



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ANANINDEUA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA  
E ENGENHARIA DOS MATERIAIS



BIANCA CORREA PINTO

**AMIDO TERMOPLÁSTICO: OBTENÇÃO DE NANOCOMPÓSITOS DE AMIDO DE ARARUTA TERMOPLASTIFICADO COM NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ZINCO**

ANANINDEUA-PA

2024

BIANCA CORREA PINTO

**AMIDO TERMOPLÁSTICO: OBTENÇÃO DE NANOCOMPÓSITOS DE AMIDO DE ARARUTA TERMOPLASTIFICADO COM NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ZINCO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM), do *Campus* Universitário de Ananindeua (CANAN), da Universidade Federal do Pará (UFPA), como parte dos requisitos para a obtenção do título de mestre(a) em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientadora: Profa. Dra. Ana Aurea Barreto Maia  
Coorientador: Prof. Dr Marcos Vinícius da Silva Paula

Área de concentração: Caracterização, desenvolvimento e aplicação de materiais.

Linha de Pesquisa: Tecnologia dos Materiais

ANANINDEUA-PA

2024

BIANCA CORREA PINTO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM), do *Campus* Universitário de Ananindeua (CANAN), da Universidade Federal do Pará (UFPA), como parte dos requisitos para a obtenção do título de mestre(a) em Ciência e Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Caracterização, desenvolvimento e aplicação de materiais.

Linha de Pesquisa: Tecnologia dos Materiais

Data de aprovação: **07 de fevereiro de 2024**

Banca examinadora

Documento assinado digitalmente  
 ANA AUREA BARRETO MAIA  
Data: 15/02/2024 14:46:13-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

---

Profa. Dr<sup>a</sup>. Ana Áurea Barreto Maia  
Orientadora– (PPGCEM/UFPA)

---

Prof. Dr. Marcos Vinícius da Silva Paula  
Coorientador – (PPGCEM/UFPA)

Documento assinado digitalmente  
 VERONICA SCARPINI CANDIDO  
Data: 15/02/2024 10:19:40-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

---

Profa. Dr<sup>a</sup>. Verônica Scarpini Cândido  
Examinador (a) interno– (PPGCEM/UFPA)

Documento assinado digitalmente  
 FAUSTHON FRED DA SILVA  
Data: 14/02/2024 10:56:33-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

---

Prof. Dr: Fausthon Fred da Silva  
Examinador (a) externo – (Departamento de Química - UFPB)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

P659a Pinto, Bianca Correa.

AMIDO TERMOPLÁSTICO: OBTENÇÃO DE  
NANOCOMPÓSITOS DE AMIDO DE ARARUTA  
TERMOPLASTIFICADO COM NANOPARTÍCULAS DE  
ÓXIDO DE ZINCO / Bianca Correa Pinto. — 2024.

86 f. : il. color.

Orientador(a): Profª. Dra. Ana Aurea Barreto Maia  
Coorientador(a): Prof. Dr. Marcos Vinícius da Silva Paula  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,  
Campus Universitário de Ananindeua, Programa de Pós-Graduação  
em Ciência e Engenharia de Materiais, Ananindeua, 2024.

1. Araruta; 2. Nanopartículas de óxido de zinco; 3.  
Nanocompósitos; 4. Termoplastificado.

CDD 620.11

---

Deus, aos meus pais por todo incentivo e ajuda  
para que esse momento se tornasse possível.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por me fortalecer nesta jornada de mestrado, amparando-me emocionalmente nas situações mais desafiadoras para chegar até aqui e por esta grandiosa bênção de concretizar o sonho de cursar o mestrado.

Aos meus pais, Anderson, pelo apoio, e minha mãe e amiga, Bena, pelos ensinamentos e por todas as conversas de incentivo com palavras de coragem, para que eu não desistisse dos meus sonhos em meio às dificuldades.

As minhas irmãs, Bárbara e Beatriz e minha avó Maria Alvenira pelas constantes demonstrações de companheirismo, amor e afeto.

Ao meu companheiro amado Alexandre, meu parceiro, pelo incentivo, apoio irrestrito e suporte emocional nos momentos em que mais necessitei.

Ao nosso carro que se chama Eugênio, por facilitar o meu deslocamento da faculdade ao trabalho.

À minha orientadora, Prof.<sup>a</sup> Dra. Ana Áurea, pela atenção, carinho e por todas as orientações prestadas. Ao meu coorientador, Prof. Dr. Marcos Vinicius, por me auxiliar com a estrutura do meu trabalho, orientações necessárias, disponibilidade e confiança. Ao Professor Doutor Alcy Favacho, por acreditar em mim e pelo seu apoio.

Ao professor Dr. Carlos Alberto Brito da Silva Junior pelas correções e contribuição para minha dissertação de Mestrado.

Aos colegas de mestrado, pela colaboração no aprendizado, em especial Taiana, Louise e Tainara, pela cumplicidade e por todos os ensinamentos. Ao técnico Alex, por toda a ajuda e suporte durante o estágio docente e nos ensaios mecânicos.

Ao laboratório de Caracterização dos Materiais (LABCMAT) ao Laboratório do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais da Universidade Federal de Pernambuco (PGMTR-UFPE) e ao laboratório de Espectroscopia vibracional e altas pressões, localizado no Programa de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal do Pará (PPGF/UFPA), onde pude realizar as caracterizações.

Agradeço ao laboratório de catálise e biocatálise (LABCAT- UFPA) por contribuir para o desenvolvimento desta pesquisa com auxílio de equipamentos.

Agradeço ao laboratório de Química - UFPA *Campus* Ananindeua e ao Laboratório de Polímeros (LABPOL) por possibilitar a realização desta pesquisa. As companheiras de laboratório Heloíse, Michele e Rochelle com as quais tive a oportunidade de conhecer melhor

e trabalhar, tornando meus dias mais agradáveis. Amigas que me incentivaram e me auxiliaram nos momentos em que mais precisei. A todas vocês, o meu muito obrigada!

Meus sinceros agradecimentos ao Dr Gislayson e Lucas, sou imensamente grata pela ajuda, bondade e generosidade.

Agradeço ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM/UFPA) por todo o conhecimento transmitido ao longo do curso.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo aporte financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos professores Carlos Alberto Brito da Silva Junior e Verônica Scarpini Cândido por todas contribuições e correções prestadas para a melhoria desta dissertação.

Meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que contribuíram de alguma forma para a finalização deste ciclo, o qual me trouxe experiências de crescimento profissional e acadêmico e, sobretudo, de evolução como pessoa.

*“Confia no Senhor de todo o teu coração e não te estribes no teu próprio entendimento. Reconhece-o em todos os teus caminhos, e ele endireitará as tuas veredas. Não sejas sábio a teus próprios olhos; teme ao Senhor e aparta-te do mal”.*

**Provérbios 3: 5-7**

## RESUMO

A busca por novos materiais com desempenho comparável aos sintéticos tem impulsionado o desenvolvimento de materiais sustentáveis e biodegradáveis. A crescente demanda tem estimulado a criação de materiais inovadores, como filmes à base de amido, biopolímeros e outros, que oferecem excelentes propriedades mecânicas e de barreira, sendo ambientalmente amigáveis. Para atingir níveis mais altos de sustentabilidade, os filmes à base de amido, enriquecidos com novos componentes, ganham destaque como possíveis candidatos para aplicações em embalagens alimentares. Nesse contexto, o presente estudo visa obter e caracterizar nanocompósitos termoplastificado com amido de araruta (TPA) e nanopartículas de óxido de zinco (NPs ZnO) em diferentes proporções (1%, 3% e 5%). Filmes sem NPs ZnO foram usados como controle. Os filmes de amido termoplastificado foram elaborados por meio da técnica *casting solution* (evaporação por solvente). Eles foram avaliados quanto à concentração de NPs ZnO, sendo também submetidos às técnicas laboratoriais, como teste de umidade, solubilidade e intumescimento. Além disso, foram caracterizados por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), análise termogravimétrica (TGA), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e ensaios de tração, deformação na ruptura e módulo de elasticidade. Para o ensaio de umidade, os resultados revelaram que a adição de 1, 3 e 5% de NPs ZnO à matriz polimérica proporcionou a diminuição gradual do percentual da umidade quando comparados ao filme de TPA controle. Atribui-se a este fato a interação interfacial entre as NPs ZnO e a matriz do amido de araruta, que por sua vez, dificulta a interação das moléculas de água com o filme de nanocompósitos. Para o percentual de solubilidade dos filmes, percebeu-se pequena alteração após a adição das NPs ZnO a matriz do amido, o que se torna importante para a manutenção de produtos armazenados nas embalagens de alimentos como também a estabilidade dos filmes poliméricos. Quanto ao teste de intumescimento, para os filmes de TPA 1%, TPA 3% e TPA 5%, verifica-se que ao se adicionar as NPS, os mesmos apresentaram variações menores comparado ao filme TPA contendo apenas o amido de araruta na matriz polimérica. Diante do exposto, as micrografias obtidas pelo MEV revelaram a presença de agregados randomicamente dispersos de NPs ZnO na matriz polimérica do amido de araruta. Os ensaios de propriedades de tensão foram conduzidos em 5 replicatas, com uma velocidade de 5 mm/min. O filme TPA apresentou uma média de 0,34 MPa e 59,80% para resistência à tração e deformação na ruptura, respectivamente. A incorporação de nanopartículas de ZnO à matriz de amido de araruta resultou em um aumento na resistência à tração e deformação dos filmes TPA 1%, TPA 3% e TPA 5% em comparação com o filme TPA.

As médias de resistência para os filmes TPA 1%, TPA 3% e TPA 5% foram de 0,42 MPa, 0,45 MPa e 0,60 MPa, respectivamente. Além disso, as médias de deformação na ruptura para os filmes TPA 1%, TPA 3% e TPA 5% foram 77,14%, 86,34% e 86,05%, respectivamente. Os espectros de FTIR, exibiram o mesmo comportamento espectral. Este fenômeno é decorrente da presença de alto teor de amido na matriz polimérica dos filmes. A estabilidade térmica para os filmes TPA, TPA1%, TPA 3% e TPA 5% foi investigada através da análise termogravimétrica (TGA). Os resultados obtidos para os filmes de TPA1%, TPA 3% e TPA 5% apresentou dados semelhantes a estabilidade térmica do filme TPA e mostraram que a adição das NPs ZnO à matriz polimérica não provocou diminuição significativa dos mesmos. Os resultados mostraram que é possível a utilização dos filmes produzidos neste trabalho no setor de embalagens.

**Palavras-chave:** Araruta; Nanopartículas de óxido de zinco; Nanocompósitos; Termoplastificado

## ABSTRACT

The search for new materials with comparable performance to synthetics has driven the development of sustainable and biodegradable materials. The growing demand has stimulated the creation of innovative materials, such as starch-based films, biopolymers, and others, which offer excellent mechanical and barrier properties while being environmentally friendly. To achieve higher levels of sustainability, starch-based films, enriched with new components, gain prominence as possible candidates for food packaging applications. In this context, the present study aims to obtain and characterize thermoplasticized nanocomposites with arrowroot starch (TPA) and zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) in different proportions (1%, 3% and 5%). Films without ZnO NPs were used as controls. The thermoplasticized starch films were made using the *casting solution* technique (solvent evaporation). They were evaluated for the concentration of ZnO NPs, and were also submitted to laboratory techniques, such as moisture, solubility and swelling tests. In addition, they were characterized by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), thermogravimetric analysis (TGA), scanning electron microscopy (SEM) and tensile, strain at break and modulus of elasticity tests. For the moisture test, the results revealed that the addition of 1, 3 and 5% of ZnO NPs to the polymeric matrix provided a gradual decrease in the percentage of moisture when compared to the control TPA film. This fact is attributed to the interfacial interaction between the ZnO NPs and the arrowroot starch matrix, which in turn hinders the interaction of water molecules with the nanocomposite film. For the percentage of solubility of the films, a small change was observed after the addition of the NPs ZnO to the starch matrix, which becomes important for the maintenance of products stored in food packaging as well as the stability of the polymeric films. As for the swelling test, for the 1% TPA, 3% TPA and 5% TPA films, it was verified that when the SPL was added, they presented smaller variations compared to the TPA film containing only arrowroot starch in the polymeric matrix. In view of the above, the micrographs obtained by SEM revealed the presence of randomly dispersed aggregates of ZnO NPs in the polymeric matrix of arrowroot starch. The stress properties tests were conducted in 5 replicates, with a speed of 5 mm/min. The TPA film showed an average of 0.34 MPa and 59.80% for tensile strength and deformation at break, respectively. The incorporation of ZnO nanoparticles into the arrowroot starch matrix resulted in an increase in the tensile strength and deformation of TPA 1%, TPA 3% and TPA 5% films compared to TPA film. The mean strength for the films TPA 1%, TPA 3% and TPA 5% were 0.42 MPa, 0.45 MPa and 0.60 MPa, respectively. In addition, the mean strain at break for TPA 1%, TPA 3% and TPA 5% films were 77.14%, 86.34% and 86.05%, respectively. The FTIR

spectra exhibited the same spectral behavior. This phenomenon is due to the presence of high starch content in the polymeric matrix of the films. The thermal stability for TPA, TPA1%, TPA 3% and TPA 5% films was investigated by thermogravimetric analysis (TGA). The results obtained for the TPA1%, TPA 3% and TPA 5% films presented similar data to the thermal stability of the TPA film and showed that the addition of ZnO NPs to the polymeric matrix did not cause a significant decrease in them. The results showed that it is possible to use the films produced in this work in the packaging sector.

**Keywords:** Arrowroot; Zinc oxide nanoparticles; Nanocomposites; Thermoplasticized

## LISTAS DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Estrutura de unidade repetida de etileno usada para ilustrar a macromolécula mais simples em termos de estrutura.....	23
Figura 2 -	Diferentes categorias de biopolímeros de acordo com suas fontes de origem.....	27
Figura 3 -	Estrutura química da amilose (a) e amilopectina (b).....	30
Figura 4 -	Estrutura do grânulo de amido em microescala (5 $\mu\text{m}$ ), consistindo de lamelas que apresentam regiões amorfas e cristalinas, contendo cadeias de amilose e amilopectina.....	31
Figura 5 -	Morfologia do amido natural e do TPS visualizados em microscopia eletrônica de varredura (MEV). Após o processamento, ocorre a destruição completa da estrutura granular do amido, dando então a origem a uma fase final contínua e homogênea.....	32
Figura 6 -	Estrutura química do glicerol.....	35
Figura 7 -	Etapas de crescimento de cristais no processo de recristalização do amido. A) formação de núcleos de cristal; B) crescimento do cristal; C) perfeição de cristais ou crescimento adicional de cristais.....	36
Figura 8 -	a) <i>Maranta arundinacea</i> L., popularmente conhecida como araruta; b) aspectos morfológicos.....	38
Figura 9 -	Rizoma araruta ( <i>Maranta arundinacea</i> L.) .....	39
Figura 10 -	Microscopia eletrônica da distribuição do tamanho e da microestrutura do amido de araruta.....	41
Figura 11 -	Representação das estruturas cristalinas para ZnO:(a) sal de rocha, (b) blenda de zinco, (c) wurtzita. As esferas sombreadas cinza e preta denotam átomos de Zn e O.....	43
Figura 12 -	Sequência experimental da produção dos filmes TPA, TPA 1%, TPA 3% e TPA 5%.....	46
Figura 13 -	Micrômetro Externo Digital 0-25 mm x 0,001 mm.....	50
Figura 14 -	Procedimento de ensaio mecânico realizado em Máquina Universal INTERMETRIC.....	51

Figura 15 -	Aspecto visual dos filmes em diferentes concentrações: a) TPA; b) TPA 1% c) TPA 3%; d) TPA 5%.....	52
Figura 16 -	Percentual de umidade para os filmes de TPA, TPA 1% TPA 3% e TPA 5% .....	54
Figura 17 -	Percentual de solubilidade obtido para os filmes de TPA, TPA 1%, TPA 3% e TPA 5%.....	56
Figura 18 -	Percentual de intumescimento para os filmes de TPA, TPA 1%, TPA 3% e TPA 5%, obtidos em água destilada.....	58
Figura 19 -	Espectros FTIR para os filmes (a) TPA, (b) TPA 1%, (c) TPA 3%, (d) TPA 5%.....	60
Figura 20 -	Curva de análise termogravimétrica (TGA) dos filmes (a) TPA; (b) TPA 1%; (c) TPA 3% e (d) TPA5%.....	62
Figura 21 -	Imagem do MEV para (a) TPA, (b) TPA 1%, (C) TPA 3%, (d) TPA 5%, (e) e (f) micrografia apresentada das partículas de ZnO em dimensão nanométrica (nm).....	64
Figura 22 -	Apresentação dos resultados da espessura média ( $\mu\text{m}$ ) para os filmes: TPA, TPA 1%, TPA 3% e TPA 5%.....	66
Figura 23 -	Resultados de resistência à tração na ruptura para os corpos de prova TPA, TPA 1%, TPA 3% e TPA 5%.....	67
Figura 24 -	Gráfico de deformação dos corpos de prova de TPA e filmes reforçados com NPs ZnO.....	68
Figura 25 -	Gráfico do módulo de elasticidade dos corpos de prova da matriz polimérica e reforçados com nanopartículas de óxido de zinco.....	69

## TABELAS

Tabela 1 - Teores de amilose e amilopectina de diferentes fontes de amido.....	40
Tabela 2 - Materiais utilizados nos procedimentos experimentais.....	45
Tabela 3 - Teste de Duncan para o percentual de umidade.....	55
Tabela 4 - Teste de Duncan para o percentual de solubilidade.....	57
Tabela 5 - Teste de Duncan para o ensaio de intumescimento para os filmes obtidos em água destilada.....	59
Tabela 6 - Perda de massa para o 1º evento, 2º evento, 3º evento $T_{(máx)}$ e massa residual (%) em 800 °C dos filmes TPA, TPA1%, TPA 3% e TPA 5%	62
Tabela 7 - Teste de Duncan para espessura média dos filmes ( $\mu\text{m}$ ).....	67
Tabela 8 - Teste de Duncan para os dados obtidos a partir dos ensaios mecânicos de tensão, deformação e módulo de elasticidade.....	70

