anel heterocíclico contendo oxigênio (anel C), configuração característica dos flavonoides. Esse arranjo estrutural confere à molécula uma carga positiva localizada no átomo de oxigênio do anel C, originando o denominado cátion flavílio (2-fenilcromenílio), responsável pelas propriedades espectrais e cromáticas desses compostos. A estrutura molecular geral da antocianina é apresentada na Figura 4.

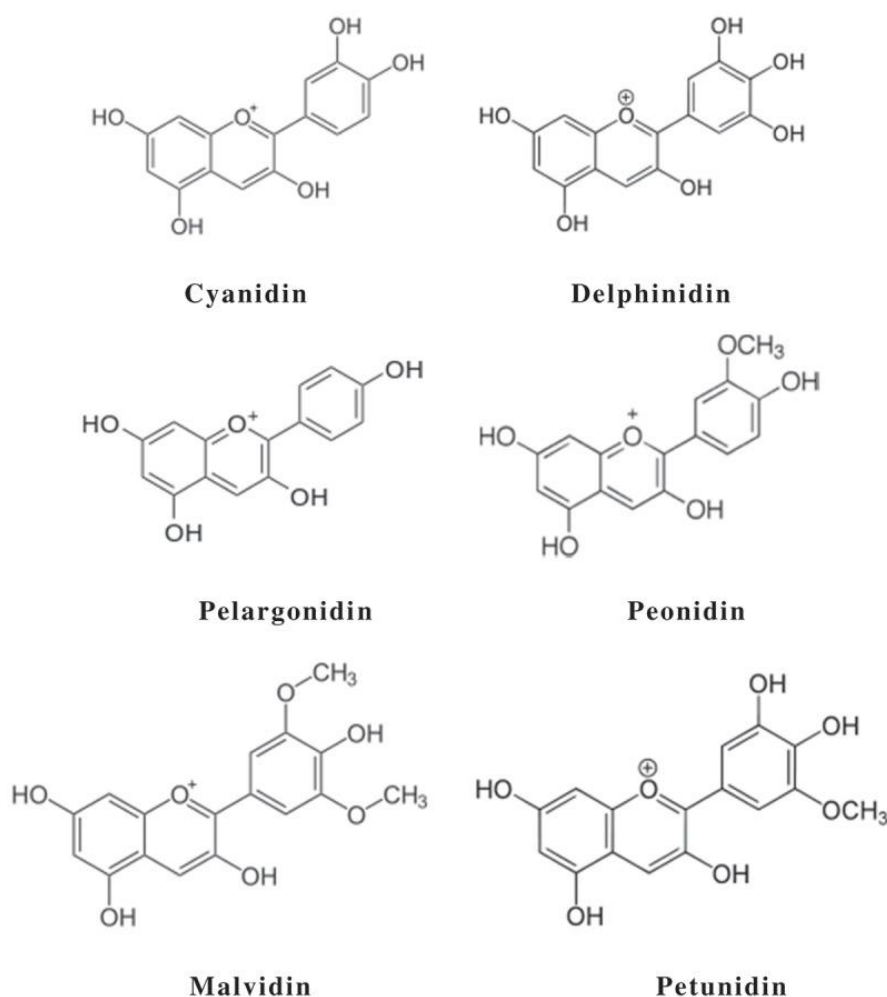
Figura 4 - Estrutura básica da antocianina.

Fonte: (Khoo *et al.*, 2017)

As antocianidinas podem ser classificadas em 3-hidroxi-antocianidinas, 3-desoxiantocianidinas e antocianidinas O-metiladas. Já as antocianinas são encontradas predominantemente na forma de glicosídeos de antocianidina ou como antocianinas aciladas. As antocianinas aciladas apresentam resíduos de ácidos orgânicos ligados às unidades glicosídicas da molécula, podendo ser subdivididas em antocianinas acriladas, cumaroiladas, cafeoiladas e maloniladas, modificações estruturais que influenciam diretamente sua estabilidade química e seu comportamento espectral (Khoo *et al.*, 2017).

Entre as antocianidinas mais frequentemente encontradas na natureza destacam-se cianidina, delphinidina, pelargonidina, peonidina, malvidina e petunidina, que, em conjunto, representam a quase totalidade dos pigmentos desse grupo nos vegetais. As estruturas moleculares dessas antocianidinas são apresentadas na Figura 5.

A cianidina, correspondente a aproximadamente 50% das ocorrências naturais, é um pigmento de coloração vermelho-púrpura (magenta) amplamente distribuído em frutos vermelhos, uvas, milho roxo e repolho roxo (*Brassica oleracea* var. *capitata* f. *rubra*). Este último constitui uma das fontes vegetais mais ricas em derivados de cianidina, especialmente cianidina-3-diglicosídeo-5-glicosídeo. Assim, a cianidina é reconhecida como o principal pigmento responsável pela coloração característica do repolho roxo, justificando sua ampla utilização como fonte natural de antocianinas em estudos envolvendo materiais sensíveis ao pH (Castañeda-Ovando *et al.*, 2009a; Khoo *et al.*, 2017).

Figura 5 - Principais antocianidinas em plantas

Fonte: (Khoo *et al.*, 2017)

A delfinidina apresenta maior número de grupos hidroxila no anel B, resultando em tonalidades azuladas ou púrpuras, principalmente observadas em flores. A pelargonidina, por sua vez, possui menor grau de hidroxilação, originando colorações vermelhas a alaranjadas. As antocianidinas O-metiladas, como peonidina, malvidina e petunidina, apresentam maior estabilidade química, além de tonalidades que variam do magenta ao púrpura intenso. A malvidina, em particular, destaca-se como o principal pigmento responsável pela coloração vermelha de vinhos tintos. Essas variações estruturais influenciam diretamente o comportamento espectral das antocianinas, uma vez que alterações no padrão de substituição dos anéis aromáticos afetam a distribuição eletrônica do núcleo flavílico (Castañeda-Ovando *et al.*, 2009; Khoo *et al.*, 2017)

Em síntese, a diversidade estrutural das antocianidinas e de suas formas glicosiladas explica não apenas a ampla gama de cores observadas nos vegetais, mas

também a elevada sensibilidade desses compostos às variações de pH. Esse comportamento está diretamente relacionado às transformações estruturais do núcleo flavílio e às interconversões entre suas diferentes espécies químicas em solução, constituindo a base química que governa o comportamento espectral das antocianinas em diferentes condições do meio.

2.8.2 Repolho roxo como fonte de antocianinas

O repolho roxo (*Brassica oleracea* var. *capitata* f. *rubra*) destaca-se como uma das fontes vegetais mais ricas e acessíveis de antocianinas, apresentando elevada concentração desses pigmentos na forma de derivados da cianidina, frequentemente acilados com ácidos fenólicos. Essa diversidade estrutural contribui para uma ampla faixa de resposta colorimétrica frente às variações de pH (Abedi-firoozjah *et al.*, 2022).

O perfil químico das antocianinas do repolho roxo confere vantagens adicionais, como elevada solubilidade em meio aquoso e pronunciada variação de cor em intervalos de pH relevantes para aplicações laboratoriais e tecnológicas. O uso de extrato aquoso, em particular, apresenta benefícios significativos, incluindo simplicidade de obtenção, menor custo, ausência de solventes orgânicos tóxicos e alinhamento com os princípios de química verde (Prietto *et al.*, 2017).

Quando comparado a outras fontes naturais de antocianinas, como feijão preto, frutas vermelhas e flores, o repolho roxo apresenta maior estabilidade relativa em sistemas aquosos e resposta visual mais intensa, características que favorece sua aplicação em filmes indicadores de pH (Abedi-firoozjah *et al.*, 2022). Esses aspectos justificam sua ampla utilização em estudos recentes voltados ao desenvolvimento de sensores colorimétricos biodegradáveis.

2.8.3 Funcionalização de matrizes poliméricas com pigmentos naturais

A funcionalização de matrizes poliméricas consiste na incorporação de compostos ativos capazes de conferir propriedades específicas ao material final, como resposta óptica, atividade antimicrobiana ou sensibilidade química. No caso de biopolímeros, a funcionalização com pigmentos naturais, como antocianinas, tem se mostrado uma abordagem promissora para o desenvolvimento de materiais inteligentes e ambientalmente sustentáveis (Erna *et al.*, 2022).

Os métodos de incorporação de extratos naturais em matrizes poliméricas incluem, principalmente, a mistura direta do extrato na solução formadora do filme, a adsorção superficial e a encapsulação. A escolha do método influencia diretamente a distribuição do pigmento, a intensidade da resposta colorimétrica e a estabilidade do sistema (Chen *et al.*, 2023).

No caso de matrizes à base de amido, a presença abundante de grupos hidroxila (-OH) favorece interações intermoleculares com as antocianinas, especialmente por meio de ligações de hidrogênio. Essas interações podem contribuir para a retenção do pigmento na matriz polimérica, reduzindo sua migração e degradação, ao mesmo tempo em que preservam a sensibilidade à variação de pH (Erna *et al.*, 2022).