## QUADROS

Quadro 1 -	Formulações dos filmes de araruta com base na concentração de NPs ZnO.....	46
Quadro 2 -	Representação dos aspectos visuais dos filmes.....	53
Quadro 3 -	Relação entre bandas e grupos funcionais do TPA, TPA1%, TPA3% e TPA 5%.....	61

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIACOES

ASTM	<i>American Society for Official Analytical Chemists</i>
AA	Amido de Araruta
BPA	Bisfenol A
°C	Celsius
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
DNA	Ácido desoxirribonucleico
DTG	Termogravimetria Derivada
EVA	Acetato de Vinila
FTIR	Infravermelho por transformada de Fourier
GLY	Glicerol
HDPE	Polietileno de alta densidade
IUPAC	União Internacional de Química Pura e Aplicada
LDPE	Polietileno de baixa densidade
µm	Micrômetro
MEV	Microscopia eletrônica de Varredura
N	Nitrogênio
NPs	Nanopartículas
PBS	Poli (succinato-co-adipato de butileno)
PE	Polietileno
PEBD	Polietileno de baixa densidade
PCL	Policaprolactona
PET	Politereftalato de etileno
PHA	Polihidroxialcanoato
PHB	Polihidroxibutirato
PHBV	polihidroxibutirato-co-hidroxivalerato
PLA	Ácido poliláctico
PP	Polipropileno
PPGCEM	Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais
PS	Poliestireno
PU	Poliuretano
PVC	Policloreto de vinila

PVA	Acetato de polivinila
TEM	Microscopia Eletrônica de Transmissão
TGA	Análise termogravimétrica
TG	Termogravimetria
TPA	Termoplástico de Araruta
TPS	Termoplásticos
UV-Vis	Ultravioleta visível
ZnO	Óxido de Zinco
NPs ZnO	Nanopartículas de Óxido de Zinco

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA</b> .....	20
<b>1.1 OBJETIVO</b> .....	22
1.1.1 Objetivo Geral .....	22
1.1.2 Objetivos Específicos .....	22
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	23
<b>2.1 Plásticos Convencionais</b> .....	23
<b>2.2 Biopolímeros</b> .....	26
<b>2.3 Amido</b> .....	28
2.3.1 Amilose e amilopectina .....	29
2.3.2 Amido Termoplástico (TPS) .....	32
2.3.3 Plastificantes .....	33
2.3.4 Glicerol .....	34
2.3.5 Gelatina e retrogradação .....	35
2.3.6 Método de evaporação por solvente: <i>Casting Solution</i> .....	37
2.4.1 Amido de araruta .....	39
2.4.2 Embalagens ativas .....	41
2.4.3 Nanopartículas de óxido de zinco (NPs ZnO) .....	42
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	45
<b>3.1 Material utilizado</b> .....	45
<b>3.2 Obtenção dos filmes de nanocompósitos</b> .....	45
<b>3.3 Caracterização dos nanocompósitos</b> .....	47
3.3.1 Aspecto visual dos filmes .....	47
3.3.2 Determinação da umidade .....	47
3.3.3 Análise de solubilidade.....	48
3.3.4 Avaliação do intumescimento .....	48
3.3.5 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) .....	49
3.3.6 Análise termogravimétrica (TGA).....	49
3.3.7 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	49
<b>3.4 Caracterização para ensaio Mecânico dos corpos de prova</b> .....	50
3.4.1 Espessura dos filmes.....	50
3.4.2 Ensaio mecânico de resistência à tração .....	50
3.4.3 Tratamento estatístico.....	51
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	52

<b>4.1 Caracterização dos nanocompósitos</b> .....	52
4.1.1 Aspecto visual dos filmes .....	52
4.1.2 Determinação da umidade .....	54
4.1.3 Análise de Solubilidade .....	56
4.1.4 Avaliação do Intumescimento .....	57
4.1.5 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) .....	60
4.1.6 Análise termogravimétrica (TGA).....	62
4.1.7 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	64
<b>4.2 Caracterização para ensaio Mecânico dos corpos de prova</b> .....	66
4.2.1 Espessura dos filmes.....	66
4.2.2 Ensaio Mecânico dos corpos de prova .....	67
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	72
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	74
<b>ANEXOS</b> .....	85

## 1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Os plásticos convencionais desempenham um papel importante e são amplamente usados no mundo, devido às propriedades desejadas bem como a sua leveza, resistência a intempéries, baixo custo, facilidade no transporte e transparência, que facilitam a sua aplicação em setores industriais. Apesar de múltiplos avanços e uso de materiais plásticos de origem petroquímica, o plástico tem proporcionado a incidência nociva com acúmulo exacerbado de resíduos plásticos no meio ambiente (Ali *et al.*, 2021; Khairnar *et al.*, 2022).

Na expectativa de atender às exigências impostas pelo mercado consumidor, o qual busca qualidade, inocuidade e desenvolvimento sustentável dos produtos alimentícios, as empresas pesquisadoras de embalagens têm sido constantemente incitadas a desenvolver materiais biodegradáveis provenientes de fontes renováveis (Taherimehr *et al.*, 2021).

Em contrapartida, o uso de produtos derivados do petróleo ainda prevalece de forma exacerbada. Nesse contexto, considerando o impacto ambiental e as consequências a longo prazo da decomposição de materiais sintéticos, tornou-se essencial buscar alternativas com efeitos biodegradáveis que amenizem a questão do consumo (Ochoa-Yepes *et al.*, 2019).

Nesse sentido, com o aumento de lixo na natureza e o esgotamento de recursos petrolíferos causados pelo consumo desenfreado de embalagens plásticas, os pesquisadores tem sido motivados a buscar alternativas mais acessíveis e sustentáveis para a produção de materiais de origem biodegradáveis (Nduko; Taguchi, 2021; Petkoska *et al.*, 2021).

De modo geral, a busca e desenvolvimento de filmes biodegradáveis está ganhando notoriedade e valorização. Materiais como estes possuem grande facilidade de se decompor por meio de ação de agentes biológicos naturais, que são capazes de destruir os resíduos, evitando a poluição da água e do solo (Nduko; Taguchi, 2021; Petkoska *et al.*, 2021).

Materiais biodegradáveis têm sido apontados como alternativas para minimizar os impactos ambientais causados pela produção de lixo que ainda é uma grande preocupação para o meio ambiente. Dentre os polímeros naturais, o amido é o mais utilizado para o desenvolvimento de produtos recicláveis, devido às suas características como abundância, baixo custo e comportamento biodegradável (Marichelvam; Jawaid; Asim, 2019; Petkoska *et al.*, 2021).

Os filmes de amido além de serem biodegradáveis, também são biocompatíveis e seguros para o contato com os alimentos. Ademais, apresentam boas propriedades como as de barreiras a gases e vapor de água. No entanto, ainda existem desafios a serem superados para a sua comercialização em larga escala, como a necessidade de melhorar sua resistência mecânica,

à umidade e flexibilidade (Turan, D., Gunes, G., Kilic, 2018).

Diversos estudos têm sido desenvolvidos para melhorar as características mecânicas de materiais à base de amido incorporando aditivos, substâncias essas adicionadas aos materiais plásticos para alcançar um efeito técnico no produto final, que permite modificar e pode aperfeiçoar concomitantemente as propriedades do material, levando em consideração a elaboração de novos recursos tendo o amido como matriz polimérica (Helmiyait *et al.*, 2021).

Os plastificantes são compostos químicos utilizados em polímeros naturais e polímeros sintéticos, como os plásticos, que são processados e desenvolvidos em laboratório. Eles têm o papel de melhorar as propriedades físicas do material, como flexibilidade, elasticidade e resistência ao impacto. A adição de reforços em uma matriz pode aumentar a resistência dos materiais termoplásticos e diminuir a hidrofobicidade (Langer *et al.*, 2020).

Faz-se importante buscar alternativas mais sustentáveis para as embalagens de alimentos. O uso excessivo de materiais não biodegradáveis como o plástico por exemplo, pode gerar graves consequências ambientais e afetar a saúde humana (Ali *et al.*, 2021; Shafqat *et al.*, 2020).

Nesse contexto, a pesquisa em filmes biodegradáveis de amido emerge como uma possível solução para esse problema, ao mesmo tempo que incentiva a adoção de práticas mais conscientes em relação ao meio ambiente. Vale ressaltar a relevância de se buscar alternativas que sejam tanto eficientes quanto amigáveis ao ecossistema (Taherimehr *et al.*, 2021).

Por conseguinte, o desenvolvimento deste estudo se concentra na produção de filmes biodegradáveis à base de fécula de araruta aditivados com nanopartículas de óxido de zinco (NPs ZnO), um material renovável e amplamente disponível para possível aplicação em embalagens de alimentos como forma de substituir as embalagens convencionais derivados do petróleo.

A estrutura deste trabalho divide-se da seguinte maneira: A primeira seção, está descrita a introdução, justificativa e objetivos. A segunda seção trata da “Revisão Bibliográfica” mostrando conceitos e definições necessárias para compreensão desta dissertação. A terceira seção apresenta os “Procedimentos Metodológicos” que revelam as etapas executadas para a elaboração do material biodegradável. Na quarta seção, serão apresentados os resultados obtidos com o desenvolvimento deste estudo, em seguida as considerações finais, referências bibliográficas e anexos.

## 1.1 OBJETIVO

### 1.1.1 Objetivo Geral

- Este trabalho possui como finalidade a obtenção e caracterização de nanocompósitos à base de amido de araruta (*Maranta arundinacea*) termoplastificado e nanopartícula de óxido de zinco, para ser utilizado no setor de embalagens de alimentos.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Produzir filmes de nanocompósitos utilizando a técnica de evaporação por solvente;
- Analisar o aspecto visual e macroscópico dos filmes em diferentes concentrações;
- Estudar o comportamento de umidade, solubilidade e intumescimento dos filmes;
- Avaliar a interação dos grupos funcionais dos filmes de nanocompósitos;
- Estudar o comportamento térmico dos filmes;
- Estudar as propriedades de tração dos filmes;
- Avaliar a morfologia dos filmes de nanocompósitos.

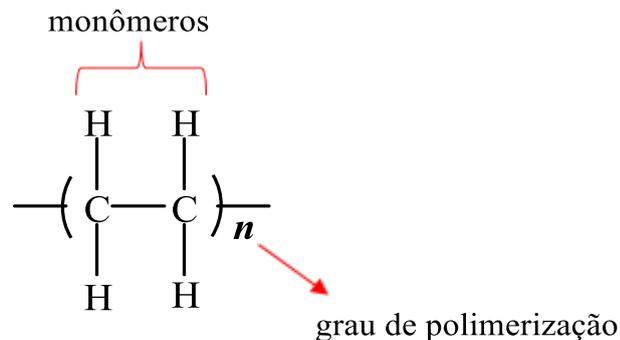
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Plásticos Convencionais

Os tempos modernos em que vivemos são frequentemente classificados como a "era do plástico", já que estamos envolvidos por uma ampla gama de materiais poliméricos, incluindo elastômeros, fibras, adesivos de borracha e, é claro, os plásticos. Esses materiais se tornaram onipresentes em nosso cotidiano em meados do século XX, quando o primeiro polímero sintético industrializado foi introduzido, sendo chamado de baquelite em homenagem ao químico Leo Hendrik Baekeland (Shafqat *et al.*, 2020).

Os polímeros são compostos por macromoléculas de alto massa molecular, podendo ser orgânicos ou inorgânicos, sintéticos ou naturais, e possuem unidades estruturalmente idênticas ligadas entre si por meio de ligações covalentes conhecidas como meros. O termo POLÍMERO provém do grego poli, que significa "muito", enquanto mero refere-se a uma "parte" ou "unidade" que se repete na estrutura. Para que ocorra a formação de um polímero, os meros são conectados por meio de ligações primárias estáveis (Manrich., 2005).

Figura 1- Estrutura de unidade repetida de etileno usada para ilustrar a macromolécula mais simples em termos de estrutura.



Fonte: Alfrey (1985); Callister; Rethwisch (2016)

Como maneira de representar uma estrutura polimérica, as unidades são dispostas entre parênteses, e o subscrito *n* denota o número de meros que compõem uma macromolécula polimérica, sendo denominado grau de polimerização ou quantidade de vezes que ela se repete, como está sendo apresentada na Figura 1. Os polímeros podem ser classificados de acordo com seu comportamento mecânico, perspectiva estrutural química, métodos de preparação e características tecnológicas (Manrich., 2005).

Os polímeros termoplásticos (TPS) são aqueles que amolecem (e eventualmente se liquefazem) quando aquecidos e podem ser reprocessados após serem resfriados novamente. Eles apresentam cadeias moleculares pouco ramificadas e interações fracas entre si. Algumas amostras de polímeros termoplásticos incluem o polietileno, o polipropileno e o policarbonato (Callister; Rethwisch., 2016).

Já os polímeros termofixos não amolecem quando submetidos a altas temperaturas, portanto, não podem ser reprocessados. Suas cadeias moleculares são altamente ramificadas e possuem fortes interações entre si, resultando em polímeros mais rígidos e com maior resistência mecânica, comparados aos termoplásticos. Alguns exemplos de polímeros termofixos são a resina epóxi, fibra de vidro e baquelite (Callister; Rethwisch., 2016).

Pertencentes ao universo fascinante dos materiais poliméricos, os plásticos convencionais têm sido amplamente utilizados ao longo da expansão do desenvolvimento social e econômico. Em razão das características que este material apresenta, eles ganharam cada vez mais espaço e notoriedade na indústria química por suas amplas possibilidades de aplicação (Ali *et al.*, 2021).

Os polímeros sintéticos, como os plásticos, apresentam vários benefícios e sua dependência é justificada por sua versatilidade no transporte, resistência à tração, maleabilidade, longevidade e baixo custo, comparados a outros materiais clássicos, como madeira, concreto e metal (Shafqat *et al.*, 2020). Esses materiais têm sido comumente utilizados no setor industrial na fabricação de diversos produtos, tendo como principais aplicações as embalagens de alimentos, garrafas de bebidas, setor automobilístico, cosméticos, medicamentos, medicina (seringas e tubos para hemodiálise), aeroespacial, entre outros (Al-Salem *et al.*, 2017).

Os plásticos são materiais macromoleculares sintéticos, provenientes do petróleo. Dentre os plásticos sintéticos mais comuns a base de petróleo, incluem-se: poli (tereftalato de etileno) (PET), cloreto de polivinila (PVC), polipropileno (PP), polietileno de baixa densidade (LDPE), polietileno de alta densidade (HDPE), poliestireno (PS) e poliuretano (PU) (Nordin *et al.*, 2022; Zolek-Tryznowska; Kaluza, 2021). Entretanto, devido à sua não-biodegradabilidade, a produção desenfreada deste material sintético e de origem petroquímica tornou-se uma ameaça para o meio ambiente (Beltrán-Sanahuja *et al.*, 2021).

O aumento do uso desses materiais resulta no esgotamento de recursos naturais e no acúmulo de resíduos plásticos, afetando todas as formas de vida, ecossistemas e a economia mundial, já que a quantidade de poluentes descartados diariamente é consideravelmente exorbitante (Ali *et al.*, 2021; Shafqat *et al.*, 2020).

Segundo pesquisa realizada por Shafqat *et al.*, (2020), a população mundial produz aproximadamente 34 milhões de toneladas de resíduos plásticos anualmente. Surpreendentemente, apenas 7% desses resíduos são reciclados, enquanto o restante é despejado em outras áreas ou deixado para se decompor em aterros sanitários. Isso não apenas causa degradação ambiental, mas também representa ameaças à saúde humana e outros ecossistemas. Além disso, os materiais plásticos convencionais possuem longa durabilidade e altas emissões de CO<sub>2</sub>, o que aumenta seu impacto negativo no meio ambiente. Devido a esses fatores, os materiais plásticos convencionais estão se tornando cada vez mais impopulares entre os consumidores.

O uso de plásticos pode ter sérios efeitos na saúde humana. A toxicidade é um contribuinte significativo das embalagens plásticas, podendo assumir várias formas, como partículas, toxicidade química, patógenos e vetores de parasitas. Estudos sobre a toxicidade das partículas em plásticos revelaram danos aos sistemas respiratório e digestivo. Além disso, partículas minúsculas podem atravessar as membranas celulares, levando a uma série de complicações de saúde (Shafqat *et al.*, 2020).

Os plásticos são produzidos com aditivos químicos, em que essas substâncias podem ser microcelulares ou macrocelulares e são adicionadas aos plásticos durante sua fabricação. Muitos desses poluentes podem ser a causa de toxicidade química, como o bisfenol A (BPA) e os ftalatos, que são reconhecidos como disruptores hormonais que podem causar danos à saúde humana em casos de exposição por ingestão ou inalação desses componentes (Shafqat *et al.*, 2020).

Devido a esses fatores, embalagens ecologicamente corretas, sustentáveis, plásticos verdes que têm como fonte de matéria prima à cana-de açúcar, embalagens biodegradáveis e filmes comestíveis baseados em polissacarídeos são algumas das tendências em alta que estão sendo exploradas como forma de substituir embalagens convencionais. Isso levou muitos pesquisadores de diversas áreas a desenvolver plásticos biodegradáveis, comumente conhecidos como biopolímeros (Santhosh; Nath; Sarkar, 2021).

## 2.2 Biopolímeros

Os biopolímeros, como proteínas, polissacarídeos e seus derivados, são polímeros naturais que são tipicamente degradados no meio ambiente devido a processos físicos, químicos e biológicos naturais, especialmente seu metabolismo por microrganismos (Alizadeh-Sani, Mohammadian, & Shahbazi, 2020).

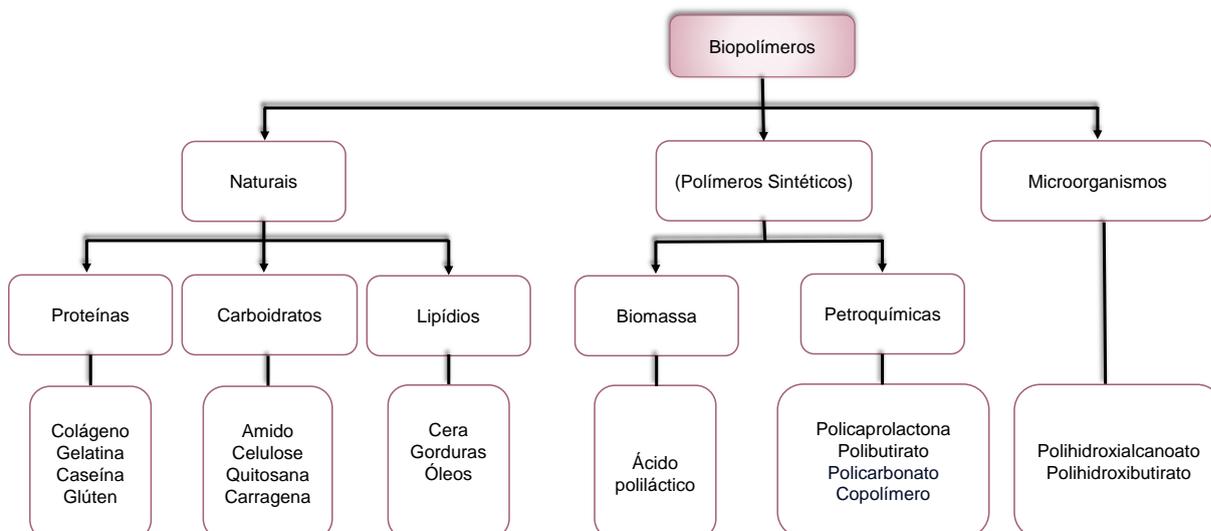
Esses materiais são biodegradáveis e, portanto, menos prejudiciais ao meio ambiente do que os polímeros convencionais. Além disso, os biopolímeros podem ser modificados para melhorar suas propriedades, tornando-os adequados para uma ampla gama de aplicações, incluindo embalagens, materiais de construção e dispositivos médicos (Taherimehr *et al.*, 2021).

De acordo com Zhong *et al.*, (2020), os biopolímeros podem ser obtidos de fontes renováveis, originando-se da biomassa direta, por meio da polimerização de monômeros de base biológica, bem como através de diferentes tipos de microrganismos, tais como bactérias em um meio alimentar especializado em nutrientes adequados. Alguns exemplos de proteínas utilizadas pela indústria são amplamente empregados na fabricação de alimentos, medicamentos, cosméticos, materiais biomédicos e outros produtos (Abdul Khalil *et al.*, 2017; LI *et al.*, 2022; Mangaraj *et al.*, 2019; Sanyang; Jawaid, 2019).

Os biopolímeros, conforme apresentado na Figura 2, são classificados em três categorias distintas com base no método de origem e síntese.

- Naturais: são materiais desenvolvidos a partir de biomassa direta/fontes naturais como proteínas, polissacarídeos e lipídios derivados de plantas ou animais (Abdul Khalil *et al.*, 2017; Saklani *et al.*, 2019);
- Polímeros sintéticos: Materiais produzidos a partir de monômeros de base biológica, como poli ácido láctico (PLA), a policaprolactona (PCL), os copoliésteres aromáticos como o polibutirato (PBAT) e os copoliésteres alifáticos (por exemplo, PSA) conhecidos como polímeros superabsorventes (Taherimehr *et al.*, 2021; Zhong *et al.*, 2020);
- Microrganismos: São materiais produzidos a partir da síntese de microrganismos ou bactérias geneticamente modificadas, (polihidroxicanoatos – PHAs, polihidroxibutiratos – PHB e polihidroxibutirato-valerato (PHBV) (Regubalan *et al.*, 2018);

Figura 2 – Diferentes categorias de biopolímeros de acordo com suas fontes de origem



Fonte: Adaptado de Taherimehr *et al.*, (2021)

Uma questão crucial é a não biodegradação e possíveis dificuldades em reutilizar a maioria dos polímeros provenientes do petróleo, resultando no acúmulo de lixo plástico sem destino apropriado, que pode levar décadas ou séculos para se decompor na natureza (Brito *et al.*, 2011).

Em busca de soluções de materiais sustentáveis para aquisição, produção e consumo responsável, os biopolímeros oferecem alternativas apropriadas para a produção de embalagens, pois são biodegradáveis, biocompatíveis, não tóxicos e ambientalmente seguros. Além disso, são renováveis, representando uma alternativa promissora e sustentável para reduzir o uso de embalagens sintéticas derivadas do petróleo (Rocha *et al.*, 2018; Taherimehr *et al.*, 2021).

No entanto, em comparação com os polímeros convencionais, os biopolímeros apresentam características sensíveis à umidade que reduzem as propriedades mecânicas, como resistência à tração, e aumentam a permeabilidade ao vapor de água, dificultando sua aplicação em embalagens de alimentos (Turan, D., Gunes, G., Kilic, 2018). Para utilizar polímeros biodegradáveis em embalagens, é necessário melhorar alguns fatores, como fragilidade, alta permeabilidade ao vapor e comportamento em baixas temperaturas de distorção térmica (Abdillah; Charles, 2021; Mohd Nizam *et al.*, 2021).

Diferentes estratégias têm sido exploradas, incluindo a modificação da estrutura química por meio da adição de aditivos, para melhorar as propriedades físico-químicas dos biopolímeros. Marichelvam; Jawaid e Asim (2019) estudaram as propriedades do amido de milho e arroz para aplicações em embalagens alternativas. Foram produzidas diversas amostras de bioplásticos com diferentes composições de amido de milho, arroz, ácido cítrico, glicerol e

gelatina. Os resultados revelaram que as amostras preparadas com a adição de ácido cítrico apresentaram melhor degradabilidade, vida útil do material e propriedades mecânicas.

Dentre os diversos biopolímeros estudados, o amido é amplamente utilizado para desenvolver produtos recicláveis, pois apresenta comportamento termoplástico com o auxílio de um plastificante, além de apresentar propriedades mecânicas consideráveis e ser leve. Por essas características, a matéria-prima tem despertado grande interesse no mercado de polímeros convencionais, por meio da incorporação de outros componentes na matriz polimérica (Garrison; Murawski; Quirino, 2016).

### **2.3 Amido**

Os carboidratos, também conhecidos como glicídios ou açúcares, são nutrientes essenciais que desempenham um papel central em diversas funções, incluindo a nutrição celular nos organismos vivos (Apriyanto; Compart; Fettke, 2022). São materiais renováveis que retornam à natureza na forma de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e água (H<sub>2</sub>O) após passarem por processo de degradação, sem causar poluição ao meio ambiente (Wang *et al.*, 2021).

O amido é um exemplo de polissacarídeo natural, biodegradável e renovável, composto por um grande número de unidades de glicose unidas por ligações glicosídicas. Ele pode ser encontrado em forma de grânulos com diferentes características, variando em formato e tamanho, e é encontrado em culturas como leguminosas, milho, batata e arroz (Adewale; Yancheshmeh; Lam, 2022).

Devido ao seu baixo custo e à crescente demanda por alimentos saudáveis, o amido tem despertado interesse na indústria alimentícia devido aos benefícios que esse carboidrato oferece, como seus efeitos nutricionais e seu uso como fonte de energia (Bemiller, 2019). Além de possuir propriedades físico-químicas, o amido também apresenta uma fração denominada amido resistente, que desempenha uma função semelhante à fibra alimentar em termos de digestibilidade, impactando positivamente em muitos processos tecnológicos (Wang *et al.*, 2021).

O amido é empregado não apenas na indústria de alimentos, mas também nos setores farmacêutico, cosmético, de papel e têxtil, sendo utilizado como material termoplástico na produção de embalagens descartáveis e outros produtos (Li *et al.*, 2022). Por apresentar características biodegradáveis, ele pode substituir materiais derivados do petróleo, que causam danos ambientais significativos (Estevez-Areco *et al.*, 2019).

A busca pela melhoria das propriedades físicas, químicas e funcionais do amido natural industrial leva à sua modificação por meio de processos físicos, químicos, enzimáticos ou combinações desses métodos (Bemiller, 2019). Isso permite a introdução de características específicas, como formação de filme, viscosidade, consistência, transparência, brilho do gel, redução de sinérese, retrogradação, gelificação, estabilidade térmica e propriedades de queima.

Nesse sentido, o amido extraído de plantas é chamado de amido nativo, enquanto o amido que passou por alguma forma de transformação (biológica, química ou física) é chamado de amido modificado (Adewale; Yancheshmeh; Lam, 2022). Entre os polímeros naturais existentes, o amido é o segundo mais abundante no mundo, perdendo apenas para a celulose (Rocha *et al.*, 2018).

Devido às suas características físico-químicas e funcionais específicas, esse glicídio é de grande relevância em diversos setores. O amido é caracterizado pela sua insolubilidade em água fria, baixa estabilidade e tendência à retrogradação, podendo ser modificado por processamento. A modificação é importante para melhorar a funcionalidade e ampliar sua aplicação nos setores de interesse (Ogunsona; Ojogbo; Mekonnen, 2018).

Normalmente, o amido puro apresenta cor branca e não apresenta sabor ou cheiro específico. Além disso, na sua forma pura, o amido não se dissolve em água fria ou álcool. É atóxico, bioabsorvível e semipermeável ao dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). O amido é composto por dois tipos de moléculas, a amilose linear e a amilopectina ramificada (Mohd Nizam *et al.*, 2021).

### 2.3.1 Amilose e amilopectina

O amido é um dos polímeros naturais mais abundantes na natureza, o que o torna ser amplamente utilizado na indústria alimentícia devido ao seu baixo custo, abundância, biodegradabilidade e natureza comestível (Cui *et al.*, 2021; Estevez-Areco *et al.*, 2019). O amido é constituído basicamente por grânulos que contém a mistura de dois compostos: amilose e amilopectina que podem variar de acordo com as características e proporções definidas por cada origem vegetal (Apriyanto; Compart; Fettke, 2022).

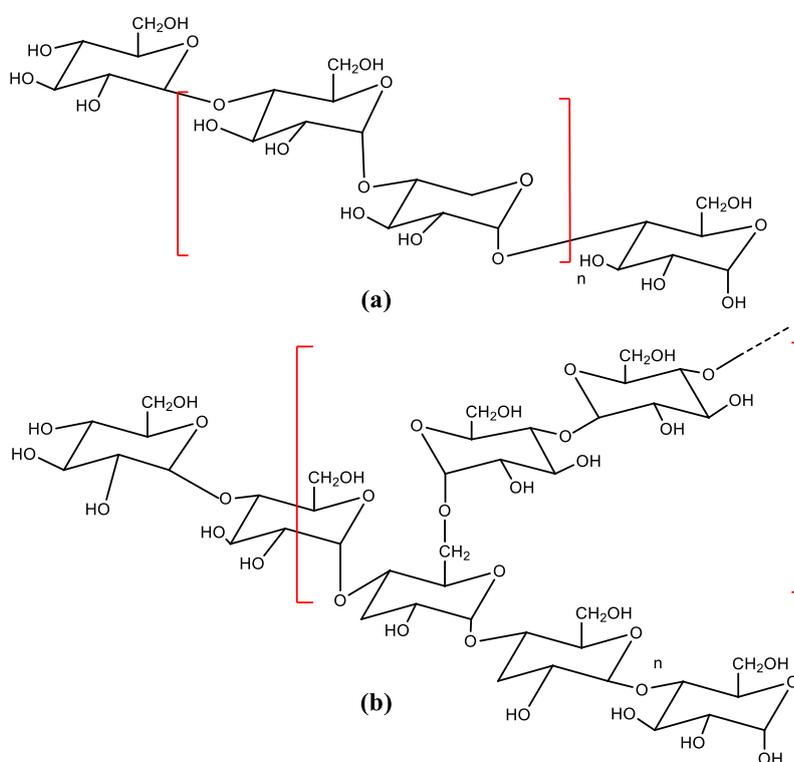
Estruturalmente, o grânulo do amido, é constituído por unidades de glicose que estão organizadas basicamente por dois homopolissacarídeos, ou seja, é um polissacarídeo constituído por moléculas de glicose unidas por ligações glicosídicas denominados de amilose e amilopectina, como mostra na Figura 3 (a e b) (Wang *et al.*, 2021).

A amilose, é um polímero linear composto por ligações glicosídicas que são compostas por unidades de D-glicose ligadas por ligações  $\alpha$ -(1 $\rightarrow$ 4) atuando com menos de 1% de suas

ramificações em  $\alpha$ -(1 $\rightarrow$ 6). A molécula apresenta características de conformação helicoidal e possui um interior hidrofóbico devido ao arranjo das unidades de glicose, onde suas propriedades conformacionais e lineares são únicas em sua capacidade de formar filmes e complexos com álcoois, ácidos e lipídios (Adewale; Yancheshmeh; Lam, 2022).

Por outro lado, a amilopectina considerada uma das maiores biomoléculas conhecidas, é um polímero altamente ramificado, formada por unidades de D-glicose que se encontram ligadas através de ligações  $\alpha$ -(1 $\rightarrow$ 4) com aproximadamente 5% de suas ramificações em  $\alpha$ -(1 $\rightarrow$ 6) (Adewale; Yancheshmeh; Lam, 2022).

Figura 3 – Estrutura química da amilose (a) e amilopectina (b)

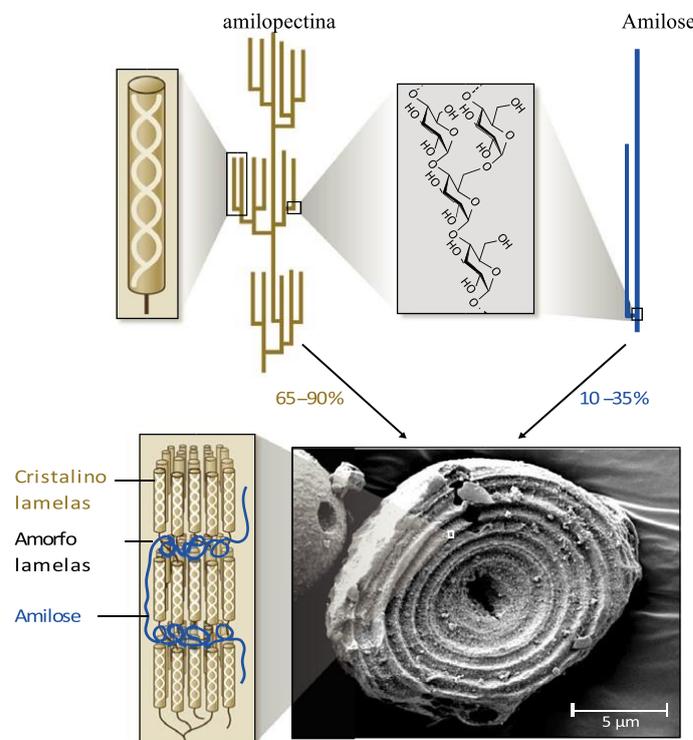


Fonte: Adaptado de Brito *et al.*, (2011)

A amilopectina é geralmente o maior componente e pode compor cerca de 30% a 99% dos grânulos de amido, os quais ainda contém pequenas quantidades de proteínas e fosfolipídios. Enquanto que a amilose apresenta excelentes propriedades filmogênicas e pode formar filmes incolores e transparentes (Cui *et al.*, 2021). Sendo assim, a cadeia externa da amilopectina está disposta em uma dupla hélice, e algumas formam uma estrutura cristalina. Um dos principais fatores que determinam as propriedades dos grânulos de amido é o arranjo de moléculas lineares e ramificadas distribuídas dentro dos grânulos (Cunha, 2016).

Para Borba *et al.*, (2021) os grânulos de amido são compostos por macromoléculas lineares e ramificadas que permitem um arranjo semicristalino ordenado das moléculas de uma maneira específica. Em função da forma como estes polímeros se organizam, os grânulos de amido podem apresentar duas regiões: cristalina amorfas e são reordenadas de forma alternada assim como está apresentada na Figura 4. Dentre as características gerais que o amido apresenta, a zona na região cristalina, exibem ramificações em formato de dupla-hélice de moléculas de amilopectina agrupadas e estruturalmente estabilizadas devidos às ligações de hidrogênio.

Figura 4 – Estrutura do grânulo de amido em microescala (5  $\mu\text{m}$ ), consistindo de lamelas que apresentam regiões amorfas e cristalinas, contendo cadeias de amilose e amilopectina



Fonte: Seung, (2020)

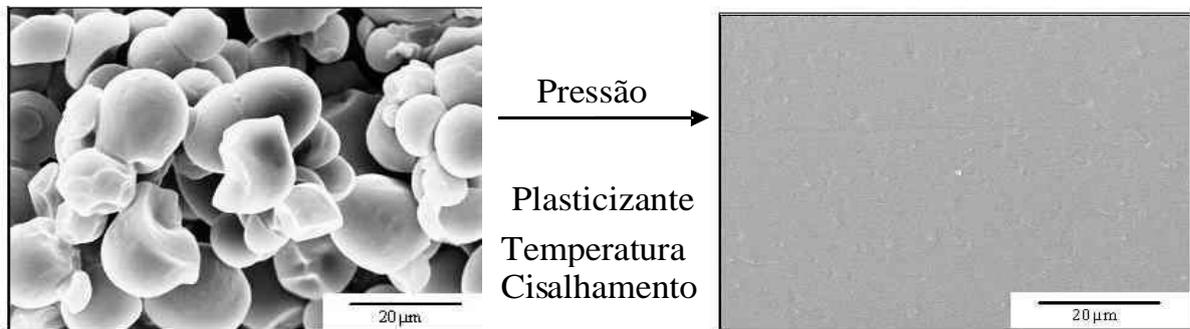
As regiões amorfas são formadas por interações entre as cadeias de amilose e amilopectina e, portanto, são sequencialmente desordenadas e estas ramificações são distribuídas em uma estrutura ordenada formando lamelas cristalinas no interior dos grânulos. Nesse sentido, as regiões amorfas são menos regulares, pois são formadas por interações entre as cadeias de amilose e amilopectina (Borba *et al.*, 2021; Seung, 2020).