Do ponto de vista estrutural e óptico, a funcionalização pode promover alterações na transparência, na homogeneidade e na coloração inicial do filme. Além disso, modificações nas propriedades físico-químicas, como absorção de água e estabilidade térmica, têm sido relatadas, evidenciando a necessidade de uma avaliação criteriosa da interação entre matriz e pigmento.

2.8.4 Filmes poliméricos indicadores de pH

Os filmes poliméricos indicadores de pH constituem uma classe de materiais funcionais desenvolvidos para converter variações químicas do meio em respostas visuais diretas, possibilitando o monitoramento qualitativo ou semi-quantitativo de processos físico-químicos. Esses sistemas baseiam-se na incorporação de compostos cromóforos sensíveis a alterações ácido-base em matrizes poliméricas, de modo que mudanças no pH do ambiente promovem transformações estruturais nos pigmentos, refletidas por variações perceptíveis de cor (Prietto *et al.*, 2017).

Entre os diversos compostos empregados, as antocianinas destacam-se como os pigmentos naturais mais utilizados em filmes indicadores, em virtude de sua elevada versatilidade cromática, baixa toxicidade e ampla disponibilidade em fontes vegetais. O repolho roxo (*Brassica oleracea*) destaca-se entre essas fontes por apresentar elevado teor de antocianinas, responsáveis por sua intensa coloração característica e por sua elevada sensibilidade às variações de pH.

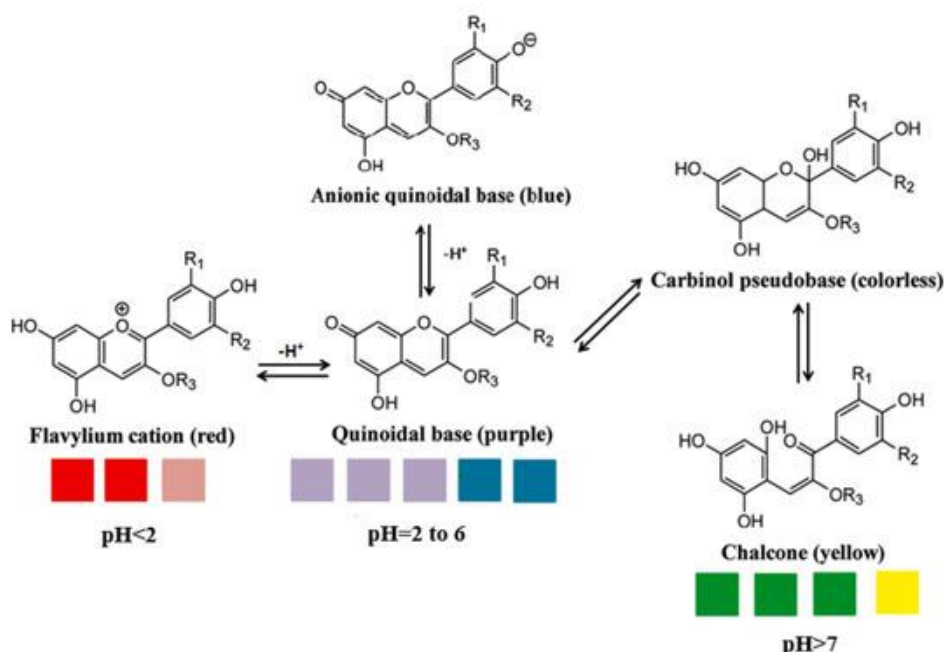
Do ponto de vista químico, o comportamento dessas moléculas é governado pelo equilíbrio entre diferentes espécies estruturais que coexistem em solução, cuja distribuição depende diretamente do pH do meio (Castañeda-Ovando *et al.*, 2009). A Figura 6 ilustra as alterações cromáticas do extrato de repolho roxo em diferentes valores

de pH, evidenciando sua aplicabilidade como indicador natural (Abedi-firoozjah *et al.*, 2022).

Observa-se que, à medida que o pH da solução aumenta da faixa ácida para a alcalina, ocorre uma variação gradual da coloração do extrato, associada a efeitos hiperacrômicos e batocrômicos característicos das antocianinas. Em meios fortemente ácidos ($\text{pH} < 2$), predomina a coloração vermelha, atribuída à presença majoritária do cátion flavílio. Com o aumento do pH para a faixa de 2 a 4, ocorre a conversão parcial dessa espécie na base quinoidal, resultando em colorações roxas a azuladas.

À medida que o pH se aproxima da neutralidade, a pseudobase carbinol, estruturalmente incolor, torna-se a forma predominante, promovendo o clareamento da solução. Em condições alcalinas ($\text{pH} > 7$), verifica-se uma redução progressiva da estabilidade das antocianinas e a formação da chalcona, responsável pelo surgimento de tonalidades verde-amareladas. Esse conjunto de transformações estruturais e cromáticas evidencia o caráter responsivo das antocianinas às variações de pH, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Alterações de cor do extrato rico em antocianinas do repolho roxo em função do pH.



Fonte: (Abedi-firoozjah *et al.*, 2022).

A eficiência funcional desses sistemas está diretamente relacionada a parâmetros como intensidade da mudança de cor, tempo de resposta, reversibilidade do sinal e estabilidade do pigmento durante o armazenamento e o uso. Contudo, limitações ainda persistem, especialmente no que se refere à sensibilidade das antocianinas à luz, ao

oxigênio e à umidade, fatores que podem acelerar sua degradação e comprometer a confiabilidade do sensor. Nesse sentido, estratégias como modificação da matriz polimérica, adição de agentes estabilizantes e desenvolvimento de sistemas de encapsulamento têm sido amplamente investigadas como alternativas para melhorar o desempenho e a durabilidade desses filmes (Chen *et al.*, 2023).

2.9 Limitações dos métodos de produção de bioplásticos

Embora os bioplásticos à base de biopolímeros naturais apresentem potencial reconhecido como alternativa sustentável aos polímeros sintéticos derivados do petróleo, os métodos atualmente empregados para sua produção ainda exibem limitações significativas sob os aspectos estruturais, funcionais, tecnológicos, econômicos e ambientais. A compreensão crítica dessas limitações é essencial para a adequada interpretação dos resultados experimentais, bem como para a identificação de lacunas científicas e oportunidades de avanço tecnológico.

Uma das principais restrições associadas aos bioplásticos à base de amido refere-se às propriedades mecânicas intrinsecamente inferiores quando comparadas às dos polímeros petroquímicos convencionais. A predominância de interações intermoleculares fracas, especialmente ligações de hidrogênio, aliada à ausência de uma estrutura tridimensional altamente reticulada, resulta em materiais com menor resistência à tração, menor módulo elástico e reduzida capacidade de deformação antes da ruptura. Esses fatores limitam a aplicabilidade dos bioplásticos em sistemas que demandam elevada resistência mecânica ou estabilidade estrutural prolongada (Basiak, Lenart e Debeaufort, 2017; Paula e Kringel, 2021).

Adicionalmente, os bioplásticos à base de amido exibem acentuada sensibilidade à umidade, decorrente da natureza hidrofílica do polímero. A elevada densidade de grupos hidroxila (-OH) favorece a absorção de água, promovendo plasticização não controlada, aumento da solubilidade, perda de integridade mecânica e alterações dimensionais do material. Essa característica compromete de forma significativa as propriedades de barreira ao vapor de água, tornando os filmes inadequados para aplicações em ambientes com elevada umidade relativa ou para o acondicionamento de produtos higroscópicos (Denardin e Silva, da, 2009; Souza, 2019).

Outro fenômeno limitante amplamente relatado na literatura é a retrogradação do amido, processo termodinamicamente favorecido que ocorre durante o

armazenamento dos materiais. A reassociação progressiva das cadeias de amilose e, em menor grau, de amilopectina resulta na recristalização parcial da matriz polimérica, ocasionando aumento da rigidez, redução da flexibilidade, intensificação da opacidade e ocorrência de sinérese. Esses efeitos comprometem a estabilidade físico-química e funcional dos bioplásticos ao longo do tempo, reduzindo sua vida útil e a previsibilidade de desempenho (Singh *et al.*, 2003; Weber, Queiroz e Chang, 2008).

Do ponto de vista tecnológico, destaca-se como limitação relevante a variabilidade composicional das matérias-primas vegetais. O teor de amilose e amilopectina, a presença de lipídios, proteínas e compostos fenólicos, bem como as condições agrônomicas e pós-colheita, exercem influência direta sobre o comportamento térmico, reológico e mecânico dos bioplásticos. Essa variabilidade dificulta a padronização dos processos produtivos, compromete a reprodutibilidade experimental e representa um desafio significativo para a transposição dos métodos laboratoriais para a escala industrial (Folino *et al.*, 2020; Jacobs *et al.*, 2020).

A funcionalização de bioplásticos com extratos vegetais ricos em compostos fenólicos, como as antocianinas, embora amplie o espectro de aplicações por meio da incorporação de propriedades indicadoras de pH, introduz limitações adicionais de ordem estrutural e química. A incorporação desses compostos pode interferir na organização da matriz polimérica, afetando a homogeneidade do filme, sua transparência, resistência mecânica e estabilidade térmica. Ademais, a interação entre antocianinas e a matriz polimérica depende fortemente do pH, da polaridade do meio e da intensidade das ligações de hidrogênio estabelecidas, podendo resultar em migração do pigmento ou perda gradual da função indicadora (Prietto *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2023).