### 2.3.2 Amido Termoplástico (TPS)

O amido termoplástico (TPS), é um produto resultante da combinação de amido com a adição de plastificante que pode ser água e/ou glicerol e são obtidos através do aquecimento e da aplicação de cisalhamento contínuo. Esse processo resulta em uma fase homogênea, contínua e viscosa. As cadeias de amilose e amilopectina se intercalam nessa fase fundida, enquanto a estrutura semicristalina do grânulo de amido é destruída (Corradini *et al.*, 2007).

O amido em sua forma granular não apresenta características termoplásticas. No entanto, quando processados ou submetidos a variáveis como pressão, cisalhamento e temperatura (90 a 180 °C) e na presença de aditivos como plastificantes como a água e/ou glicerol, o amido se transforma em um material fundido. O TPS pode ser processado por meio de técnicas tradicionais do processamento de plástico, via gelatinização em meio aquoso, injeção ou via extrusão. As propriedades finais do amido dependem da escolha dos aditivos, do processo de produção e das condições de processamento. A estrutura morfológica do amido natural e do TPS pode ser visualizada na Figura 5 (Zdanowicz; Sałasińska, 2023).

Figura 5 – Morfologia do amido natural e do TPS visualizados em microscopia eletrônica de varredura (MEV). Após o processamento, ocorre a destruição completa da estrutura granular do amido, dando, então, a origem a uma fase final contínua e homogênea



Fonte: Corradini *et al.*, (2007)

Na estrutura do amido, a presença de grupos hidroxila (OH) em sua superfície, os grânulos de amido exibem propriedades hidrofílicas e possuem forte associação intermolecular formadas via ligação hidrogênio. A baixa estabilidade térmica é um dos fatores observados devido à proximidade entre os valores de temperatura de fusão e decomposição térmica do amido. Essa condição resulta em desafios durante o processamento, e a preservação da cristalinidade compromete as propriedades mecânicas finais das embalagens produzidas

com esse material. Como forma de melhorar suas propriedades, vários métodos têm sido desenvolvidos dando características positivas ao amido (Corradini *et al.*, 2007).

Foi relatado que os amidos (TPS) foram produzidos usando diferentes tipos de amido para preparar filmes biodegradáveis à base de amido. Estudos anteriores na literatura relatam que Bergel *et al.*, (2017) compararam a influência do revestimento de quitosana nas propriedades funcionais de espumas de amido TPS de amido de batata, amido de mandioca e amido de milho. Os resultados indicaram que o material de espuma à base de amido de milho apresentou maior resistência à tração e módulo de Young devido à sua maior densidade em comparação com outras espumas.

Palai *et al.*, (2019) prepararam os filmes complexos de amido de mandioca TPS ou amido de milho, ácido polilático e metacrilato de glicidil, e descobriram que um maior teor de cristalinidade na matriz de amido de mandioca TPS induzia propriedades de tração mais altas de PLA/filme termoplástico de amido de mandioca em comparação com PLA/filme termoplástico de amido de mandioca.

Em geral, a adição de plastificantes ao amido, é um método que estabelece a redução a transição vítrea ( $T_g$ ) do amido abaixo de sua temperatura de decomposição e converter o amido em um amido termoplástico, que atribui ao seu processamento (Corradini *et al.*, 2007).

### 2.3.3 Plastificantes

A União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC) define um plastificante como uma substância ou material incorporado a uma matriz polimérica que geralmente pode ser um plástico ou elastômero. A sua principal função é melhorar a flexibilidade, reduzir a tensão de deformação, dureza, densidade, viscosidade e carga eletrostática de um polímero, ao mesmo tempo melhorando os aspectos quanto a resistência a fratura (Langer *et al.*, 2020).

Na escolha do plastificante adequado para a elaboração de um filme, é importante considerar sua estrutura química, massa molecular e compatibilidade com o polímero e solvente utilizados na formulação. É essencial que o plastificante não seja volátil, não tóxico e miscível com o solvente para evitar a separação de fases durante o processo de secagem. Quando o plastificante é compatível com o polímero utilizado para formação do filme, a microestrutura será mais linear e uniforme, resultando em uma melhor qualidade do produto final. Além disso, é importante considerar as modificações desejadas no produto final ao optar por um determinado plastificante (Suderman; Isa; Sarbon, 2018; Vieira *et al.*, 2011).

Entre os plastificantes mais comuns utilizados em filmes de amido, os polóis, como o glicerol e o sorbitol, são escolhidos por serem eficazes no processo de plastificação. Nesse sentido, a molécula pequena do glicerol pode se encaixar facilmente entre as cadeias poliméricas do amido, tornando-o um plastificante de alta eficiência para esse tipo de material. Além disso, sua estrutura química, é semelhante à do amido, o que facilita a compatibilidade entre os dois compostos (Özeren *et al.*, 2021).

Para aumentar a flexibilidade dos polissacarídeos solúveis em água, o glicerol é comumente aplicado como plastificante, devido ao grande número de hidroxilas presentes em sua composição. Essas hidroxilas ajudam a reduzir as forças intermoleculares entre as longas cadeias poliméricas, aumentando a mobilidade dessas cadeias e resultando em filmes mais flexíveis. A gelatinização do amido geralmente ocorre por aquecimento em meio aquoso, mas isso não é possível sem a presença de um plastificante, já que a temperatura de transição vítrea e a de fusão do amido puro e seco são maiores do que sua temperatura de decomposição. O plastificante ajuda a “amolecer” e diminuir o ponto de fusão do material durante o processamento (Esmaeili *et al.*, 2019).

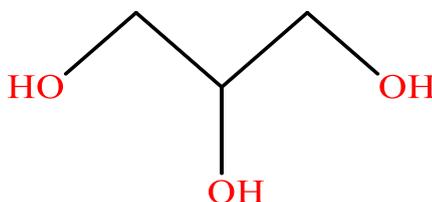
Investigações recentes sobre a utilização de glicerol em filmes como plastificantes apontam a sua eficiência e a melhoria das propriedades mecânicas dos filmes, proporcionando elasticidade, aumento no percentual de alongamento na ruptura. Essas características são favoráveis para aplicação em produtos como as embalagens que solicitam de maior capacidade de deformação.

Nascimento *et al.*, (2021) avaliaram o efeito do glicerol em diferentes proporções como plastificante na obtenção de filme biodegradável a base de amido e PVA. Estudos mostraram que a adição de glicerol melhorou as propriedades mecânicas das blendas, aumentando alongamento na ruptura de até 67%.

#### 2.3.4 Glicerol

O glicerol conhecido comercialmente como propano-1,2,3-triol de acordo com a nomenclatura IUPAC, é um composto orgânico pertencente ao grupo dos álcoois. Sua fórmula química é  $C_3H_8O_3$  como mostra na Figura 6, e é um composto líquido viscoso e incolor, inodoro, higroscópico, de sabor adocicado. O glicerol bruto tem uma pureza de 70-80% e é purificado antes da venda comercial para 95,5-99%. Quimicamente, o glicerol apresenta três grupos hidroxilas dentro de uma molécula de glicerol, que por sua vez, é responsável pela natureza higroscópica e ser solúvel em água (Alashek; Keshe; Alhassan, 2022; Teixeira *et al.*, 2021).

Figura 6 – Estrutura química do glicerol



Fonte: Alashek; Keshe; Alhassan., (2022)

O glicerol possui diversas aplicações em diferentes setores. Na indústria farmacêutica, é utilizado como estabilizante em medicamentos e pomadas. Na indústria cosmética, é empregado em produtos como cremes hidratantes, sabonetes líquidos, shampoos e condicionadores devido às suas propriedades umectantes e emolientes. No setor alimentício, é utilizado como adoçante e umectante para melhorar a textura de alguns alimentos (Goyal; Hernández; Cochran, 2021; Kunduru *et al.*, 2023).

### 2.3.5 Gelatina e retrogradação

A gelatinização é uma das transições mais importantes que ocorrem no processamento do amido. Durante esse processo, a estrutura química do amido é modificada em resposta a determinadas condições de calor, umidade e temperatura. A gelatinização ocorre antes da retrogradação e as condições criadas durante esse processo são críticas para o fenômeno da retrogradação (Chang *et al.*, 2021; Zhu; Liu, 2020).

A gelatinização é um processo contínuo e gradual. À medida que a temperatura aumenta, as regiões amorfas e relativamente instáveis nos grânulos de amido são rompidas. O poder de inchamento das diferentes variedades de amido não sofre alteração em temperaturas abaixo de 60 °C. Essas temperaturas não são suficientemente altas para quebrar as fortes ligações de hidrogênio entre as cadeias poliméricas responsáveis pela estrutura cristalina dos grânulos de amido (Donmez *et al.*, 2021; Rodrigues *et al.*, 2018).

O amido é praticamente insolúvel em água fria, embora possa sofrer um certo grau de inchamento. Essa insolubilidade ocorre devido às fortes ligações de hidrogênio presentes em sua estrutura química, o que o torna mais compacto e impede a penetração da água. No entanto, quando aquecido em água, a penetração da água nos grânulos de amido se torna possível, permitindo a dissociação da amilose fora dos grânulos (Donmez *et al.*, 2021).

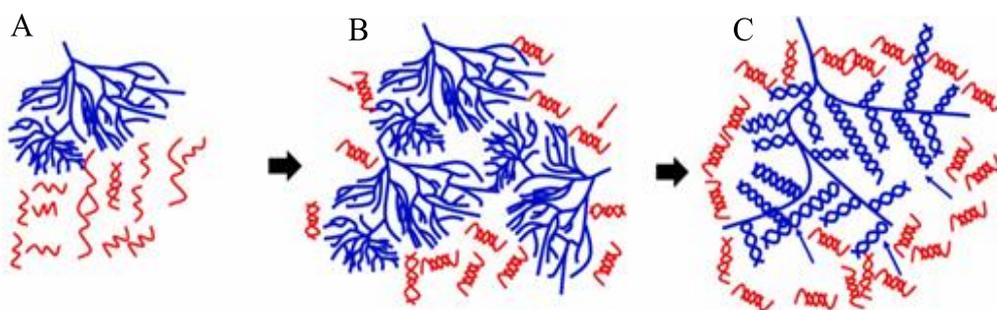
O grau de gelatinização pode variar conforme os métodos de extração do amido, relaciona-se com a questão da estabilidade do amido. Uma vez atingida a temperatura inicial de gelatinização, as estruturas granulares e cristalinas começam a se decompor, e a amilose se decompõe gradualmente. Ocorrem diferenças significativas nas propriedades da pasta de amido em diferentes graus de gelatinização (Donmez *et al.*, 2021; Rodrigues *et al.*, 2018).

A retrogradação do amido é uma mudança que ocorre de forma inevitável em alimentos amiláceos durante o processamento e armazenamento em que o amido gelatinizado se reorganiza em um estado ordenado. Sendo assim, comprimento da cadeia, proporção e estrutura da amilose e amilopectina diferem em diferentes tipos de grânulos de amido, processos influenciados por genes e crescimento (Chang *et al.*, 2021; Santhosh; Nath; Sarkar, 2021).

A retrogradação do amido pode ser dividida em retrogradação de curto prazo e retrogradação de longo prazo, causada pelo rearranjo molecular da amilose ou da amilopectina sob diferentes condições de liderança durante diferentes períodos de armazenamento, respectivamente. Durante a retrogradação, as cadeias de amido são recombinadas durante a fase de resfriamento e formam então uma dupla hélice. A dupla hélice é então empacotada em cristais (Chang *et al.*, 2021; Santhosh; Nath; Sarkar, 2021).

A Figura 7 (a - c) abaixo ilustra, por meio de setas, a representação esquemática da dupla hélice da amilose e amilopectina, além da divisão da recristalização em três etapas: (a) nucleação, (b) expansão e (c) maturação. Na etapa de nucleação, ocorre a formação de núcleos de cristais; na etapa de expansão, há o crescimento desses núcleos; e, por fim, na etapa de maturação, ocorre o aperfeiçoamento dos cristais e o crescimento adicional. A eficiência dessas etapas é dependente da temperatura aplicada.

Figura 7 - Etapas de crescimento de cristais no processo de recristalização do amido. A) formação de núcleos de cristal; B) crescimento do cristal; C) perfeição de cristais ou crescimento adicional de cristais



Fonte: Adaptado de Chang *et al.*, (2021)

Nesse sentido, a temperatura influencia diretamente na ocorrência destes três estágios, a nucleação, em que ocorre a formação de núcleo de cristais, a expansão, na qual crescimento do núcleo de cristal e por fim, a maturação em que ocorre o aperfeiçoamento dos cristais e a adição de crescimento (Liu *et al.*, 2023; Chang *et al.*, 2021).

### 2.3.6 Método de evaporação por solvente: *Casting Solution*

O termo “*Casting solution*” se refere a técnica laboratorial utilizada no processo de evaporação por solvente, em que este método, consiste na preparação da dissolução do material polimérico em um solvente adequado, formando uma solução homogênea. Em seguida a solução é vertida sobre uma superfície plana e lisa, na qual ocorre a evaporação do solvente de forma lenta. Normalmente, são obtidos filmes e membranas com estrutura densa (Cui *et al.*, 2021).

Nascimento *et al.* (2021), prepararam um novo material biodegradável à base de amido de araruta, PVA e glicerol como plastificante usando o método de *casting solução*. Além disso, as blendas poliméricas exibiram bons aspectos mecânicos, térmicos e morfológicos e que a presença do PVA melhorou muito as propriedades mecânicas dos filmes comparados as misturas com o amido de araruta e glicerol.

Zolek-Tryznowska e Kaluza (2021), prepararam filmes a partir de vários amidos como amido de milho, batata, aveia, arroz e tapioca pelo método *casting*. Através dos estudos avaliaram os efeitos de suas propriedades mecânicas, em que os amidos de batata, tapioca e aveia apresentaram resistência à tração desejável que são 1,49, 0,78 e 0,36 MPa, respectivamente.

Autores como Leiva; Fernandez; Toro (2022), desenvolveram filmes ativos à base de amido e glúten de trigo incorporados em óleos essenciais de canela e açafrão usando o método de *casting* de solução. Os filmes desenvolvidos com os óleos essenciais, apresentaram grande potencial para design de embalagens ativas de caráter biodegradável.

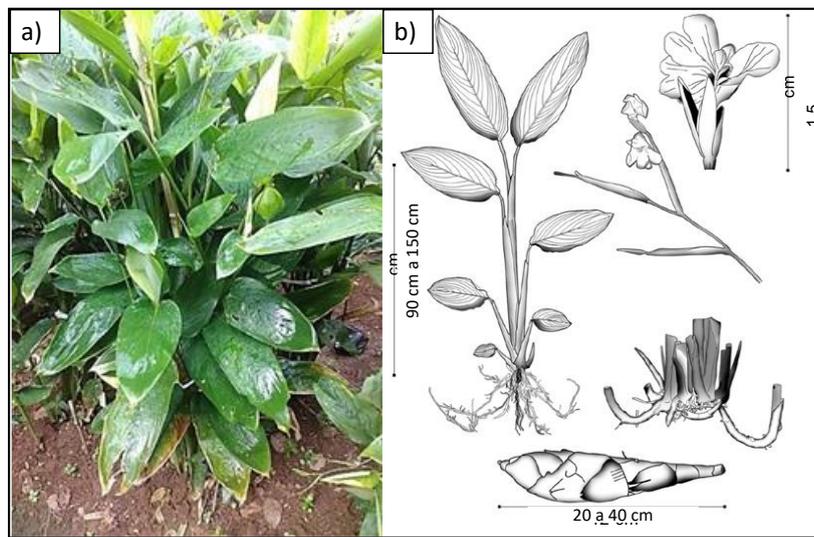
## 2.4 Araruta

*Maranta arundinacea L.*, popularmente conhecida como araruta, é uma planta herbácea nativa das regiões tropicais da América do Sul, incluindo o Brasil. Além disso, pode ser encontrada em outras localidades, como no Sudeste Asiático, Índia, Filipinas e Caribe.

Pertencente à família Marantaceae, que engloba aproximadamente 30 gêneros e 530 espécies, essa planta faz parte do grupo das Zingiberales (Guilherme *et al.*, 2018; Viswan *et al.*, 2022).

A araruta é uma planta perene que pode atingir alturas entre 90 e 150 centímetros, Figura 8 (a e b). Suas características incluem flores brancas, folhas verdes grandes com comprimento de 10 a 20 cm, e rizomas canudos grossos que apresentam largura de 2,5 a 3 cm e comprimento de 20 a 40 cm. Geralmente, os rizomas da araruta são encontrados agrupados em dois ou três, ou até mesmo de forma isolada (Sediyama *et al.*, 2022; Tarique *et al.*, 2021).

Figura 8 - a) *Maranta arundinacea* L., b) aspectos morfológicos



Fonte: Adaptado de Deswina; Priadi (2020)

No Brasil, são cultivados três tipos de araruta: bananeira, crioula e comum. Dentre eles, destaca-se a variedade comum, cujos rizomas têm formato fusiforme e coloração clara como está representado na Figura 9. Eles medem aproximadamente 10 a 25 cm de comprimento e são cobertos por escamas, das quais são extraídos amidos leves e altamente digestíveis. Essa característica torna a araruta muito apreciada na gastronomia, sendo comumente utilizada no preparo de mingaus, bolos e biscoitos (Araújo *et al.*, 2021; Brito *et al.*, 2021).

Figura 9 - Rizoma araruta (*Maranta arundinacea* L.)