Outro aspecto crítico refere-se à estabilidade limitada das antocianinas, compostos altamente sensíveis à luz, ao oxigênio, à umidade e a variações de temperatura. Esses fatores podem acelerar reações de degradação, como processos oxidativos e abertura do anel flavílico, comprometendo a intensidade e a reversibilidade da resposta colorimétrica ao longo do tempo. Tal limitação demanda o desenvolvimento de estratégias adicionais, como encapsulamento, uso de agentes estabilizantes ou modificação da matriz polimérica, o que pode aumentar a complexidade e o custo do processo produtivo (Abedi-firoozjah *et al.*, 2022; Castañeda-Ovando *et al.*, 2009).

Sob a perspectiva econômica, os custos associados à produção de bioplásticos ainda representam um entrave à sua ampla adoção comercial. Embora as matérias-primas sejam renováveis, o processamento do amido, a adição de plastificantes, a

funcionalização com extratos naturais e o controle rigoroso das condições de processamento elevam o custo final do material, tornando-o menos competitivo frente aos polímeros convencionais produzidos em larga escala e com cadeias produtivas consolidadas (Folino *et al.*, 2020; Oberti e Paciello, 2022).

Por fim, embora a biodegradabilidade seja frequentemente apontada como uma das principais vantagens ambientais dos bioplásticos, esse processo é fortemente dependente das condições ambientais. A biodegradação eficiente requer condições específicas de umidade, temperatura, disponibilidade de oxigênio e presença de microrganismos adequados. Em ambientes naturais desfavoráveis ou em sistemas inadequados de descarte, a degradação pode ocorrer de forma lenta ou incompleta, reduzindo o benefício ambiental esperado e reforçando a necessidade de políticas integradas de gestão de resíduos e infraestrutura apropriada de compostagem (Emadian, Onay e Demirel, 2017).

Dessa forma, apesar do elevado potencial dos bioplásticos como materiais sustentáveis e funcionais, as limitações técnicas, econômicas e ambientais atualmente existentes evidenciam a necessidade de avanços no desenvolvimento de formulações mais estáveis, processos de produção mais eficientes e estratégias integradas que conciliem desempenho funcional, viabilidade econômica e sustentabilidade ambiental.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi estruturada em etapas metodológicas com o intuito de assegurar a obtenção de resultados consistentes e detalhados. A primeira etapa correspondeu à revisão de literatura, que compreendeu a análise de materiais previamente publicados, tais como artigos científicos, livros e dissertações, visando à compreensão das principais características e dos processos de produção de plásticos sustentáveis.

A segunda etapa consistiu na execução experimental, realizada no Laboratório de Química Orgânica da UNILAB, envolvendo a manipulação de reagentes e a produção de bioplásticos a partir de amido de batata inglesa (*Solanum tuberosum*). Essa etapa foi conduzida por meio de dois experimentos principais. Inicialmente, procedeu-se à produção de filmes bioplásticos utilizando exclusivamente o amido de batata (experimento 1). Em seguida, o experimento foi reproduzido com a adição de extrato de repolho roxo (*Brassica oleracea*), com o objetivo de obter bioplásticos funcionalizados, dotados de propriedades indicadoras de pH (experimento 2).

A terceira etapa compreendeu a caracterização e a interpretação dos dados, considerada essencial para a discussão dos resultados, sendo realizada por meio da Espectroscopia Vibracional no Infravermelho (IV).

O método adotado nesta pesquisa é de natureza qualitativa, caracterizando-se por priorizar a análise interpretativa dos dados, buscando compreender os fenômenos investigados em profundidade, com foco na descrição e na interpretação das características observadas nos bioplásticos produzidos (Prodanov; Freitas, 2013). A análise teve como finalidade compreender a relação entre as propriedades do biopolímero, os reagentes empregados e as condições de processamento utilizadas.

3.1 Matéria-prima e reagentes

A matéria-prima utilizada para a obtenção do bioplástico foi a batata inglesa (*Solanum tuberosum*), selecionada em função de seu elevado teor de amido e ampla disponibilidade. Foram utilizados materiais e reagentes específicos que viabilizaram as etapas de extração, filtração, aquecimento e moldagem do material polimérico. Os principais materiais e equipamentos utilizados foram papel de filtro, liquidificador, proveta de 250 mL, béquer de 500 mL, balança analítica, placa de Petri, bastão de vidro, kitassato, funil de Büchner, bomba a vácuo, coador e pipeta. Como reagentes, foram utilizados, água destilada, glicerina (agente plastificante), ácido acético (agente acidificante). Esses insumos foram essenciais para assegurar a obtenção do bioplástico, permitindo o controle das proporções, a homogeneização da mistura e a adequada formação dos filmes poliméricos.

Quando o experimento foi reproduzido, adicionou-se à formulação a solução de repolho roxo (*Brassica oleracea*), com a finalidade de obter um bioplástico funcionalizado, conferindo ao material propriedades indicadoras de pH.

3.2 Produção do bioplástico – Experimento 1

3.2.1 Extração do amido da batata inglesa

A extração do amido foi realizada conforme metodologias descritas por (Halal, El *et al.*, 2019; Pereira; Plens, 2020; Souza, 2019), com adaptações. Inicialmente, as batatas inglesas foram submetidas à lavagem em água corrente com o objetivo de remover

resíduos de solo e possíveis contaminantes superficiais. Em seguida, os tubérculos foram cortados em pequenos fragmentos para facilitar o processamento mecânico.

Posteriormente, três batatas de tamanho médio, correspondentes a aproximadamente 380 g, foram trituradas em liquidificador com 300 mL de água, obtendo-se uma dispersão heterogênea de partículas de batata em meio aquoso (Figura 7a). A mistura obtida foi submetida inicialmente à filtração comum (Figura 7b), visando a separação da fração sólida da líquida. O filtrado foi então transferido para um sistema de filtração a vácuo (Figura 7c), no qual utilizou-se um funil de Büchner acoplado a papel de filtro previamente pesado (0,2360 g), com o intuito de promover a retenção do amido. A filtração foi conduzida mediante acionamento da bomba de vácuo, permitindo que o líquido atravessasse o papel de filtro e o amido ficasse retido.

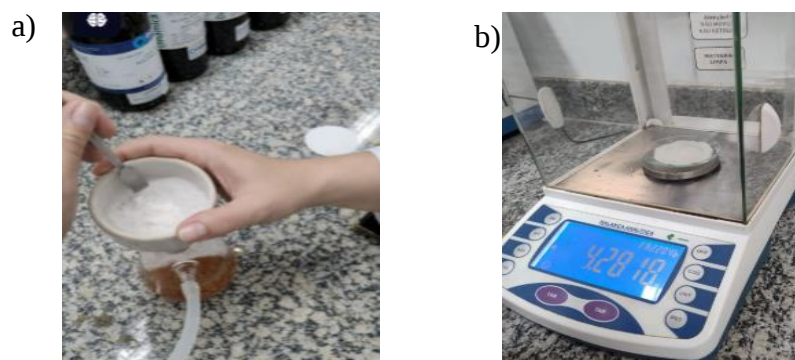
Figura 7 - Partículas de batata em meio aquoso (a), filtração comum da mistura (b) e filtração a vácuo (c)



Fonte: Elaboração própria (2025)

Após o término do processo, o papel de filtro contendo o material retido foi cuidadosamente removido do funil (figura 8a) e submetido à pesagem em balança analítica (Figura 8b), registrando-se massa final de 4,2818 g. Descontando-se a massa do papel de filtro, determinou-se que a quantidade de amido obtida foi de 4,0448 g.

Figura 8 – Remoção do material do funil (a) e pesagem do material (b)



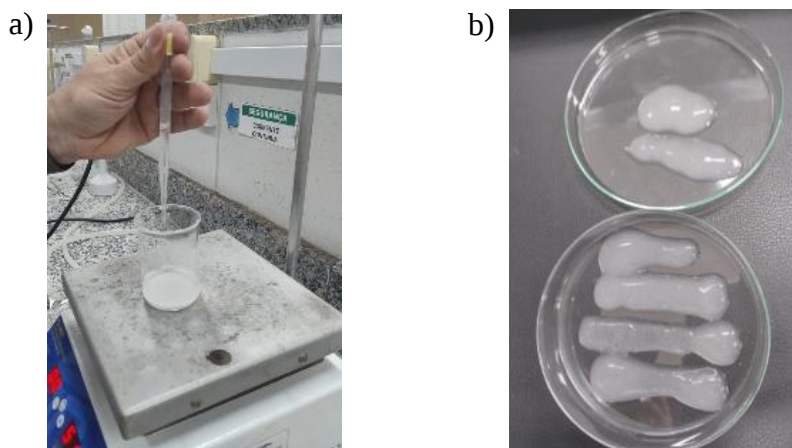
Fonte: Elaboração própria (2025)

3.2.2 Preparação e secagem do bioplástico

Para a obtenção do bioplástico, 4,0448 g de amido foram transferidos para um béquer de 500mL, ao qual foram adicionados 20 mL de água destilada, 2,5 mL de glicerina e 2,0 mL de ácido acético (Figura 9a). A mistura foi aquecida em chapa aquecedora, sob agitação contínua, até a obtenção de um gel translúcido e homogêneo, característico do processo de gelatinização do amido, a fim de evitar a formação de grumos (Bangar *et al.*, 2021; Santana *et al.*, 2018; Thakur *et al.*, 2019).