Fonte: Viswan *et al.*, (2022)

Atualmente, a produção de araruta é pequena e tem diminuído devido à preferência da indústria alimentícia pelo uso de amido de mandioca, farinha de milho ou trigo. Isso resultou em uma redução na demanda e até mesmo no cultivo da araruta. No entanto, devido às suas qualidades tecnológicas e funcionais, esse amido tem despertado novamente o interesse de pesquisadores e da indústria, levando ao ressurgimento do cultivo e à reintrodução da matéria-prima no mercado (Rodrigues *et al.*, 2018).

Devido à sua fácil digestão, a fécula de araruta é recomendada para pacientes com restrições ao glúten, como aqueles que sofrem de doença celíaca. Além disso, é indicada para idosos, crianças e pessoas debilitadas ou em processo de recuperação (Abdillah; Charles, 2021; Araújo *et al.*, 2021; Malki *et al.*, 2023).

#### 2.4.1 Amido de araruta

A araruta é considerada um material vegetal com alto teor de amido, que é extraído dos rizomas após a trituração e pode ser utilizada na forma de polvilho no qual este material é peneirado e levado para a separação de suas fibras, para posteriormente realizar a retirada da fécula através da decantação (Reddy, 2015).

O amido de araruta é rico em amilose, podendo apresentar um teor equivalente de 17% a 25% e chega a atingir valores máximos em até 35%, o que se torna benéfico quanto a sua

aplicação em preparo de filmes, pois a rigidez e textura favorecem suas propriedades físicas (Nogueira; Fakhouri; de Oliveira, 2018).

Nogueira et al (2018) investigam as propriedades da araruta como forma de explorar seu potencial para a elaboração de um novo polímero alternativo como meio de substituir polímeros convencionais devido ao seu alto teor de amilose. Os resultados obtidos mostraram que a araruta apresentou maior teor de amilose 35,20 % em comparação com outros amidos como aipim 17 %, sagu 24-27 %, batata 20-25 %, arroz 26 – 25 %, trigo 27 % e milho 26–28 %.

Outros estudos como feitos também por Mohd Nizam *et al* (2021) revelaram valores superiores quanto ao teor de amilose por meio da investigação das propriedades da araruta comparados a outras fontes de amido como mencionados na Tabela 1.

Tabela 1 - Teores de amilose e amilopectina de diferentes fontes de amido

<b>Fontes</b>	<b>Amilose (%)</b>	<b>Amilopectina (%)</b>
Araruta	20,5	79,5
Banana	17	83
Mandioca	18,6	81,04
Milho	28	72
Batata	17,8	82,2
Arroz	35	65
Tapioca	16,7	83,3
Trigo	20	80

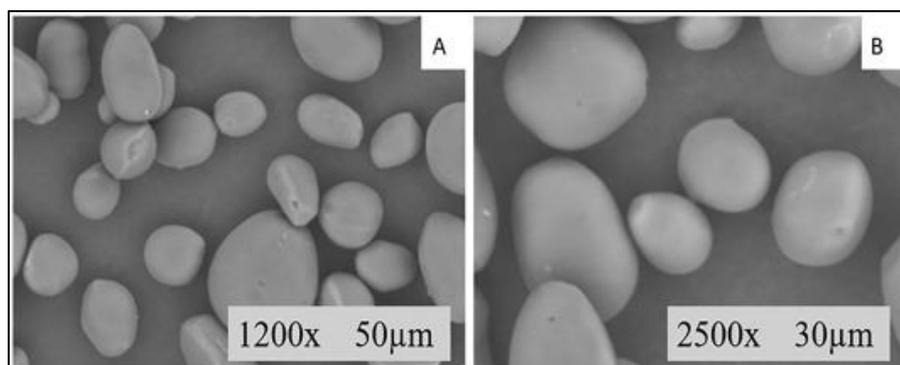
Fonte: Mohd Nizam *et al.*, (2021)

O tamanho dos grânulos e de outros componentes que associam as cadeias poliméricas junto a elas a proporção da amilose e amilopectina, por sua vez, definem as características estruturais e funcionais de diversas fontes poliméricas do amido (Donmez *et al.*, 2021).

A diversidade de fontes de amido e as proporções únicas dessas frações (amilose e amilopectina), entre outras características como a presença de demais componentes, a morfologia dos grânulos e o tamanho que elas apresentam, proporcionam a diferenciação do amido e podem ser definidas a partir de sua origem botânica (Donmez *et al.*, 2021; Pedrosa Silva Clerici; Schmiele, 2018).

Nesse sentido, o amido de araruta, por exemplo, apresenta na distribuição da sua microestrutura de tamanho heterogêneo, formas geométricas circulares e elipsoide. Com superfície dos grânulos de aspecto liso e com ausência de fissuras, indicando que os grânulos estão sem danos e intactos como mostra a figura 10 (Nogueira; Fakhouri; de Oliveira, 2018).

Figura 10 – Microscopia eletrônica da distribuição do tamanho e da microestrutura do amido de araruta



Fonte: Tarique *et al* (2021); Nogueira *et al* (2018)

#### 2.4.2 Embalagens ativas

As embalagens ativas ou embalagens inteligentes são aquelas que por meio da incorporação de determinados aditivos conseguem manter a qualidade e prolongar a vida útil dos alimentos sem perder a sua integridade (Nascimento *et al.*, 2021). De modo geral, a utilização das embalagens ativas vem sendo impulsionada devido às propriedades que este material oferece, como a conservação dos alimentos em prateleira, tendo em vista a garantia e segurança contra micro-organismos patogênicos (Romão; Bettencourt; Ribeiro, 2022; Tosif *et al.*, 2021).

Para aplicações em embalagens ativas, os biopolímeros tornam-se bastante promissores, visto que este material não apresenta toxicidade, são inodoros e são comestíveis. Além de tudo, são biodegradáveis, apresentam boa compatibilidade com outros compostos e geram menos impactos ambientais. Os agentes antimicrobianos são um dos agentes químicos mais estudados, visto que este componente ativo inibe o crescimento de micro-organismos que são responsáveis pela causa de degradação em alimentos. Exemplos estes que inclui *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Salmonella spp.* entre outros (Romruen *et al.*, 2022).

Basicamente, neste tipo de embalagens ativas, o agente antimicrobiano que foi adicionado em um polímero tem como finalidade inibir o crescimento de microrganismos em alimentos, contribuindo para sua preservação e prolongando sua vida útil. As embalagens ativas são caracterizadas por conter agentes inteligentes, como sensores, capazes de medir variáveis químicas, físicas e biológicas nos produtos alimentícios, incluindo o sensor de pH, que é utilizado para detectar mudanças relacionadas à deterioração causada pelo crescimento de microrganismos e alterações químicas dos alimentos (Yildirim *et al.*, 2018; Zhao *et al.*, 2022).

As embalagens tem como função transportar e proteger os alimentos. No entanto a tecnologia atualmente, não busca apenas que estes materiais possam atender as funções básicas, mas também buscam alternativas para melhorar a interação do produto e além disso, conseguir perceber variações que o ambiente favorecido está, através da ocorrência de interações (Zhao *et al.*, 2022).

Para Bahrami *et al* (2020), as embalagens inteligentes permitem que consumidores reconheçam mudanças nas propriedades dos alimentos, devido a presença de componentes na matriz polimérica que funcionam como os indicadores. Atualmente, filmes inteligentes baseados em indicadores sensíveis ao pH são capazes de monitorar o frescor dos alimentos, a presença de umidade e são capazes de controlar o crescimento bacteriano (Mary *et al.*, 2022)

Estudos recentes têm sido conduzidos e publicados na literatura sobre a produção de filmes a base de amido com atividade antibacteriana para fins alimentícios e na aplicação de curativos. Yong e Liu (2020), verificaram os avanços quanto a preparação e caracterização e as possíveis aplicações de filmes ricos em antocianinas como forma de prolongar a vida útil dos alimentos devido às suas propriedades antioxidantes e antimicrobianas.

#### 2.4.3 Nanopartículas de óxido de zinco (NPs ZnO)

O campo da nanotecnologia lida especificamente com materiais que compõem escalas que podem variar entre 1 a 100 nm e apresentam maior área de superfície máxima em relação ao volume. Os nanomateriais comparados a outros materiais a granel, apresentam propriedades aprimoradas e exibem qualidades únicas em termos de aspectos físicos, químicos e mecânicos o que proporciona a sua aplicação em diversos setores (Kavitha *et al.*, 2023; Khairnar *et al.*, 2022).

Materiais em nanoescala tem sido alvo de interesse no ramo medicinal, pois as NPs ZnO apresentam propriedades elétricas, magnéticas, ópticas, cicatrizantes, anti-inflamatórias e antimicrobianas. O que tem sido no ramo da pesquisa, um dos principais focos nas últimas décadas, pois esse material apresenta propriedades que contornam de forma eficaz a manifestação de doenças causadas por fungos e bactérias (Mirza *et al.*, 2019; Murali *et al.*, 2017).

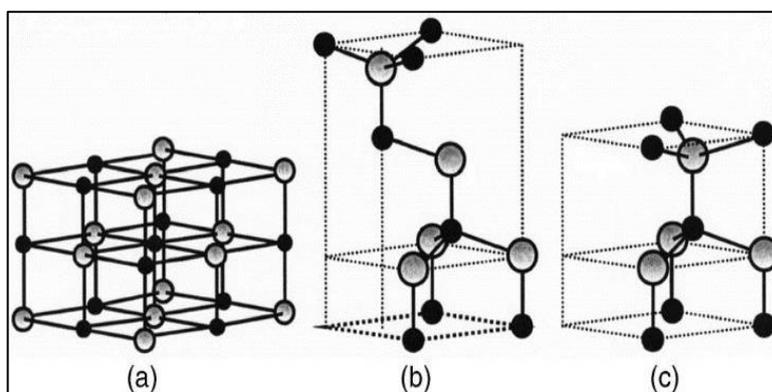
Entre as nanopartículas de óxido metálico, o óxido de zinco (ZnO) é semicondutor que chama atenção devido a sua ampla aplicabilidade na área biomédica além de suas aplicações em campos ópticos, piezoelétricos, magnético, em tratamento de águas residuais e também como fungicidas e exibem atividade antimicrobiana eficiente. Sua atividade antimicrobiana é

fortemente reforçada devido a diminuição do tamanho e aumento da área de superfície NPs ZnO (Kavitha *et al.*, 2023).

A figura 11 (a – c) mostra que o ZnO cristaliza em três formas: (a) sal-gema cúbico, (b) mistura de zinco cúbico ou (c) estrutura wurtzita hexagonal. No entanto, sob condições ambientais típicas, a estrutura cristalina “wurtzita” é termodinamicamente mais estável (Smaoui *et al.*, 2023).

Figura 11 - Representação das estruturas cristalinas para ZnO: (a) sal de rocha, (b) blenda de zinco, (c) wurtzita.

As esferas sombreadas cinza e preta denotam átomos de Zn e O



Fonte: Ozgur *et al.*, (2005)

O ZnO tem sido largamente utilizado como aditivos em revestimentos de filmes funcionais para embalagem de alimentos, pois apresentam grande potencial quanto a sua atividade antibacteriana e melhora as propriedades mecânicas (Smaoui *et al.*, 2023). Em seu estudo, Priyadarshi *et al.*, (2020), fabricaram filmes a base de carboximetilcelulose (CMC) e incluíram em sua matriz polimérica NPs ZnO em diferentes concentrações (1%, 2% e 3%) respectivamente.

Os autores relataram que a incorporação das nanopartículas a matriz polimérica melhorou as propriedades mecânicas e apresentaram atividade antibacteriana notória contra patógenos de origem alimentar: *Escherichia coli* e *L. monocytogenes*. O CMC/ZnO a 3% apresentou maior atividade antibacteriana dos filmes.

No estudo de Helmiyati *et al.*, (2021), eles investigaram o efeito de nanopartículas de ZnO na composição físico-química de filmes de (CMC-PVA). Os filmes exibiram boa atividade antibacteriana contra *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus*. Os autores ressaltam que a combinação da blenda polimérica com NPs ZnO mostraram maior resistência a tração e alongamento.

No estudo de Jayakumar *et al.*, (2019), eles elaboraram filmes compostos à base de amido-PVA incorporados com NPs ZnO e com a presença de fitoquímicos. Os filmes desenvolvidos mostraram propriedades de indicação de pH e atividade antibacteriana que indicam seu potencial promissor para aplicações de embalagem de alimentos.

Galli *et al.*, (2020), elaboraram uma blenda polimérica de Polietileno de Baixa Densidade (PEBD) – Etileno Acetato de Vinila (EVA), cujo objetivo foi desenvolver uma mistura polimérica de (LDPE-EVA) com a incorporação de NPs ZnO com a intenção de melhorar suas propriedades antibacterianas para possíveis aplicações do material polimérico na fabricação de produtos médicos. A incorporação das NPs ZnO revelou eficiência contra agente patogênicos como *Staphylococcus aureus* (Gram-positivo) e *Escherichia coli* (Gram-negativa).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Material utilizado

Os materiais utilizados para este estudo foram o amido de araruta (*Maranta arundinacea*) adquirido da empresa Torres de nome comercial Fécula de Araruta, a glicerina P.A ACS 97% produzida pelo êxodo científica, água destilada cedida gentilmente do laboratório de catálise e biocatálise (LABCAT- UFPA) e nanopartículas de óxido de zinco (ZnO) da Sigma-Aldrich.

A descrição do material utilizado neste estudo está listada na Tabela 2, assim como a composição dos reagentes e sua origem.

Tabela 2 - Materiais utilizados nos procedimentos experimentais

	Composição	Origem
Araruta ( <i>Maranta arundinacea</i> )	—	Torres Alimentos
Glicerol P.A ACS 97%	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	Êxodo científica
NPS ZnO < 100 nm	ZnO	Sigma-Aldrich
Água destilada	H <sub>2</sub> O	LABCAT

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

#### 3.2 Obtenção dos filmes de nanocompósitos

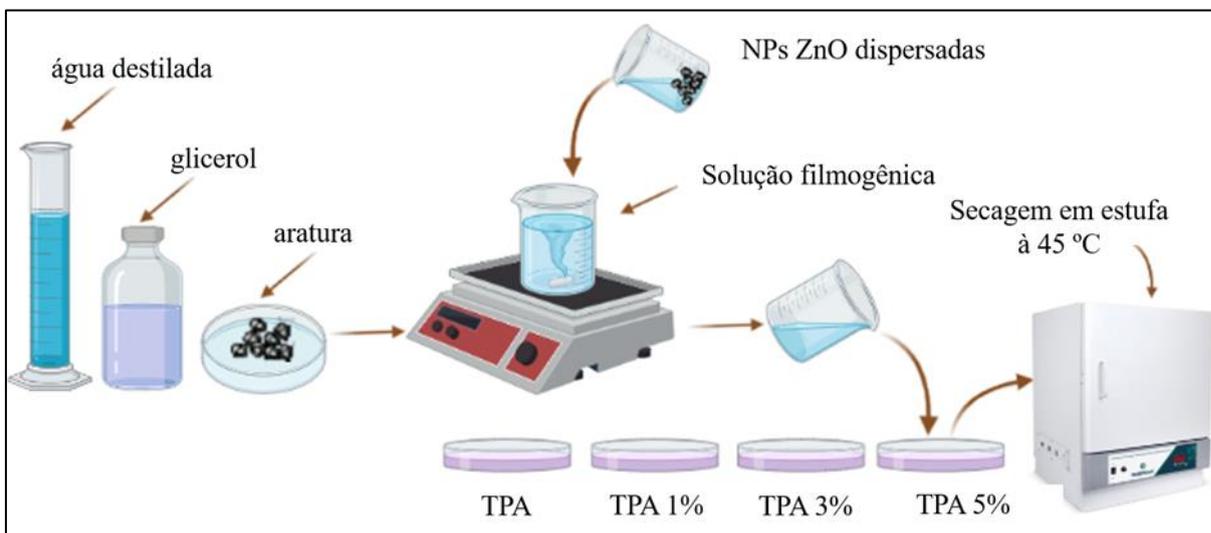
O procedimento experimental para obtenção dos filmes foi realizado no laboratório de polímeros (LABPOL) na Universidade Federal do Pará. Os filmes de TPA e TPA com NPs ZnO nas proporções de 1%, 3% e 5% (m/m) foram obtidos pelo método de evaporação por solvente (*casting solution*) reportado na literatura de Fakhouri *et al* (2019) com prévias modificações.

As quantidades estabelecidas de NPs ZnO foram adicionadas em 20 mL de água destilada e agitadas em um agitador magnético durante 30 minutos para a dispersão das nanopartículas. Em seguida, o amido de araruta e glicerol foram homogeneizados em água destilada para serem adicionados juntos à solução dispersada e aquecidos a 80 °C por 10 minutos.

As soluções filmogênicas foram vertidas em placas de Petri com dimensões 140 x 15 mm e o solvente foi removido em estufa com circulação de ar a 45 °C por 24 horas como estão

sendo representadas na Figura 12. Os filmes secos foram acondicionados em envelopes de polietileno e armazenados em dessecador contendo sílica para evitar umidade do ambiente.

Figura 12 – Sequência experimental da produção dos filmes TPA, TPA 1%, TPA3% e TPA5%



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

O Quadro 1 apresenta os valores que correspondem às respectivas proporções para cada componente dos filmes em diferentes concentrações.

Quadro 1 – Formulações dos filmes de araruta com base na concentração de NPs ZnO

<b>Amostras</b>	<b>Reagentes</b>	<b>Proporção dos filmes</b>
TPA	Amido de araruta + glicerol + água destilada	4 g AA + 1,2 g GLY + 80 mL de água destilada
TPA 1%	Amido de araruta + glicerol + água destilada + NPS ZnO < 100 nm	4 g AA + 1,2 g GLY + 80 mL de água destilada + 0,04 g NPs ZnO
TPA 3%	Amido de araruta + glicerol + água destilada + NPS ZnO < 100 nm	4 g AA + 1,2 g GLY + 80 mL de água destilada + 0,12 g NPs ZnO
TPA 5%	Amido de araruta + glicerol + água destilada + NPS ZnO < 100 nm	4 g AA + 1,2 g GLY + 80 mL de água destilada + 0,2 g NPs ZnO

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

### 3.3 Caracterização dos nanocompósitos

As amostras foram caracterizadas quanto à análise de grupos funcionais presentes na estrutura por meio da técnica de Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR). A avaliação da estabilidade térmica e das características de degradação foi realizada por análise Termogravimétrica (TGA), enquanto a morfologia da superfície dos filmes foi examinada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), incluindo o aspecto visual. Além disso, análises de umidade, solubilidade, intumescimento, espessura e ensaios mecânicos dos filmes também foram realizados neste estudo.

#### 3.3.1 Aspecto visual dos filmes

A análise visual foi realizada através da observação de modo subjetivo e por meio tátil dos filmes. As análises foram feitas a fim de avaliar aspectos quanto a cor, nível de transparência dos filmes, uniformidade baseados na metodologia descrita por Tarique; Sapuan; Khalina, (2021).

#### 3.3.2 Determinação da umidade

O percentual de umidade foi determinado por método gravimétrico. As amostras foram cortadas em pedaços contendo medidas de 2 cm x 2 cm e foram pesadas inicialmente com precisão. A massa final foi registrada após a secagem dos filmes em estufa a 105 °C por 24 horas. Os ensaios foram conduzidos em seis replicatas para cada concentração, e a umidade foi calculada usando a equação 1:

$$U\% = \left( \frac{m_i - m_f}{m_i} \right) \times 100 \quad \text{Eq. (1)}$$

*Onde:*

$U\%$  = Percentual de umidade;

$m_i$  = massa inicial da amostra;

$m_f$  = massa final da amostra.

### 3.3.3 Análise de solubilidade

Os filmes, com dimensões de 1,5 cm x 4 cm, foram secados em estufa com circulação de ar (SolidSteel) a 100 °C por 24 horas e inicialmente pesados com precisão. As amostras desidratadas foram imersas em 50 mL de água deionizada e mantidas em repouso por 24 horas em temperatura ambiente.

Após esse período, o excesso de água foi removido, e as amostras foram novamente secadas a 105 °C por 24 horas. Os ensaios foram conduzidos em 6 replicatas para cada concentração e a determinação da solubilidade expressa em termos de massa não dissolvida, foi calculada conforme a equação 2:

$$S\% = \left( \frac{m_i - m_f}{m_i} \right) \times 100 \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde:

$S\%$  = Percentual de solubilidade;

$m_i$  = massa inicial da amostra;

$m_f$  = massa final da amostra.

### 3.3.4 Avaliação do intumescimento

O grau de intumescimento precisa ser avaliado para investigar a capacidade de absorção de fluido pelos filmes. Membranas contendo medidas de 2 cm x 2 cm foram pesadas em uma balança analítica modelo Chyo JS-110 e os valores da massa seca inicial foram obtidas. As amostras foram imersas em 100 mL de água destilada e mantidas em temperatura ambiente em tempos predeterminados (60 min, 120 min e 180 min) respectivamente.

Ao atingir o tempo, as amostras foram retiradas e secadas em papel adsorvente e pesadas novamente, a fim de verificar a massa final atingida por cada amostra. Os estudos de intumescimento foram conduzidos em seis replicatas para amostras de TPA e para TPA contendo diferentes concentração de NPs ZnO usando a equação 3:

$$Gi\% = \left( \frac{m_f - m_i}{m_i} \right) \times 100 \quad \text{Eq. (3)}$$

Onde:

$G_i\%$  = Grau de intumescimento;

$m_i$  = massa inicial seca da amostra;

$m_f$  = massa final intumescida da amostra.

### 3.3.5 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

Com a finalidade de avaliar a presença dos grupos funcionais presentes nos filmes, foram obtidos os espectros de absorção na região do infravermelho em um espectrofotômetro (FTIR), marca BRUKER referente ao modelo VERTEX 70v.

Os espectros no infravermelho das amostras requeridas foram obtidos por reflectância total atenuada (ATR) utilizando uma faixa espectral de 4000-300  $\text{cm}^{-1}$  a 100 scans e uma resolução de 8  $\text{cm}^{-1}$ . Esta análise foi realizada no laboratório de Espectroscopia vibracional e altas pressões localizado no Programa de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal do Pará (PPGF/UFGPA).

### 3.3.6 Análise termogravimétrica (TGA)

A avaliação da estabilidade térmica e característica de degradação dos filmes relacionados a temperatura, foi determinada via na análise termogravimétrica (TGA) em um analisador simultâneo termogravimétrico da STA, modelo NEXTA STA 300 utilizando porta amostra de platina, contendo fluxo de 100 mL/min de  $\text{N}_2$  com taxa de aquecimento de 10  $^\circ\text{C}/\text{min}$  até 800 $^\circ\text{C}$ . Esta análise foi realizada no laboratório de Caracterização de Materiais da UFGPA. As imagens foram processadas *softwares* Excel<sup>®</sup> e OriginPro<sup>®</sup>, versão 9.5.1.

### 3.3.7 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Para a análise da superfície do TPA, TPA 1%, TPA 3% e TPA 5% foi utilizada a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). As amostras foram acomodadas em um porta-amostras (stub) e foi previamente metalizada com uma camada de 10-20 nm de ouro. O procedimento foi realizado no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do Museu Emilio Goeldi, destes utilizando-se um microscópio eletrônico TESCAN, modelo Mira3 na voltagem de 5 kV.

### 3.4 Caracterização para ensaio Mecânico dos corpos de prova

#### 3.4.1 Espessura dos filmes

As medidas da espessura foram conduzidas em três pontos distintos do filme, utilizando um micrômetro digital da marca SYNTEK modelo 24601 com capacidade de medição 0 a 25 mm e resolução 0,001 mm.

Figura 13 – Micrômetro Externo Digital 0-25 mm x 0,001 mm



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Para determinar a espessura final, calculou-se a média aritmética das medidas em três pontos aleatórios em diferentes segmentos dos filmes. As referências para essas medições foram adotadas com base no trabalho de Nunes (2018). Os resultados foram utilizados para calcular a média e o desvio padrão. As imagens foram processadas *softwares* Excel® e OriginPro®, versão 9.5.1.

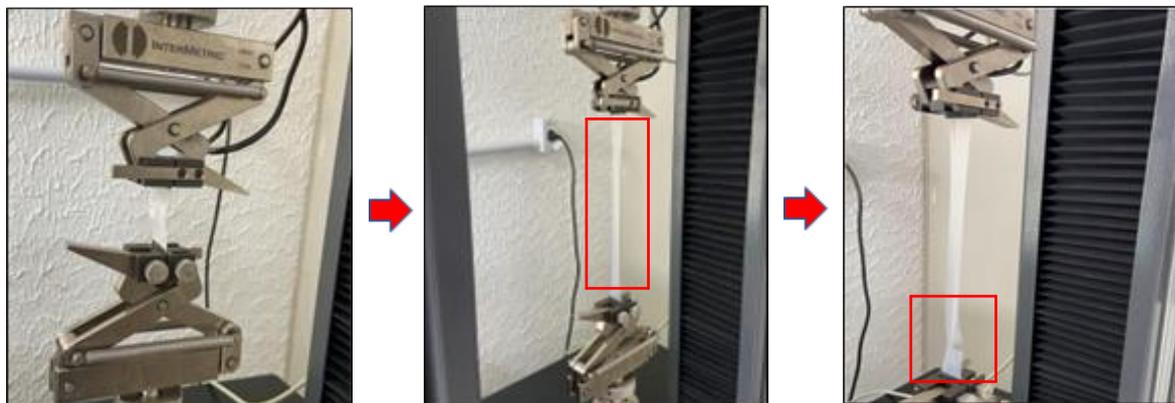
#### 3.4.2 Ensaio mecânico de resistência à tração

As propriedades mecânicas de resistência à tração dos filmes foram avaliadas no Laboratório de Caracterização dos Materiais (LABCMAT) da Universidade Federal do Pará, *Campus* Ananindeua. Os ensaios seguiram os critérios da norma ASTM D882-18 e foram realizados em uma máquina universal da marca INTERMERTRIC eletromecânica iM50, com célula de carga de 5 kN, a uma taxa de carregamento de 5 mm/min. O objetivo era determinar a resistência à tração ( $\sigma$  Max), deformação na ruptura ( $\epsilon$ ) e módulo de elasticidade dos materiais.

As amostras foram cortadas em tiras com largura de 25,0 mm e comprimento de 75,0 mm para os filmes TPA e TPA 1%, TPA 3% e TPA 5%, respectivamente. O ensaio mecânico

foi conduzido em 6 replicatas em cada corpo de prova das amostras de TPA e para filmes contendo diferentes concentrações de NPs ZnO, e os valores médios foram registrados.

Figura 14- Procedimento de ensaio mecânico realizado na Máquina Universal INTERMERTRIC



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

### 3.4.3 Tratamento estatístico

As análises de caracterização dos filmes foram submetidas a testes de diferenças entre médias, utilizando o software TIBCO STATISTICA versão 14.0.0.15 (Statsoft Inc., Tulsa, EUA). As comparações foram realizadas por meio do teste de Duncan, considerando um nível de significância de 5% ( $p < 0,05$ ).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

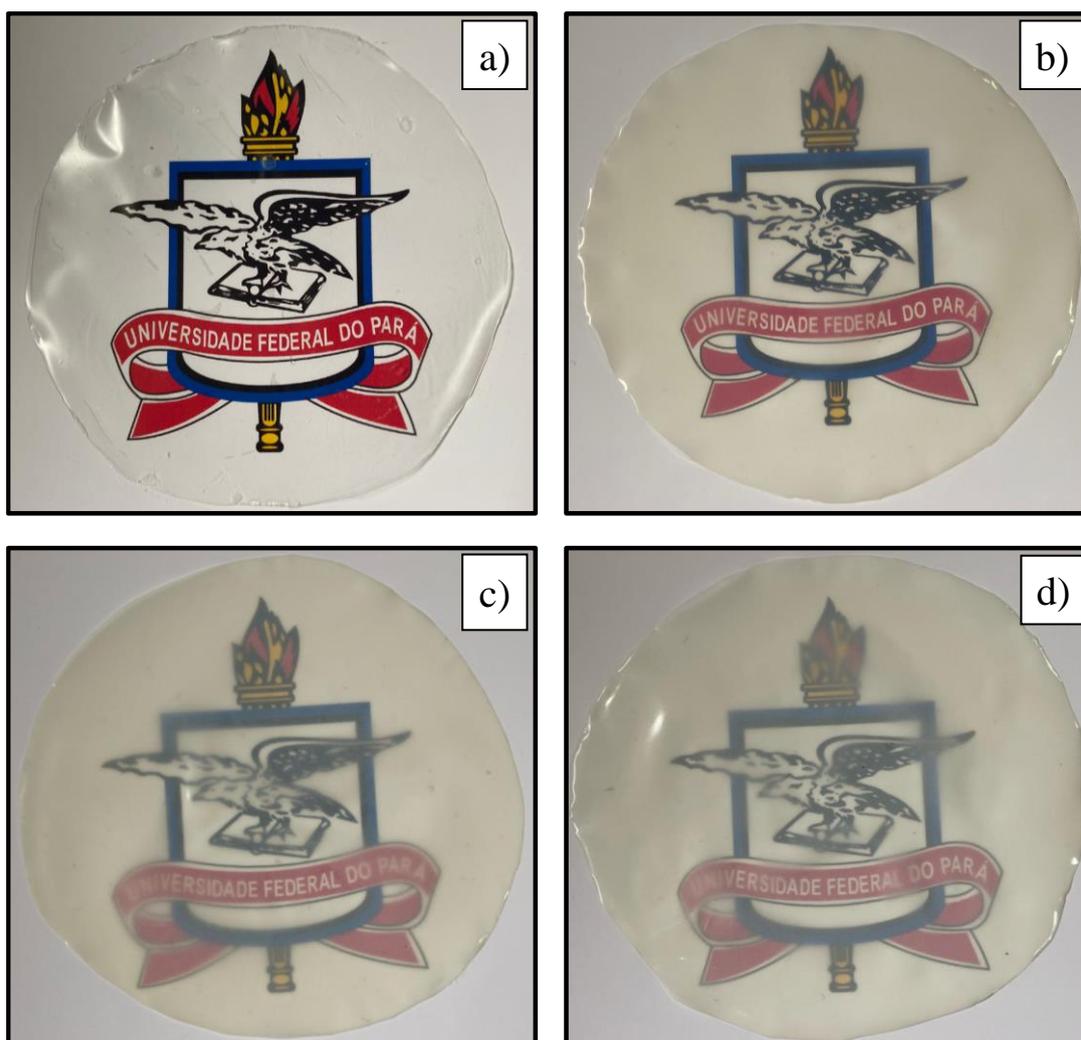
### 4.1 Caracterização dos nanocompósitos

#### 4.1.1 Aspecto visual dos filmes

Ao utilizar como comparativos os estudos feitos por Tarique; Sapuan; Khalina (2021), os filmes apresentaram aspectos diferenciados quanto a cor, transparência e dentre outros aspectos.

Na Figura 15 são representados os resultados obtidos quanto aos aspectos visuais dos filmes em diferentes concentrações.

Figura 15 - Aspecto visual dos filmes em diferentes concentrações: a) TPA; b) TPA 1% c) TPA 3%; d) TPA 5%



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

O Quadro 2 abaixo mostra aspectos dos filmes, apresentados na Figura 15, quanto a cor, uniformidade, transparência, presença ou ausência de bolhas e rachaduras, flexibilidade, aspectos quebradiços e remoção do suporte.

Quadro 2 – representação dos aspectos visuais dos filmes

<b>Amostras</b>	<b>Aspecto visual dos filmes</b>
TPA	Translúcido, ausência de rachaduras e bolhas na superfície, não quebradiço, flexível e de fácil remoção
TPA 1%	Translúcido, ausência de rachaduras e bolhas na superfície, não quebradiço, não frágil, levemente flexível e de fácil remoção
TPA 3%	Translúcido, ausência de rachaduras e bolhas na superfície, não quebradiço, menos flexível e de fácil remoção
TPA 5%	Levemente translúcido, menos flexível em comparação ao filme contendo apenas amido e glicerol, e de fácil remoção

Fonte: Adaptado de Tarique; Sapuan; Khalina (2021)

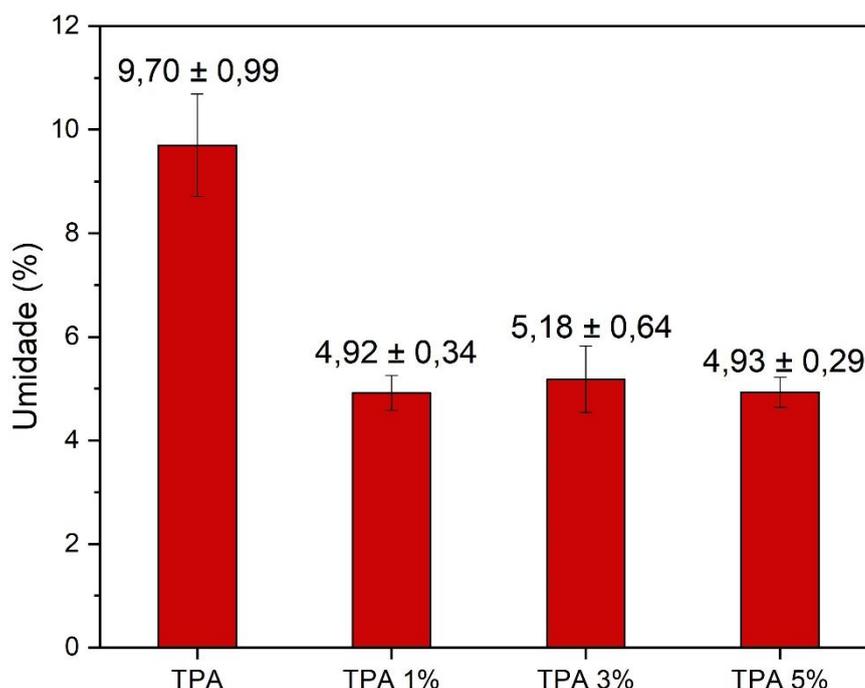
Como apresentado no Quadro 2 acima, os filmes produzidos ao longo deste trabalho apresentaram misturas homogêneas, superfícies lisas e com ausência de bolhas. Com relação ao manuseio, todos os filmes confeccionados foram removidos facilmente das placas de acrílico sem que houvesse rompimento do material.

Os filmes elaborados apenas com o amido de araruta eram inodoros e possuíam transparência nítida contendo uma superfície brilhante (superfície interna em contato com a placa) e a outra com característica opaca (superfície externa exposta durante a secagem) conforme baseado nos estudos de Nogueira *et al* (2018). Já os filmes incorporados com nanopartículas apresentaram aspectos visuais diferentes comparados aos que continham apenas o amido de araruta, pois apresentaram coloração esbranquiçada e são mais enrijecidos.

#### 4.1.2 Determinação da umidade

A Figura 16 apresenta valores do percentual de umidade dos filmes de nanocompósitos que revelaram diferentes percentuais de umidade.

Figura 16 - Percentual de umidade para os filmes de TPA, TPA 1% TPA 3% e TPA 5%



A Figura 16 apresenta os resultados do percentual umidade, para os filmes TPA, TPA1%, TPA 3% e TPA 5% respectivamente. Para composição TPA observa-se um aumento no percentual de umidade com valor médio de 9,70%. Isso pode estar relacionado com o caráter hidrofílico referente a presença de grupos hidroxilas que facilitam a absorção de umidade (Helmiyati *et al.*, 2021).