O gel polimérico obtido foi vertido em placas de Petri (Figura 9b) previamente higienizadas, sendo distribuído de forma uniforme para a formação dos filmes. A secagem ocorreu à temperatura ambiente até a completa evaporação da fase aquosa, conforme descrito por (Jacobs *et al.*, 2020; Thakur *et al.*, 2019). O tempo de secagem variou em função da espessura do material depositado e das condições ambientais. Após a secagem, os filmes bioplásticos foram removidos das placas e acondicionados em recipientes fechados, protegidos da umidade.

Figura 9 – adição dos reagentes (9a) e gel em placa de Petri (9b)



Fonte: Elaboração própria (2025)

3.3 Produção do bioplástico funcionalizado – experimento 2

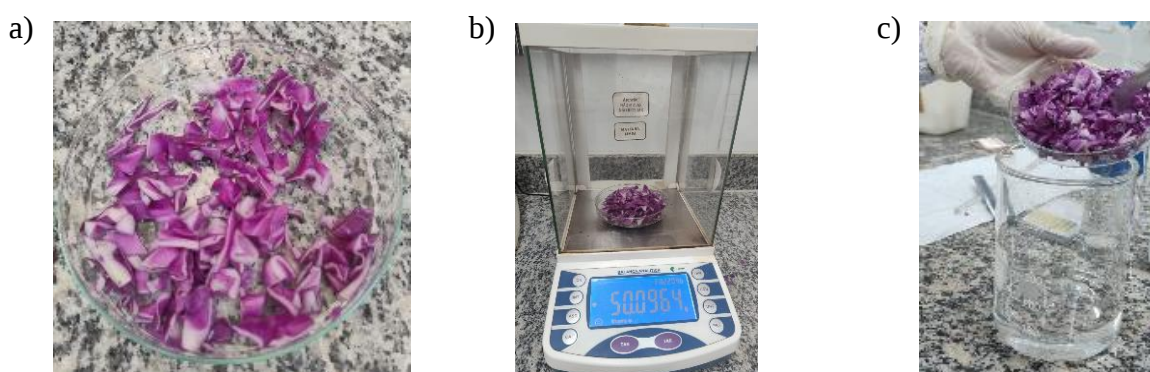
3.3.1 Obtenção do extrato do repolho roxo

A antocianina foi extraída a partir de folhas de repolho roxo (*Brassica oleracea* var. *capitata* f. *rubra*), adquirido em estabelecimento comercial localizado no município de Barreira–CE. As amostras foram previamente selecionadas por inspeção visual criteriosa, com o objetivo de excluir unidades que apresentassem danos mecânicos,

murchamento ou sinais aparentes de deterioração, garantindo a qualidade do material vegetal empregado na extração.

As folhas foram destacadas manualmente, fracionadas em porções menores e lavadas em água corrente, com a finalidade de remover impurezas superficiais (Figura 10a). Em seguida, aproximadamente 50 g de folhas foram pesadas em balança analítica (Figura 10b) e imersas em 300 mL de água (Figura 10c), sendo a mistura submetida a aquecimento a 95 °C por 45 minutos, visando à extração dos compostos fenólicos, especialmente as antocianinas (Mallmann, 2011).

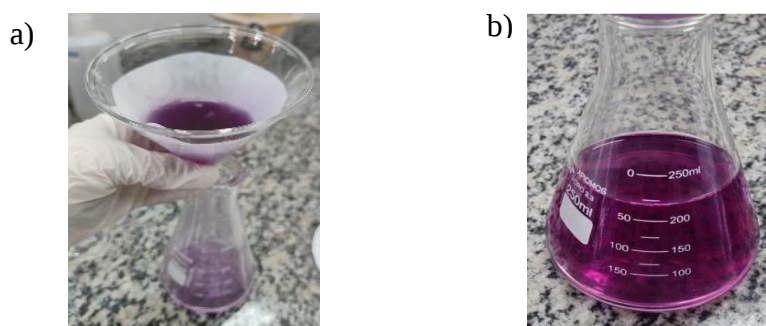
Figura 10 – Repolho roxo cortado (a), Repolho roxo pesado (b) e repolho roxo adicionado à água (c)



Fonte: Elaboração própria (2025)

Após o aquecimento, o sistema foi resfriado à temperatura ambiente e o extrato obtido foi submetido à filtração simples, utilizando-se funil de vidro, papel filtro e Erlenmeyer, para a remoção do material particulado residual (Figura 11a). Esse procedimento resultou em um extrato homogêneo, límpido e de coloração intensa característica das antocianinas (Figura 11b). O extrato foi utilizado imediatamente nas etapas subsequentes, a fim de preservar a estabilidade dos compostos bioativos, em conformidade com abordagens descritas na literatura de filmes sensíveis ao pH incorporados com pigmentos naturais (Prietto *et al.*, 2017).

Figura 11 – Filtração simples do extrato (a) e extrato do repolho roxo (b)



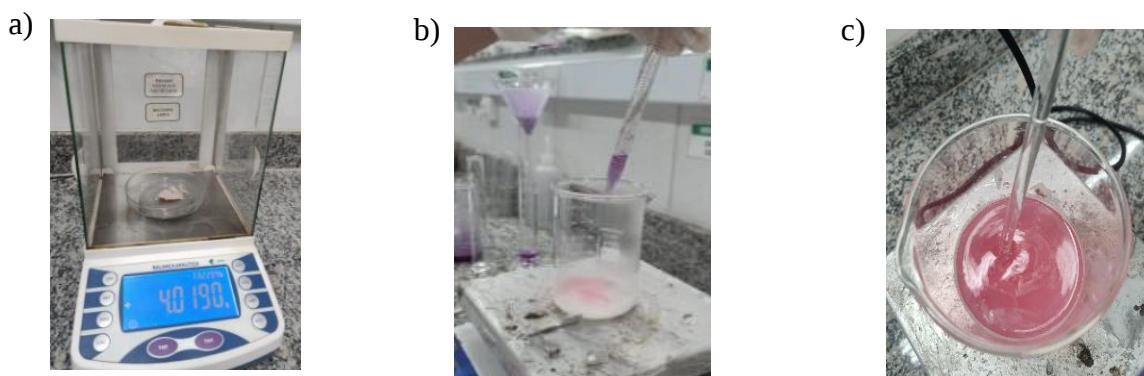
Fonte: Elaboração própria (2025)

3.3.2 – Preparação e secagem do bioplástico funcionalizado

A formulação dos filmes bioplásticos foi realizada a partir de amido de batata inglesa (*Solanum tuberosum*), empregando-se o método de casting, amplamente utilizado na obtenção de materiais poliméricos biodegradáveis à base de polissacarídeos, devido à sua eficiência na formação de matrizes contínuas e homogêneas. Inicialmente, 4,0190g de amido (Figura 12a) foram transferidos para um béquer de 500 mL e dispersos em 20 mL de água sob agitação constante, promovendo a hidratação dos grânulos amiláceos. Adicionaram-se 2,5 mL de glicerina, utilizada como agente plastificante, com a finalidade de reduzir as interações intermoleculares entre as cadeias poliméricas e aumentar a flexibilidade do material final.

Posteriormente, foram incorporados 2,0 mL de ácido acético, atuando como agente acidificante e estabilizante da matriz polimérica, contribuindo para o aumento da solubilidade do amido e favorecendo a interação com compostos fenólicos. Com a solução ainda aquecida, adicionaram-se 2,5 mL do extrato aquoso de repolho roxo (Figura 12b) rico em antocianinas, sob agitação contínua, assegurando a dispersão uniforme do pigmento na matriz polimérica (Figura 12c). A incorporação do extrato visa conferir propriedades indicadoras de pH aos filmes, uma vez que as antocianinas apresentam mudanças estruturais dependentes do meio ácido-básico, refletidas em variações cromáticas características.

Figura 12 – Pesagem do amido (a), adição do extrato do repolho roxo (b) e matriz polimérica (c)



Fonte: Elaboração própria(2025)

A solução final foi vertida em placas de Petri e submetida à secagem em temperatura ambiente, até a completa evaporação do solvente, resultando na formação de

filmes contínuos, homogêneos e flexíveis, os quais foram posteriormente acondicionados em dessecador para preservação de suas propriedades físicas e químicas até as análises.

3.4 Caracterização por FTIR

A caracterização estrutural dos filmes bioplásticos foi realizada por espectroscopia vibracional na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), técnica amplamente empregada na análise de materiais poliméricos à base de amido por possibilitar a identificação dos principais grupos funcionais presentes na matriz polimérica, bem como a avaliação das interações intermoleculares entre seus constituintes (Warren, Gidley e Flanagan, 2016).

A Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR, do inglês *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*) fundamenta-se no princípio de que a maioria das moléculas apresenta absorção de radiação na região do infravermelho do espectro eletromagnético, resultando em vibrações moleculares. Essa absorção está diretamente relacionada à natureza das ligações químicas presentes na substância. Assim, a técnica de FTIR possibilita a identificação de grupos funcionais específicos, fornecendo um padrão espectral único — frequentemente denominado “impressão digital” molecular — que se mostra altamente relevante para a caracterização de amostras (Santos, 2024).

No primeiro experimento, correspondente à produção do bioplástico a partir do amido de batata inglesa, os espectros de infravermelho foram obtidos utilizando-se um espectrômetro Bruker VERTEX 70v, operando no modo de reflectância total atenuada (ATR), por meio de acessório equipado com cristal de diamante. As análises foram realizadas na faixa espectral de 4000 a 130 cm^{-1} , com resolução de 2 cm^{-1} .

No segundo experimento, referente à produção dos filmes bioplásticos funcionalizados com extrato de repolho roxo, a caracterização estrutural foi realizada por FTIR-ATR sob condições espectrais equivalentes. Os espectros obtidos permitiram a identificação das principais bandas vibracionais da matriz polimérica, associadas às vibrações de estiramento das ligações O–H, C–H e C–O, características do amido.

A análise comparativa entre os espectros dos filmes controle e funcionalizados foi conduzida visando verificar possíveis alterações estruturais decorrentes da incorporação do extrato de repolho roxo, especialmente relacionadas às interações intermoleculares entre a matriz polimérica e os compostos fenólicos presentes no extrato, em particular as antocianinas, evidenciando a modificação química e funcional da matriz polimérica.

3.5 Avaliação do pH

A resposta cromática dos filmes funcionalizados foi avaliada por meio da exposição de amostras a soluções aquosas de ácido sulfúrico (H_2SO_4) e hidróxido de sódio (NaOH), representando meios ácido e básico, respectivamente. As amostras foram imersas nas soluções por 2 minutos, tempo suficiente para promover o contato efetivo entre o meio reagente e a superfície do material, conforme descrito em estudos com filmes indicadores à base de antocianinas de repolho roxo (Prietto *et al.*, 2017).

Após a exposição, os filmes foram observados visualmente e registrados fotograficamente sob condições controladas de iluminação, com o objetivo de documentar as variações cromáticas apresentadas. A alteração de cor foi analisada de forma qualitativa, correlacionando-se a coloração observada ao pH do meio, demonstrando o potencial dos filmes como indicadores visuais em aplicações laboratoriais.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A presente pesquisa foi conduzida a partir de uma abordagem experimental estruturada, com o objetivo de desenvolver e caracterizar bioplásticos à base de amido de batata inglesa (*Solanum tuberosum*), bem como avaliar o efeito da funcionalização da matriz polimérica com extrato de repolho roxo (*Brassica oleracea* var. *capitata* f. *rubra*). O estudo compreendeu duas etapas experimentais principais: a produção e caracterização de filmes bioplásticos de amido (experimento 1), e a produção de filmes bioplásticos funcionalizados, incorporados com antocianinas naturais (experimento 2), visando à obtenção de materiais com propriedades indicadoras de pH.

4.1 Caracterização de filmes bioplásticos de amido (experimento 1)

Como visto, o amido é um polissacarídeo composto por amilopectina e amilose, que apresenta boas propriedades filmogênicas, mas, quando usados isoladamente, seus filmes tendem a ser quebradiços e solúveis em água (Sousa, 2024). A adição de plastificantes, como a glicerina é de fundamental importância para a obtenção dos bioplásticos, visto que quanto maior a quantidade de glicerina na mistura dispersante, melhor a homogeneidade fazendo com que se forme um melhor produto da reação (Sousa, 2024). Dessa forma, a glicerina adicionada no experimento, melhorou essas

características do bioplástico, incorporando à estrutura do material e aumentando flexibilidade e funcionalidade.

Substâncias ácidas são frequentemente adicionadas atuando inicialmente sobre as regiões amorfas, que são mais desorganizadas e mais fáceis de quebrar. Após afetarem essas regiões, o ácido passa a atacar as áreas cristalinas, que são mais resistentes. Durante esse processo, tanto a amilose quanto a amilopectina, as duas principais frações do amido, são hidrolisadas simultaneamente em moléculas menores, como glicose e oligossacarídeos, o que facilita a dispersão do amido e pode melhorar sua funcionalidade, como no caso da produção de bioplásticos (Guerreiro e Meneguelli, 2009).

O ácido acético ($C_2H_4O_2$) foi adicionado para interagir com o amido e contribuir com o rompimento ligações de hidrogênio entre as moléculas de amido, consequentemente, facilitar a dispersão do amido em água e permitir a formação de uma matriz mais homogênea. Assim, o ácido acético atuou em sinergia com a glicerina melhorando a flexibilidade e resistência do material. Essa combinação é essencial para produzir um bioplástico de boa qualidade e com propriedades ajustáveis para diferentes aplicações.

A formulação do biopolímero foi preparada a partir da mistura de água, glicerina e ácido acético, a qual foi submetida a aquecimento e agitação até a obtenção de um gel homogêneo e viscoso. Durante o aquecimento, o amido passa por uma transição cooperativa, caracterizada pela penetração da água nas regiões amorfas dos grânulos, promovendo seu intumescimento e a desestruturação parcial das regiões cristalinas. Esse processo ocasiona o rompimento da organização cristalina e a consequente perda da estrutura ordenada (Warren, Gidley e Flanagan, 2016). Na etapa de secagem, a evaporação da água favorece o rearranjo das moléculas de amido, promovendo a recristalização e, consequentemente, a formação do biofilme (Bangar *et al.*, 2021).

O gel obtido foi vertido em placas de Petri e deixado secar à temperatura ambiente. Após o período de secagem, observou-se que o material apresentou textura consistente e flexível, evidenciando a capacidade de ser moldado sem rupturas significativas, característica fundamental para aplicações em bioplásticos. Tal flexibilidade está associada à presença da glicerina, que atuou como agente plastificante, conferindo maior maleabilidade à matriz polimérica.

No que se refere ao aspecto visual, o bioplástico apresentou coloração levemente turva, embora mantendo certa transparência, característica relacionada à natureza do amido de batata. Essa turbidez, entretanto, não comprometeu a aparência geral do

material não comprometeu a aparência geral do produto, que apresentou brilho superficial e acabamento polido, tornando-se mais atraente. Esse brilho pode ser atribuído à interação entre o amido e a glicerina (atuou como plastificante), que conferiu uma superfície mais lisa, além de tornar a textura mais suave ao toque. Essas características visuais indicam um potencial maior para o uso do bioplástico em aplicações onde a transparência e o brilho são desejáveis, como em embalagens e outros produtos comerciais (Sousa, 2024).

4.1.1 Análise do espectro de infravermelho por transformação de Fourier

A caracterização por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) foi utilizada para identificar os grupos funcionais presentes no amido comercial, no biopolímero de celulose e no bioplástico obtido a partir do amido de batata. Os espectros obtidos estão apresentados na Figura 13.

Na região entre $3200\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$, observou-se uma banda larga em todas as amostras, atribuída ao estiramento das ligações O–H. Essa banda é típica de grupos hidroxila fortemente associados por ligações de hidrogênio, amplamente presentes em materiais polissacarídicos como o amido e a celulose. A presença dessa banda no espectro do bioplástico e do bioplástico funcionalizado indica que os grupos hidroxila foram preservados durante o processamento térmico e químico do amido de batata. Resultados semelhantes foram reportados por Thakur *et al.*, (2019), que destacaram a importância das interações hidroxila–hidrogênio para a estabilidade da matriz polimérica em bioplásticos amiláceos.

Entre $2900\text{--}2800\text{ cm}^{-1}$, todos os espectros apresentaram bandas relacionadas às vibrações de estiramento das ligações C–H (alifáticas), confirmando a presença de grupos metileno e metila, comuns nas cadeias carbonadas dos polissacarídeos.