Outra explicação pode estar na presença do plastificante glicerol, que por sua vez, por ser um composto hidrofílico, reage com a água, favorecendo sua absorção. Além disso, o glicerol tem ação facilmente em agir com as cadeias dos polissacarídeos presentes no amido de araruta através de pontes de hidrogênio, reduzindo as interações intermoleculares, assim, aumentando a flexibilidade (Huntrakul; Harnkarnsujarit, 2020).

A incorporação das nanopartículas de ZnO à matriz polimérica dos filmes, resultou na redução significativamente do percentual de umidade, o que pode estar relacionado com a redução da absorção de água pelos nanocompósitos. As ligações de hidrogênio formadas entre o plastificante e as nanopartículas reduzem a capacidade das moléculas de água de interagir

com o filme, uma vez que o glicerol é uma molécula altamente higroscópica (Helmiyati *et al.*, 2021).

No âmbito desta investigação, evidenciou-se que os teores de umidade dos filmes TPA 1% revelou um índice correspondente a 4,92%, enquanto o TPA 3% exibiu resultado de 5,18%. Adicionalmente, o filme TPA 5% apresentou um teor de umidade aproximado de 4,93%.

O teste de Duncan foi aplicado para avaliar a diferença estatística significativa entre as médias para o percentual de umidade dos filmes de nanocompósitos como está sendo apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Teste de Duncan para o percentual de umidade

<b>Amostras</b>	<b>Umidade</b>
<b>TPA</b>	9,70 ± 0,99 <sup>a</sup>
<b>TPA 1%</b>	4,92 ± 0,34 <sup>b</sup>
<b>TPA 3%</b>	5,18 ± 0,64 <sup>b</sup>
<b>TPA 5%</b>	4,93 ± 0,29 <sup>b</sup>

\*Médias seguidas por letras iguais na mesma coluna não diferem significativamente ( $p < 0,05$ ) pelo teste de Duncan  
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

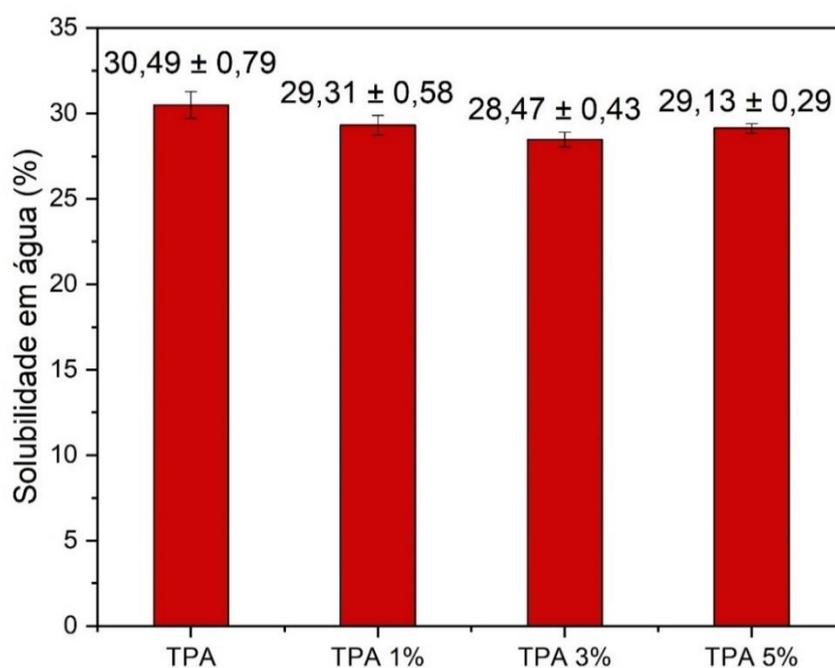
Considerando o nível de significância de 5%, observa-se que há uma diferença significativa para o filme TPA, ao ser comparado com os filmes de nanocompósitos. No entanto, é possível observar que não há diferença significativa entre os nanocompósitos TPA 1%, TPA 3% e TPA 5% respectivamente conforme é apresentado no teste de Duncan.

Como mencionado anteriormente, este comportamento para o filme TPA está relacionado com a característica hidrofílica que o filme de araruta com glicerol apresenta e que, ao incorporar as NPs de ZnO à matriz polimérica, induziu a redução da interação da água com os filmes de nanocompósitos. O mesmo padrão foi identificado por Helmiyati *et al.* (2021), ao estudar a incorporação das nanopartículas de ZnO em matriz de carboximetilcelulose e álcool polivinílico (CMC-PVA).

### 4.1.3 Análise de Solubilidade

A Figura 17 apresenta valores referentes ao percentual de solubilidade para os filmes TPA, TPA 1%, TPA 3% e TPA 5%, a fim de analisar a interação do filme com a água em relação à capacidade de dissolução, associada à hidrofiliicidade do material.

Figura 17 - Percentual de solubilidade obtido para os filmes de TPA, TPA 1%, TPA 3% e TPA 5%



A solubilidade do filme composto unicamente por TPA exibiu uma leve alteração em comparação com os filmes que incorporam distintas proporções de nanopartículas de ZnO. Evidencia-se um aumento na solubilidade do TPA, atingindo o valor de 30,49%.

Para os filmes TPA 1%, observou-se uma redução na solubilidade em água, alcançando 29,31%. Os filmes TPA 3% revelaram redução na solubilidade, registrando um valor de 28,47%. Quanto aos filmes TPA 5%, apresentaram um resultado equivalente a 29,13%.

O teste de Duncan foi aplicado com a finalidade de avaliar a diferença estatística significativa entre as médias dos valores referentes ao percentual de solubilidade dos filmes. Os resultados do referido teste, estão sendo apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Teste de Duncan para percentual de solubilidade

<b>Amostras</b>	<b>Solubilidade</b>
<b>TPA</b>	30,49 ± 0,79 <sup>a</sup>
<b>TPA 1%</b>	29,31 ± 0,58 <sup>b</sup>
<b>TPA 3%</b>	28,47 ± 0,43 <sup>b</sup>
<b>TPA 5%</b>	29,13 ± 0,29 <sup>b</sup>

\*Médias seguidas por letras iguais na mesma coluna não diferem significativamente ( $p < 0,05$ ) pelo teste de Duncan  
 Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

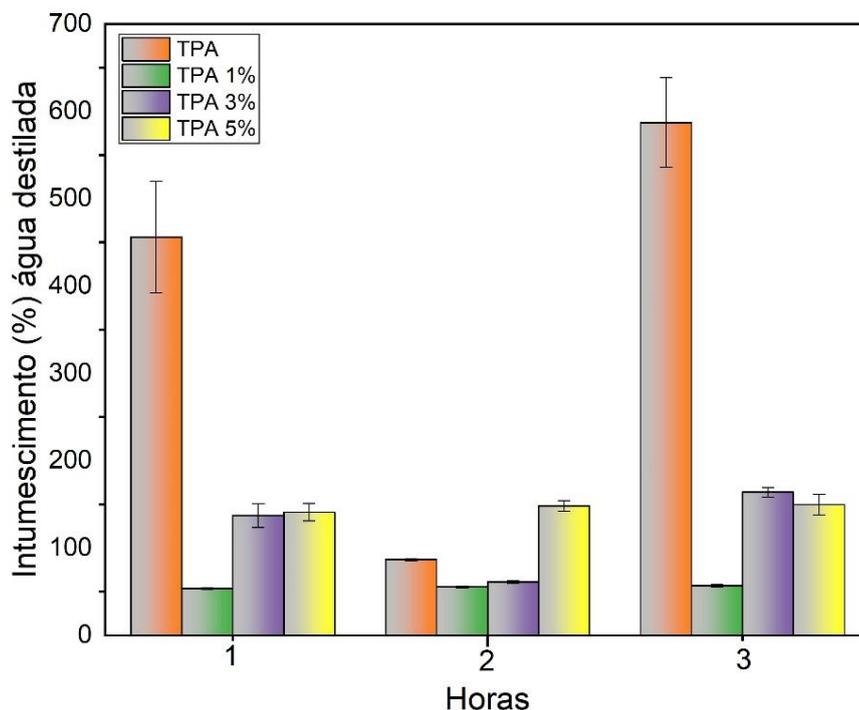
Com base nos resultados apontados no presente teste, entende-se que o filme TPA apresentou maior percentual de solubilidade. Para as formulações TPA 1%, TPA 3% e TPA 5% é possível observar que não há diferença para o percentual de solubilidade, indicando que a incorporação das nanopartículas de ZnO não exerceu influência sobre essa propriedade, não havendo diferença significativa entre as médias pelo teste de Duncan.

Babapour, Jalali e Nafchi (2021) investigaram os efeitos das NPs ZnO em diferentes concentrações na solubilidade de filmes à base de amido de batata com óleo essencial de erva-doce. A incorporação em diferentes níveis de NPs ZnO nos bionanocompósitos resultou em uma redução significativa na solubilidade dos filmes em água, sendo que a maior solubilidade foi observada no filme controle, atingindo 24,54%. Os autores destacaram que a adição das nanopartículas à matriz polimérica diminuiu a interação entre as moléculas de água e as cadeias de amido.

#### 4.1.4 Avaliação do Intumescimento

A avaliação do intumescimento foi feita para o filme TPA, TPA1%, TPA3% e TPA 5%. Nesta análise foi investigado o comportamento de aumento de volume dos materiais quando inseridos em fluido corpóreo, simulado pela água destilada. As taxas percentuais de intumescimento para as quatro concentrações em 1h, 2h e 3h estão sendo mostradas na Figura 18.

Figura 18 - Percentual de intumescimento para os filmes de TPA, TPA1%, TPA 3% e TPA 5% obtidos em água destilada



As características dos filmes foram analisadas por meio de parâmetros associados à quantidade de água destilada absorvida pela matriz polimérica TPA e filmes TPA 1%, TPA 3% e TPA 5% ao longo do tempo. Os filmes constituídos unicamente por amido de araruta TPA, quando submetidos em contato com água destilada, apresentaram um aumento considerável no percentual de intumescimento na primeira hora  $455,93 \pm 10,64$ , seguido por uma redução após duas horas  $86,62 \pm 1,20$ . Ao atingir o período de três horas no ensaio, houve um aumento expressivo na porcentagem para  $587,23 \pm 51,14$ .

Esse fator é atribuído à característica hidrofílica do filme TPA, constituído por amido de araruta e glicerol, devido à presença de diversos grupos hidroxilas, além de uma estrutura porosa que facilita a capacidade de retenção de água (Helmiyati *et al.*, 2021; Malki *et al.*, 2023). Por outro lado, as amostras de TPA 1% apresentaram baixa porcentagem de intumescimento durante a primeira hora  $53,52 \pm 0,87$ , seguida por um aumento após duas horas  $55,45 \pm 1,23$  e três horas, com um leve aumento para  $56,87 \pm 1,40$ .

Esta redução pode ser explicada pela incorporação das nanopartículas de ZnO na matriz do amido. Esta diminuição é atribuída à boa interação interfacial entre as nanopartículas de ZnO e a matriz de amido, que por sua vez dificulta a interação de moléculas de água com o filme de nanocompósito (Charoensri *et al.*, 2021).

Para os filmes compostos por TPA 3%, registrou-se um aumento no ensaio de intumescimento na primeira hora  $136,99 \pm 13,57$ , seguido por uma redução percentual após duas horas  $61,23 \pm 1,41$  e novo aumento do percentual de intumescimento após três horas  $163,80 \pm 5,68$ . As amostras de TPA 5% apresentaram, inicialmente, um aumento no percentual na primeira hora  $140,99 \pm 9,96$ , seguido por duas horas de ensaio  $148,08 \pm 6,07$  e aumento significativo após três horas de ensaio  $149,71 \pm 11,65$ .

Com base nos resultados, realizou-se o teste de Duncan para verificar se houve diferença variação estatística significativa entre as médias amostrais. A Tabela 5 apresenta a análise de variância dos filmes submetidos ao ensaio de intumescimento em água destilada.

Tabela 5 – Teste de Duncan para o ensaio de intumescimento para os filmes obtidos em água destilada

<b>Amostras</b>	<b>1 hora</b>	<b>2 horas</b>	<b>3 horas</b>
<b>TPA</b>	$455,93 \pm 63,99^a$	$86,62 \pm 1,20^a$	$587,23 \pm 51,14^a$
<b>TPA 1%</b>	$53,52 \pm 0,87^b$	$55,45 \pm 1,23^b$	$56,87 \pm 1,40^b$
<b>TPA 3%</b>	$136,99 \pm 13,57^c$	$61,23 \pm 1,41^c$	$163,80 \pm 5,68^c$
<b>TPA 5%</b>	$140,99 \pm 9,96^c$	$148,08 \pm 6,07^d$	$149,71 \pm 11,65^c$

\*Médias seguidas por letras iguais na mesma coluna não diferem significativamente ( $p < 0,05$ ) pelo teste de Duncan  
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Com base nos resultados obtidos, a aplicação do teste de Duncan revelou diferenças estatisticamente significativas em relação à duração da exposição das amostras ao ensaio de intumescimento. No período de 1 hora, observa-se uma variação significativa na composição dos filmes TPA, enquanto os filmes de TPA 1% exibem uma variação menor. Conforme o teste de Duncan, este resultado confirma a hipótese de igualdade entre as composições para os filmes de TPA 3% e TPA 5%, considerando um nível de significância de 5%.

A análise de variância da Tabela 5 para o intervalo de 2 horas, observa-se diferença estatística para as quatro concentrações dos filmes de nanocompósitos. O aumento da concentração de nanopartículas de ZnO reduziu significativamente o poder de inchamento dos filmes TPA 1% e TPA 3% e houve um aumento para o filme TPA 5%.

Para o período de 3 horas, variações são observadas nos filmes de TPA. Entretanto, os filmes de TPA 1% exibiram menor variação nos resultados em comparação com os filmes de TPA. Nesse contexto, entre as diferenças estatisticamente significativas, os filmes com as concentrações de TPA 3% e TPA 5%, ao serem submetidos ao ensaio de intumescimento na

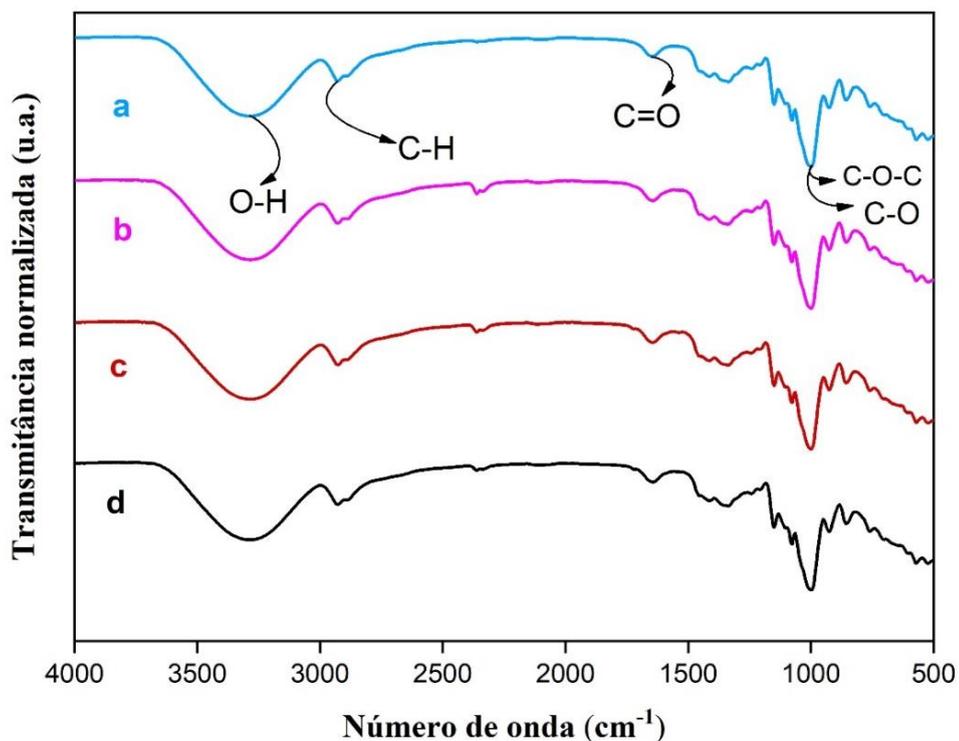
presença de água destilada, apresentaram semelhança entre os resultados. Para as concentrações de TPA 3% e TPA 5%, o teste de Duncan confirma a hipótese de igualdade entre as composições, considerando um nível de significância de 5%.

#### 4.1.5 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

A espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier é uma técnica instrumental não destrutiva utilizada com o objetivo de identificar grupos funcionais presentes em uma amostra. Durante o procedimento analítico, a amostra é submetida à radiação infravermelha em uma faixa de comprimento de onda específico, onde os grupos funcionais contidos na amostra absorvem energia em frequências características, resultando na formação de um espectro (Andoh *et al.*, 2024).

As amostras foram analisadas por FTIR, com a intenção de avaliar a presença dos grupos funcionais presentes nos compostos orgânicos contido nos filmes de araruta e certificar a incorporação das NPs ZnO na matriz polimérica. A Figura 19 apresenta os espectros para os filmes TPA, TPA 1%, TPA 3%, TPA 5%.

Figura 19 - Espectros FTIR para os filmes (a) TPA, (b) TPA 1%, (c) TPA 3%, (d) TPA 5%



O quadro 3 abaixo apresenta a relação entre as bandas e grupos funcionais exibidos para os filmes TPA, TPA1%, TPA3% e TPA 5%.

Quadro 3 – Relação entre bandas e grupos funcionais do TPA, TPA1%, TPA3% e TPA 5%

<b>Bandas <math>\text{cm}^{-1}</math></b>	<b>Atribuições</b>
3282 a 3294	Vibração de estiramento dos grupos OH do amido e glicerol
2931	Estiramento C-H
1647 a 1654	Ligação C=O
995 a 999	Associada a vibrações de estiramento C-O-C e C-O advindas da estrutura de polissacarídeo do amido e glicerol

Adaptado de Tarique; Sapuan e Khalina (2021)

Os espectros de FTIR para os filmes TPA, TPA 1%, TPA 3% e TPA 5% exibiram comportamento espectral semelhante. Os modos vibracionais observados nas bandas entre 3282 a 3294  $\text{cm}^{-1}$  são atribuídos aos grupos hidroxilas (OH). Este comportamento espectral foi associado ao alto teor de amido de araruta, glicerol e a presença de umidade nos filmes (Tarique; Sapuan e Khalina, 2021).