Na faixa de $1730\text{--}1600\text{ cm}^{-1}$, observou-se no espectro do bioplástico um pico mais pronunciado em comparação ao do amido puro. Esta banda pode ser atribuída à presença de grupos carbonila (C=O), provenientes possivelmente da adição de plastificantes, como o glicerol, utilizados durante a formulação do bioplástico e além da presença mínima da carbonila de possíveis anticianidinas do bioplástico funcionalizado. A presença desta banda indica modificação química parcial da matriz amilácea, resultando na formação de ésteres ou interações hidrogênio-carbonila. Estudo realizado por Basiak, Lenart e Debeaufort, (2018) corrobora essa interpretação ao identificar bandas de absorção atribuídas a C–H e C=O ($\sim 1655\text{ cm}^{-1}$) em filmes de amido com 33% e 50% de glicerol,

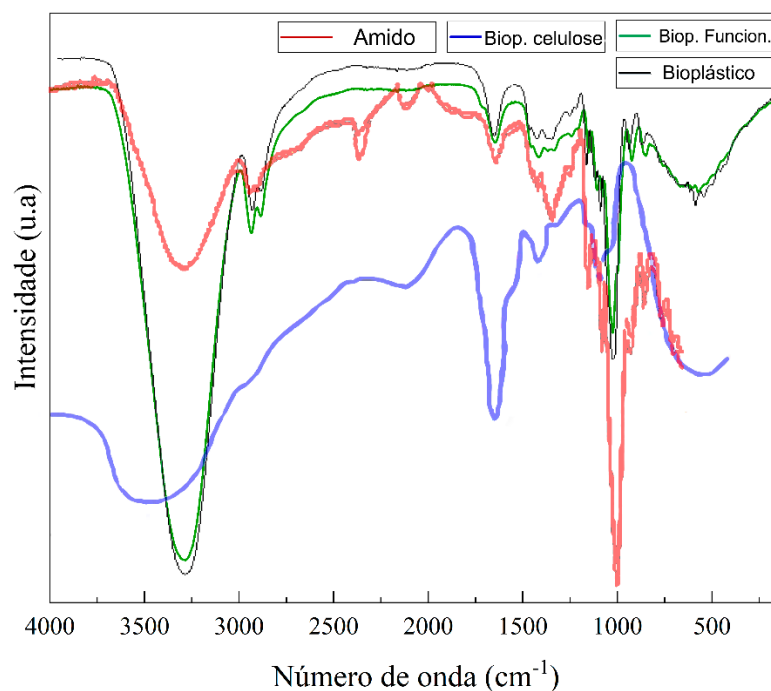
além de deslocamentos nos picos de O–H ($\sim 3320\text{ cm}^{-1} \rightarrow \sim 3338\text{ cm}^{-1}$) e C–H ($\sim 2908\text{ cm}^{-1} \rightarrow 2926\text{--}2932\text{ cm}^{-1}$), indicativos do fortalecimento das ligações de hidrogênio intermoleculares. Complementarmente, Gomes, Melo e Velloso, (2017) também observaram a formação de grupos carbonila em biopolímeros sintetizados com glicerol, atribuída a reações de esterificação, reforçando a hipótese de modificação estrutural promovida pela presença do plastificante.

A região de $1200\text{--}900\text{ cm}^{-1}$, considerada a região de “impressão digital” dos polissacarídeos, revelou importantes diferenças estruturais. O amido apresentou bandas intensas associadas às vibrações C–O, C–C e aos anéis glicosídicos. O biopolímero de celulose, por sua vez, apresentou bandas com deslocamento e menor intensidade relativa, refletindo sua estrutura linear e altamente cristalina. Já o bioplástico apresentou um perfil espectral semelhante ao do amido, com modificações sutis, o que sugere manutenção parcial da estrutura glicosídica, com reorganizações moleculares induzidas pelo processo térmico e pela presença do plastificante.

Na região abaixo de 900 cm^{-1} , associada a deformações fora do plano e movimentos de torção de grupos funcionais, destacam-se bandas mais intensas no espectro do amido, refletindo sua estrutura cíclica e amorfa. O bioplástico mantém alguns desses sinais, embora com menor intensidade, o que pode indicar alterações conformacionais na estrutura original do amido de batata. Essa hipótese é corroborada pelo estudo de Pereira e Plens (2020), que utilizaram espectroscopia de absorção na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) para caracterizar bioplásticos produzidos com amido de batata, glicerina biodestilada e ácido acético. Os autores observaram variações na intensidade das bandas características do amido após o processamento térmico, sugerindo reorganização molecular e formação de novas interações intermoleculares, como ligações de hidrogênio, que afetam diretamente a estrutura supramolecular do biopolímero.

De maneira geral, os resultados indicam que o bioplástico à base de amido de batata preserva muitas das características estruturais do amido original, mas exhibe modificações específicas — principalmente na região da carbonila — que sugerem a formação de novas interações químicas durante o processo de gelatinização, plastificação e moldagem. Essas transformações são essenciais para conferir propriedades mecânicas e térmicas adequadas ao material final, o que reforça o potencial do amido de batata como matéria-prima viável para a produção de bioplásticos biodegradáveis.

Figura 13 – Identificação dos grupos funcionais por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)



O quadro 2 resume os principais grupos funcionais identificados nas amostras e mostra como o bioplástico mantém semelhanças com o amido, mas apresenta modificações específicas, principalmente pela presença de plastificante e mudanças estruturais induzidas pelo processamento térmico.

Quadro 2. Principais bandas de absorção no FTIR das amostras analisadas e suas atribuições.

Nº	Número de onda (cm ⁻¹)	Atribuição Principal	Amido	Biop. Celulose	Bioplástico	Biop. funcionalizado
1	3200–3600	Estiramento O–H (ligações de hidrogênio)	✓	✓	✓	✓
2	2900–2800	Estiramento C–H (alifático)	✓	✓	✓	✓
3	~1730–1650	Estiramento C=O (carbonila – plastificante ou oxidação)	✗	✗	✓	✓
4	1200–900	Estiramento C–C, C–O e anéis glicosídicos	✓	✓	✓	✓
5	<900	Deformações fora do plano, torções	✓	✓	✓ (menos intenso)	✓ (menos intenso)

✓ = presença da banda | ✗ = ausência da banda ou sinal muito fraco

Fonte: Elaborado pela própria autora

4.2 Caracterização do bioplástico funcionalizado (experimento 2)

A incorporação de extratos vegetais ricos em compostos fenólicos em matrizes poliméricas à base de amido tem sido amplamente investigada como uma estratégia para a obtenção de filmes biodegradáveis com propriedades funcionais adicionais, especialmente no que se refere à responsividade ao pH e à atividade antioxidante. No presente estudo, os filmes bioplásticos produzidos a partir do amido de batata inglesa funcionalizado com extrato de repolho roxo apresentaram modificações físico-químicas relevantes quando comparados aos filmes constituídos exclusivamente de amido, evidenciando o papel das antocianinas na alteração do comportamento do material.

Os ensaios realizados em soluções aquosas de ácido sulfúrico e hidróxido de sódio demonstraram que os filmes funcionalizados exibiram sensibilidade cromática dependente do pH do meio. Esse comportamento está diretamente relacionado à estrutura química das antocianinas, cuja forma molecular varia conforme o ambiente ácido ou básico. Em meio ácido, predominam estruturas do tipo cátion flavílio, responsáveis por colorações avermelhadas, enquanto em meio alcalino ocorre a formação de bases quinonoidais e chalconas, associadas a tonalidades azuladas, esverdeadas ou amareladas, dependendo da intensidade do pH (Prietto *et al.*, 2017). A resposta cromática observada nos filmes indica que as antocianinas mantiveram sua atividade funcional mesmo após a incorporação à matriz polimérica, sugerindo uma interação física favorável entre o amido e os compostos fenólicos.

Paralelamente, uma amostra representativa do bioplástico funcionalizado foi destinada à caracterização estrutural por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), com o objetivo de identificar possíveis alterações nas bandas vibracionais características do amido decorrentes da incorporação do extrato de repolho roxo, especialmente nas regiões associadas às vibrações de O–H, C–H e C–O, frequentemente afetadas por interações intermoleculares e ligações de hidrogênio (Erna *et al.*, 2022)

Nos tópicos subsequentes, são apresentados e discutidos, de forma individualizada, os resultados referentes às alterações cromáticas observadas em meio ácido e básico, bem como a interpretação detalhada dos espectros de FTIR, buscando-se evidenciar o potencial do bioplástico funcionalizado como material indicador e funcionalmente ativo (presentes no quadro 2).

4.2.1 Comportamento do bioplástico funcionalizado em meios ácido e básico

O filme bioplástico produzido a partir do amido de batata inglesa e funcionalizados com extrato de repolho roxo apresentou coloração inicial rosada homogênea, evidenciando a incorporação efetiva de antocianinas à matriz polimérica. Essas antocianinas são pigmentos naturais hidrossolúveis pertencentes ao grupo dos compostos fenólicos, conhecidos por exibirem mudanças de cor dependentes do pH devido à sua estrutura química e propriedades físico-químicas, característica amplamente explorada em filmes indicadores de pH e em sistemas de embalagens inteligentes biodegradáveis. Em condições ácidas, as antocianinas tendem a apresentar tonalidades vermelhas/rosadas, enquanto em ambientes neutros e alcalinos podem mudar para tons púrpura e azul-esverdeados, o que justifica sua aplicação como indicadores naturais de pH em matrizes poliméricas biodegradáveis (Abedi-firoozjah *et al.*, 2022; Prietto *et al.*, 2017).

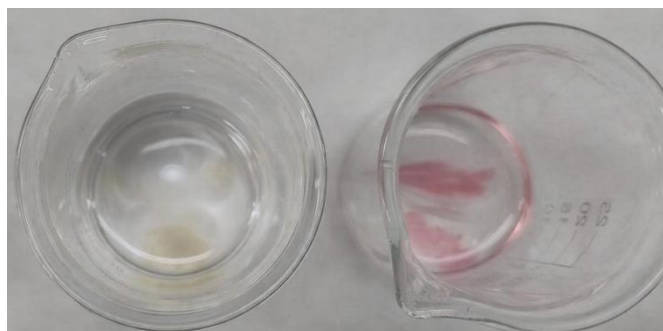
Quando o bioplástico foi submetido à solução de ácido sulfúrico, no béquer à direita (Figura 19), contendo H_2SO_4 ($\text{pH} \approx 2$), verificou-se a preservação e intensificação da coloração rosada do material. Esse comportamento está associado à predominância das antocianinas na forma de cátion flavílio, espécie molecular apresenta maior estabilidade em meios fortemente ácidos, sendo responsável por tonalidades vermelhas ou rosadas intensas em valores de pH inferiores a 3. Tal resposta cromática está em consonância com o comportamento descrito na literatura para sistemas contendo antocianinas, os quais destacam a estabilidade estrutural do cátion flavílio sob condições ácidas (Abedi-firoozjah *et al.*, 2022; Prietto *et al.*, 2017).

Do ponto de vista estrutural, a matriz polimérica de amido apresentou boa estabilidade visual, com apenas leve amolecimento superficial. Em meio ácido, os grupos hidroxila (-OH) presentes nas cadeias de amilose e amilopectina tendem a sofrer protonação, o que reduz temporariamente algumas interações intermoleculares, mas não promove ruptura significativa das ligações glicosídicas (Erna *et al.*, 2022). Assim, o material manteve sua integridade física durante o período de contato, indicando compatibilidade moderada com ambientes ácidos.

Em contraste, no béquer à esquerda (Figura 14) a exposição ao meio básico, em solução de hidróxido de sódio (NaOH , $\text{pH} \approx 12$), provocou alterações visuais e estruturais mais pronunciadas. A coloração do filme sofreu mudança gradual do rosado para tonalidades amareladas, associada à transformação estrutural das antocianinas em formas

menos estáveis, como as chalconas, que predominam em pH elevados e apresentam coloração amarelada (Abedi-firoozjah *et al.*, 2022; Castañeda-Ovando *et al.*, 2009a), observou-se perda de homogeneidade do filme, com início de degradação superficial.

Figura 14 – Béquer a esquerda (solução de NaOH, pH $\approx$ 12. Béquer a direita H_2SO_4 (pH $\approx$ 2



Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2025)

Em pH alcalino, os íons hidroxila favorecem a hidrólise alcalina das regiões amorfas do amido, promovendo o inchamento da matriz, o enfraquecimento das interações intermoleculares e, em estágios mais avançados, a desestruturação parcial das cadeias polissacarídicas, comportamento semelhante ao descrito por Erna *et al.*, (2022) em filmes à base de amido. Esse processo compromete a estabilidade mecânica do material e acelera a degradação das antocianinas, que são particularmente instáveis em ambientes fortemente básicos (Castañeda-Ovando *et al.*, 2009; Prietto *et al.*, 2017).

De forma integrada, os resultados demonstram que o bioplástico funcionalizado apresenta resposta cromática sensível, reproduzível e facilmente perceptível às variações de pH, confirmando seu potencial como filme indicador natural. A maior estabilidade observada em meio ácido, em comparação ao meio alcalino, reflete tanto a resistência química da matriz de amido quanto a estabilidade estrutural das antocianinas em baixos valores de pH. Por outro lado, a instabilidade em meio básico evidencia uma limitação do material para aplicações prolongadas em ambientes alcalinos, indicando a necessidade de ajustes na formulação, como a incorporação de agentes reticulantes ou a utilização de blends poliméricos, visando ampliar sua resistência química e funcional, conforme sugerido por Abedi-firoozjah *et al.*, (2022).

5. CONCLUSÃO

A presente pesquisa evidenciou o potencial do amido da batata inglesa (*Solanum tuberosum*) como matéria-prima viável e promissora para a produção de bioplásticos biodegradáveis, reforçando sua aplicabilidade como alternativa sustentável aos polímeros sintéticos derivados do petróleo. A associação do amido com plastificantes, como a glicerina, e com o ácido acético mostrou-se fundamental para a obtenção de filmes com boa coesão, flexibilidade e manuseabilidade, características essenciais para aplicações em materiais poliméricos biodegradáveis.

A caracterização estrutural por espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) confirmou a formação de uma matriz polimérica coesa, preservando características estruturais do amido original, ao mesmo tempo em que evidenciou modificações espectrais, especialmente na região associada aos grupos carbonila. Essas alterações indicam o estabelecimento de novas interações intermoleculares decorrentes do processamento, contribuindo para o aprimoramento das propriedades estruturais e funcionais do bioplástico obtido no primeiro experimento.

No segundo experimento, a incorporação do extrato de repolho roxo (*Brassica oleracea*) resultou na obtenção de bioplásticos funcionalizados com propriedades indicadoras de pH, evidenciadas pela coloração inicial rosada homogênea dos filmes. A resposta cromática observada frente à exposição a meios ácido e básico demonstrou comportamento sensível, reproduzível e facilmente perceptível, associado à presença de antocianinas na matriz polimérica. A maior estabilidade cromática em meio ácido e as alterações observadas em meio básico refletem tanto o comportamento químico das antocianinas quanto a resposta da matriz de amido a diferentes condições de pH.

De forma integrada, os resultados indicam que o bioplástico à base de amido de batata inglesa apresenta não apenas viabilidade estrutural e funcional, mas também potencial para aplicações inteligentes, como filmes indicadores naturais de pH. Assim, este estudo contribui para o avanço das pesquisas voltadas ao desenvolvimento de materiais poliméricos renováveis e biodegradáveis, destacando a importância da valorização de fontes naturais e do uso de aditivos funcionais no desenvolvimento de bioplásticos com maior valor agregado e menor impacto ambiental.

REFERÊNCIAS

- ABEDI-FIROOZJAH, R. *et al.* Application of Red Cabbage Anthocyanins as pH-Sensitive Pigments in Smart Food Packaging and Sensors. **Polymers**, v. 14, p. 1629, 2022.
- ALCÁZAR-ALAY, S. C.; MEIRELES, M. A. A. Physicochemical properties, modifications and applications of starches from different botanical sources. **Food Science and Technology (Brazil)**, v. 35, n. 2, p. 215–236, 31 jul. 2015.
- ALI, S. S. *et al.* Bioplastic production in terms of life cycle assessment: A state-of-the-art review. **Environmental Science and Ecotechnology**, v. 15, p. 100254, 1 jul. 2023.
- ALVES, M. S. **Quantificação de amido em diferentes variedades de arroz via hidrólise enzimática, com determinação da glicose por cromatografia líquida com detector de índice de refração (HPPLC-RI)**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.
- BANGAR, S. P. *et al.* Functionality and applicability of starch-based films: An eco-friendly approach. **Foods**, v. 10, n. 9, p. 1–24, 2021.
- BASIAK, E.; LENART, A.; DEBEAUFORT, F. Effect of starch type on the physicochemical properties of edible films. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 98, p. 348–356, 1 maio 2017.
- BASIAK, E.; LENART, A.; DEBEAUFORT, F. How glycerol and water contents affect the structural and functional properties of starch-based edible films. **Polymers**, v. 10, n. 4, 2018.
- BERTOTTO, C. *et al.* Development of a biodegradable plastic film extruded with the addition of a Brazilian propolis by-product. **LWT**, v. 157, n. 113124, p. 1–10, 1 mar. 2022.
- BILO, F. *et al.* A sustainable bioplastic obtained from rice straw. **Journal of Cleaner Production**, v. 200, p. 357–368, 1 nov. 2018.
- BRAZEIRO, F. S. G.; IMTHON, N. D. **Filmes Biodegradáveis baseados em polissacarídeos e proteínas, extraídos de resíduos industriais para a aplicação em embalagens de alimentos: revisão sistemática da literatura**. [s.l.] Universidade Federal do Pampa, 2021.
- CARNIEL, G. *et al.* **Produção de bioplástico a partir do amido de mandioca** Anais da VI Feira de Ciências, Tecnologia, Arte e Cultura do do IFC Campus Concórdia. **Anais...Concórdia**: 2023
- CASTAÑEDA-OVANDO, A. *et al.* Chemical studies of anthocyanins: A review. **Food Chemistry**, v. 113, n. 4, p. 859–871, 15 abr. 2009.
- CHEN, L. *et al.* Effect of Anthocyanins on Colorimetric Indicator Film Properties. **Coatings**, v. 13, p. 1682, 2023.

- COPPOLA, G. *et al.* Bioplastic from Renewable Biomass: A Facile Solution for a Greener Environment. **Earth Systems and Environment**, v. 5, n. 2, p. 231–251, 2021.
- COSTA, A. *et al.* Bioplastics: Innovation for Green Transition. **Polymers**, v. 15, n. 3, p. 517, 2023.
- DENARDIN, C. C.; SILVA, L. P. DA. Estrutura dos grânulos de amido e sua relação com propriedades físico-químicas. **Ciência Rural**, v. 39, n. 3, p. 945–954, 2009.
- DUTTA, D.; SIT, N. A comprehensive review on types and properties of biopolymers as sustainable bio - based alternatives for packaging. **Food Biomacromolecules**, v. 1, n. August, p. 58–87, 2024.
- EMADIAN, S. M.; ONAY, T. T.; DEMIREL, B. Biodegradation of bioplastics in natural environments. **Waste Management**, v. 59, p. 526–536, 1 jan. 2017.
- ERNA, K. H. *et al.* Synthesis and Physicochemical Characterization of Polymer Film-Based Anthocyanin and Starch. **Biosensors**, v. 12, p. 211, 2022.
- EUROPEAN BIOPLASTICS. **Accountability is key: Environmental Communication Guide for Bioplastics**. Disponível em: <http://www.docs.european-bioplastics.org/2016/publications/EUBP_environmental_communications_guide.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2025.
- FOLINO, A. *et al.* Biodegradation of wasted bioplastics in natural and industrial environments: A review. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 15, p. 1–37, 1 ago. 2020.
- FOLINO, A.; PANGALLO, D.; CALABRÒ, P. S. Assessing bioplastics biodegradability by standard and research methods: Current trends and open issues. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 11, n. 2, p. 109424, 1 abr. 2023.
- FRANCO, C. M. L. *et al.* **Propriedades Gerais do amido**. Campinas - SP: Fundação Cargill, 2001. v. 1
- GOMES, R. DA V.; MELO, B. N. DE; VELLOSO, M. H. R. Síntese e caracterização de bioplásticos a partir de glicerol e óleo de mamona. **Latin American Journal of Energy Research**, v. 4, n. 1, p. 41–51, 2017.
- GONÇALVES, M. F. V. **Tratamento térmico dos amidos de batata-doce (Ipomoea batatas L.) e de mandioca-salsa (Arracacia xanthorrhiza.) sob baixa umidade em microondas**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2007.
- GUERREIRO, L. M. R.; MENEGUELLI, F. C. Influência do tratamento térmico e da acidez no comportamento reológico de amidos nativos funcionais de milho cerosos orgânicos comerciais. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 29, p. 412–419, 2009.
- HALAL, S. L. M. EL *et al.* **Methods for Extracting Cereal Starches from Different Sources: A Review**. *Starch/ Stärke*, nov. 2019.

- HARRISON, J. P. *et al.* **Biodegradability standards for carrier bags and plastic films in aquatic environments: A critical review** Royal Society Open Science Royal Society Publishing, , 23 maio 2018.
- JACOBS, V. *et al.* Produção e caracterização de biofilmes de amido incorporados com polpa de acerola. **Revista Iberoamericana de Polímeros**, v. 21, n. 3, p. 107–119, 2020.
- JAYAKUMAR, A. *et al.* Recent progress of bioplastics in their properties, standards, certifications and regulations: A review. **Science of The Total Environment**, v. 878, p. 163156, 20 jun. 2023.
- KHOO, H. E. *et al.* Anthocyanidins and anthocyanins : colored pigments as food , pharmaceutical ingredients , and the potential health benefits. **Food & Nutrition Research**, v. 61, n. 1, p. 1–21, 2017.
- KOT, A. M. *et al.* Biotechnological Methods of Management and Utilization of Potato Industry Waste — a Review. **Potato Research**, v. 63, n. Department of Food Biotechnology and Microbiology, Institute of Food Sciences, p. 431–447, 2020.
- KOWSER, M. A. *et al.* Fabrication and characterization of corn starch based bioplastic for packaging applications. **Results in Materials**, v. 25, p. 1–12, mar. 2025.
- LIBERATO, M. DA C. T. C. **Química dos alimentos – Estruturas, Propriedades e Transformações**. 1ª ed. Belo Horizonte - MG: Editora Poisson, 2020.
- LOPES, J. *et al.* Potato peel phenolics as additives for developing active starch-based films with potential to pack smoked fish fillets. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 28, p. 1–8, 1 jun. 2021.
- MALLMANN, L. P. **Extração de antocianinas a partir de casca de berinjela (Solanum melongena)**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.
- MANO, E. B.; MENDES, L. C. Introdução a polímeros. **Editora Edgard Blucher LTDA**, v. 1, p. 191, 2004.
- MARTÍNEZ, B. R.; GULLÓN, B.; YÁÑEZ, R. Identification and Recovery of Valuable Bioactive Compounds from Potato Peels : A Comprehensive Review. **Antioxidants - MDPI**, v. 10, p. 1–18, 2021.
- MEDINA-JARAMILLO, C. *et al.* Starch-based biocomposites reinforced with cellulose nanofibers from potato peel byproducts. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 1–12, 2025.
- MOHEE, R. *et al.* Biodegradability of biodegradable/degradable plastic materials under aerobic and anaerobic conditions. **Waste Management**, v. 28, n. 9, p. 1624–1629, 1 jan. 2008.
- MORAES, J. O. **Propriedades de filmes de amido incorporados de nanoargilas e fibras de celulose**. Florianópolis - SC: Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2009.

NELSON, D. L.; COX, M. M. **Princípios de bioquímica de Lehninger**. 6ª ed. Porto Alegre - RS: Artmed, 2014.

OBERTI, I.; PACIELLO, A. Bioplastic as a Substitute for Plastic in Construction Industry. **Encyclopedia**, v. 2, n. 3, p. 1408–1420, 28 jul. 2022.

OLAGUNJU, A. I.; OMOBA, O. S. Amaranth starch: physicochemical, functional, and nutritional properties. **Non-Conventional Starch Sources: Properties, Functionality, and Applications**, p. 281–313, 1 jan. 2024.

PAULA, B. M. D.; KRINGEL, D. H. Carboidratos. *In: Química e bioquímica de alimentos*. 1ª ed. Alfenas - MG: Editora Universidade Federal de Alfenas, 2021. p. 1–250.

PEREIRA, J. M. DA S.; PLENS, A. C. DE O. **Produção de bioplástico a partir do amido da batata** 11º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2020. **Anais...**São Paulo - SP: Instituto Federal - Campus Presidente Epitácio, 2020Disponível em: <<https://ocs.ifsp.edu.br/conict/xiconict/paper/viewPaper/7187>>

POLESI, L. F. Amido resistente: aplicações e métodos de produção. **B.CEPPA**, v. 29, n. 2, p. 211–222, 2011.

PRESTES, D. N. **Qualidade industrial e propriedades do amido de grãos do colmo principal e dos perfilhos de genótipos de arroz**. Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, 2013.

PRIETTO, L. *et al.* pH-sensitive films containing anthocyanins extracted from black bean seed coat and red cabbage. **LWT - Food Science and Technology**, v. 80, p. 492–500, 2017.

SANTANA, R. F. *et al.* Characterization of starch-based bioplastics from jackfruit seed plasticized with glycerol. **Journal of Food Science and Technology**, v. 55, n. 1, p. 278–286, 2018.

SANTOS, J. F. **Desenvolvimento e caracterização de bioplásticos de fécula de mandioca com extrato alcoólico de vismia guianensis**. Ananindeua - Pará: Universidade Federal do Pará, 2024.

SILVA, M. L. T.; BRINQUES, G. B.; GURAK, P. D. Development and characterization of corn starch bioplastics containing dry sprout by-product flour. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 23, p. 1–13, 2020.

SINGH, N. *et al.* Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. **Food Chemistry**, v. 81, n. 2, p. 219–231, 1 maio 2003.

SOUSA, M. J. DE Q. **Síntese do bioplasticos a partir do amido da batata inglesa: uma proposta de experimento para o ensino de Química**. Sousa-PB: Instituto Federal da Paraíba - Campus sousa, 2024.

SOUZA, J. C. A. **Extração e caracterização reológica e tecnológica do amido da**

amêndoa da semente da manga (*Mangifera indica* L.) variedade Tommy Atkins. Salvador, Bahia: Universidade Federal da Bahia, 2019.

SUINAGA, F. A.; PEREIRA, A. DA S. **Sistema de produção da batata - Embrapa.** 2ª edição ed. Brasília: Embrapa, 2015.

THAKUR, R. *et al.* Starch-based films: Major factors affecting their properties. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 132, p. 1079–1089, 2019.

TORRES, L. M.; LEONEL, M.; MISCHAN, M. M. Concentração de enzimas amilolíticas na hidrólise do amido de gengibre. **Ciência Rural**, v. 42, n. 7, p. 1327–1332, 2012.

VESCOVO, D. *et al.* The Valorization of Potato Peels as a Functional Ingredient in the Food Industry : A Comprehensive Review. **Foods - MDPI**, v. 14, n. 8, p. 1–29, 2025.

WARREN, F. J.; GIDLEY, M. J.; FLANAGAN, B. M. Infrared spectroscopy as a tool to characterise starch ordered structure—a joint FTIR–ATR, NMR, XRD and DSC study. **Carbohydrate Polymers**, v. 139, p. 35–42, 30 mar. 2016.

WEBER, F. H.; QUEIROZ, F. P. C.; CHANG, Y. K. Estabilidade de géis de amido de milho normal, ceroso e com alto teor de amilose adicionados de gomas guar e xantana durante os processos de congelamento e descongelamento. **Food Science and Technology**, v. 28, n. 2, p. 413–417, 2008.