Pode-se inferir que esse fenômeno esteja relacionado à água absorvida nos filmes e à relação entre os grupos de vibração do estiramento O-H do glicerol como plastificante. Tendências semelhantes foram relatadas por Nascimento *et al* (2021) e Malki *et al* (2023).

A banda vibracional em 2931  $\text{cm}^{-1}$  corresponde ao estiramento C-H. Esta banda refere-se à vibração de alongamento de um grupo alceno dentro da cadeia do biopolímero (Edhirej *et al.*, 2017); (Nazri *et al.*, 2019).

Bandas encontradas na região espectral de 1647 a 1654  $\text{cm}^{-1}$  foi atribuído à presença do grupo funcional carbonila (C=O) (Edhirej *et al.*, 2017; Nazri *et al.*, 2019).

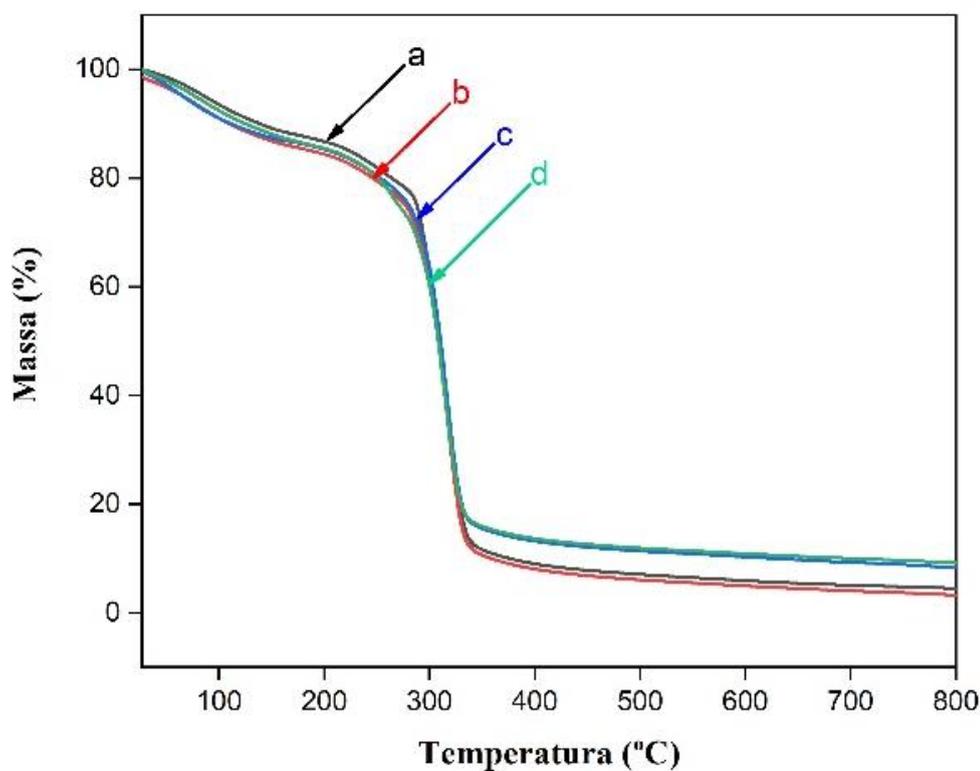
Além disso, nas bandas de 995 a 999  $\text{cm}^{-1}$ , apresentam características de ligações do tipo C-O-C e C-O, provenientes da estrutura de polissacarídeo presente no amido de araruta (Tarique; Sapuan e Khalina, 2021).

As características dos espectros para os filmes TPA, TPA1%, TPA 3% e TPA 5% para estudo, revelaram que a incorporação das nanopartículas de ZnO na matriz polimérica dos filmes termoplastificados com amido araruta não exibiu a formação de novas bandas.

#### 4.1.6 Análise termogravimétrica (TGA)

Os filmes elaborados neste estudo foram caracterizados quando à estabilidade térmica para TPA e TPA com a incorporação de NPs ZnO nas concentrações (1%, 3% e 5%) respectivamente, como estão sendo apresentados na figura 20 abaixo.

Figura 20 - Curva de análise termogravimétrica (TGA) dos filmes (a) TPA; (b) TPA 1%; (c) TPA 3% e (d) TPA5%



A Tabela 6 apresenta a perda de massa para os filmes TPA, TPA 1%, TPA 3% e TPA 5% em três eventos e a massa residual expressa em % em 800 °C.

Tabela 6 – Perda de massa para o 1º evento, 2º evento, 3º evento  $T_{(máx)}$  e massa residual (%) em 800 °C dos filmes TPA, TPA1%, TPA 3% e TPA 5%

Amostra	1º evento	2º evento	3º evento $T_{(máx)}$	Massa residual (%) em 800 °C
TPA	87,45	241,92	318	4,08
TPA 1%	80,05	271,46	317	4,62
TPA 3%	81,42	272,24	316	8,60
TPA 5%	87,87	275,74	315	9,19

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A estabilidade térmica dos filmes de TPA, TPA 1%, TPA 3% e TPA 5% foi investigada através da análise termogravimétrica (TGA) como está sendo apresentada na Figura 20. Para os quatro filmes estudados foram observados três eventos de perda de massa. Inicialmente, foram observados no primeiro evento temperaturas de degradação na faixa inferior a 100°C, que são atribuídas a evaporação da água residual e moléculas de baixa massa molar, com 12,55% de perda de massa (Guerra, 2021).

Este fenômeno resulta da evaporação de umidade, uma vez que os filmes, mesmo após prévia secagem e armazenamento em dessecador, mantêm um caráter hidrofílico, facilitando a absorção de água. Todas as amostras, incluindo as diferentes concentrações de NPs, apresentaram comportamento semelhante. Já no segundo evento, em temperaturas mais altas, em torno de 120 a 290 °C, o qual foi descrito pela perda de glicerol e de moléculas de água com 10,94% de perda de massa.

O terceiro evento de perda de massa, ocorreu em torno de 300 °C para os filmes investigados e houve uma perda de massa maior, com perda de 65,12% de massa, característica de decomposição térmica. Este fenômeno é atribuído à perda radial de peso do filme de TPA, assim como para as demais composições com NPs ZnO.

O referente evento, também está relacionado à remoção de grupos funcionais de hidrogênio, degradação e despolimerização do polímero de cadeias de carbono e amido (Tarique; Sapuan; Khalina, 2021).

Ao aumentar gradualmente a temperatura, ultrapassando 300 °C, observa-se a decomposição térmica em todos os resultados, tanto para o filme de TPA quanto para as composições com NPs ZnO. Nogueira, Fakhouri e de Oliveira (2018) avaliaram a estabilidade térmica do amido de araruta e verificaram que a degradação dos filmes constituídos por amido de araruta ocorreu entre 330-440 °C.

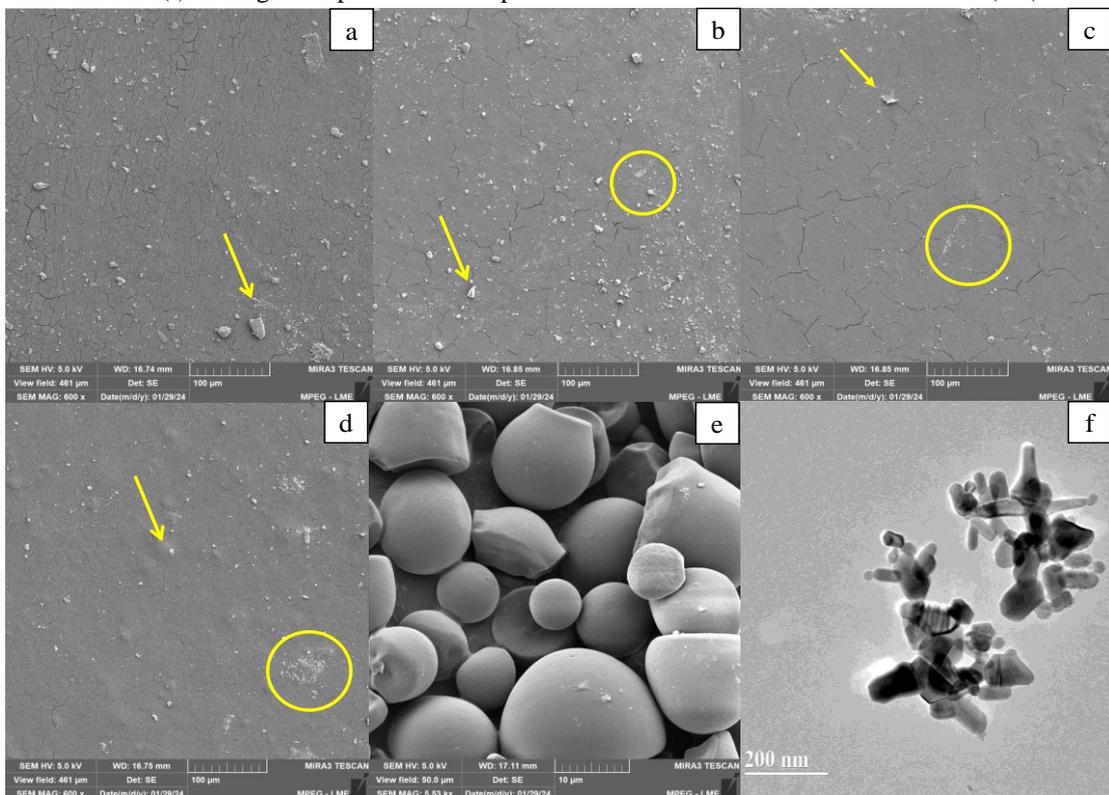
Estudos anteriores, como os de Nogueira, Fakhouri de Oliveira (2018), indicaram que a degradação dos filmes de amido de araruta ocorre entre 330-400 °C. Resultados semelhantes foram reportados por Tarique; Sapuan; Khalina (2021), que avaliaram a estabilidade térmica de filmes de amido de araruta em diferentes concentrações de glicerol e verificaram a degradação do material em 321,47 °C para filmes contendo 30% de glicerol.

Os filmes TPA 1%, TPA 3%, e TPA 5% exibiram um perfil de decomposição semelhante ao filme TPA. Esses resultados indicam que a adição das nanopartículas à matriz polimérica não interferiu significativamente na estabilidade térmica dos filmes TPA 1%, TPA 3%, e TPA 5% em relação ao filme TPA (Foghara *et al.*, 2020).

#### 4.1.7 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi realizada com o objetivo de observar a morfologia do filme termoplastificado com amido de araruta e a presença das nanopartículas de óxido de zinco incorporadas na matriz polimérica do amido em diferentes concentrações. As micrografias apresentadas na Figura 21 mostram a superfície para os filmes TPA (a), TPA 1% (b), TPA 3% (c) e TPA 5% (d) e a distribuição dos grânulos de amido de araruta (e). Adicionalmente é observado partículas de ZnO em dimensões nanométricas (f).

Figura 21 – Imagem do MEV para (a) TPA, (b) TPA 1%, (c) TPA 3%, (d) TPA 5%, (e) grânulos de amido de araruta (f) micrografia apresentada das partículas de ZnO em dimensão nanométrica (nm)



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A Figura 21 (a) mostra a morfologia do filme TPA, que apresenta como resultado nas regiões demarcadas a presença de grânulos de amido não dissolvidos e parcialmente dissolvidos, além de fissuras na superfície. Adicionalmente, é notável a presença de porosidade. Este fator pode ser atribuído à expulsão de ar durante o processo de secagem, conforme descrito por Damian *et al.* (2020).

A Figura 21 (b), apresenta a micrografia para o filme TPA 1%, que revelam presença de grânulos não dissolvidos durante o processo de gelatinização do amido, bem como a presença

de agregados de nanopartículas de ZnO, os quais estavam dispersos de maneira aleatória na matriz de amido de araruta termoplastificado com glicerol (Damian *et al.*, 2020; Lepot *et al* 2010).

Ao analisar a micrografia apresentada na Figura 21 (c), o filme TPA 3% apresenta pequenos aglomerados de nanopartículas de ZnO dispersos na matriz polimérica (Lepot *et al.*, 2010). Com o aumento da concentração de ZnO nos filmes termoplastificado de araruta, evidenciou-se que a superfície do filme TPA 3%, apresentou em sua morfologia a presença de rachaduras e porosidades. Ao adicionar as NPs ZnO houve a redução da presença de grânulos de amido de araruta (Helmiyati *et al.*, 2021).

Na Figura (d), é possível observar a presença de aglomerados de nanopartículas de óxido de zinco e a formação de rachaduras na superfície. Ao comparar as micrografias apresentadas, os filmes TPA 3% e TPA 5% exibiram características homogêneas, evidenciando a dispersão em menor quantidade de agregados de NPs em comparação com o filme TPA 1%. O agrupamento das nanopartículas ocorre devido à sua elevada energia superficial e às fortes interações entre as partículas, dificultando sua dispersão na matriz polimérica (Lepot *et al.*, 2010).

Indumathi, Sarojini e Rajarajeswari (2019), trabalharam com a obtenção e caracterização de nanocompósitos de poliuretano, quitosana e nanopartículas ZnO à base de óleo Mahua, para aplicações de embalagens de alimentos. Através dos estudos, observaram a aglomeração de nanopartículas dispersas sobre a matriz, semelhante ao resultado reportado neste trabalho.

As estruturas morfológicas do amido de araruta podem ser observadas na Figura 21 (e). De acordo com os resultados obtidos, foi possível verificar que a superfície dos grânulos é lisa e não há fissuras. Além disso, a micrografia revelou que os grânulos possuem formato redondo, com características geométricas ovais e esféricos. Estudos semelhantes foi reportado por Malki *et al.*, (2023).

Estudos reportados por Nogueira, Fakhouri e de Oliveira (2018) mostraram que o amido de araruta apresenta uma distribuição heterogênea em tamanho de grânulos, com formas geométricas circulares e elipsoides, com superfície lisa e sem fissuras. Em outro estudo, realizado por Valencia *et al* (2015), os resultados revelaram que os grânulos de amido de araruta apresentam formas esféricas e elipsoidais. Vários autores também encontraram formas circulares e semicirculares semelhantes para o amido (Tarique *et al.*, 2021).

A Figura 21 (f), apresenta fotomicrografia das características morfológicas de partículas de ZnO que variam em dimensões a nível nanométrico.

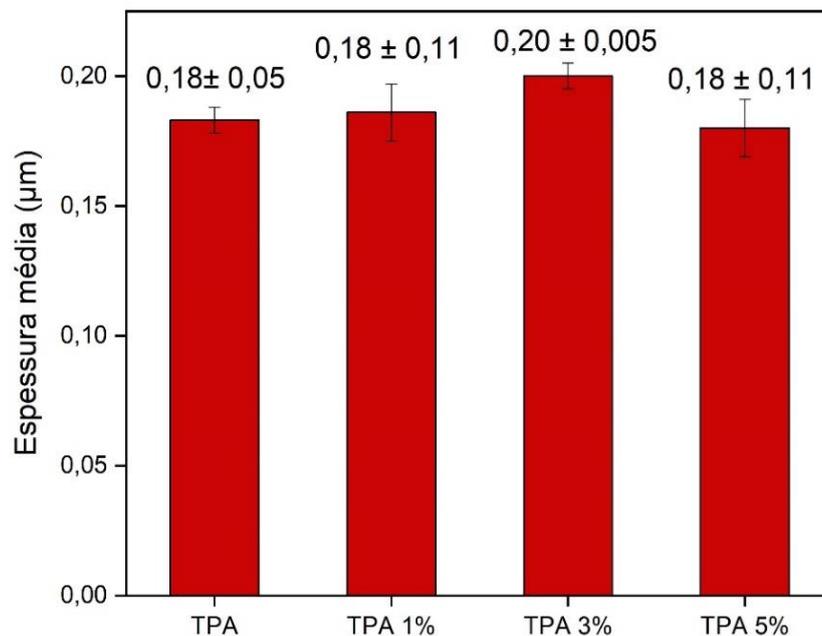
## 4.2 Caracterização para ensaio Mecânico dos corpos de prova

### 4.2.1 Espessura dos filmes

A espessura desempenha um papel significativo durante a realização de ensaios mecânicos em filmes poliméricos. As informações coletadas indicam que o aumento da espessura em filmes poliméricos implica na eficiência dos resultados durante o ensaio mecânico, sugerindo um potencial de aplicação em diversos contextos industriais (Wu *et al.*, 2019).

A figura 22 apresenta os resultados da espessura média ( $\mu\text{m}$ ) para os filmes TPA, TPA 1%, TPA 3% e TPA 5%.

Figura 22 - Apresentação dos resultados da espessura média ( $\mu\text{m}$ ) para os filmes: TPA, TPA 1%, TPA 3% e TPA 5%



Os valores das espessuras dos filmes utilizados nos ensaios mecânicos são apresentados na figura 22. Ao analisar os resultados, não foram observadas diferenças significativas nas espessuras para TPA, TPA 1% e TPA 5% o que evidencia que a dispersão das nanopartículas na matriz polimérica do filme de araruta obteve resultados promissores, exceto por uma leve variação no TPA 3% em comparação com os demais. Essa variação pode ser atribuída a erros experimentais, como a quantidade de solvente utilizada, que pode resultar em uma solução mais consistente para um dos filmes em relação aos outros. Além disso, a distribuição da solução

filmogênica ao ser depositada na placa de petri e o posicionamento da placa dentro da estufa durante o processo de secagem também podem influenciar esse fator.

Tabela 7 – Teste de Duncan para espessura média dos filmes ( $\mu\text{m}$ )

<b>Amostras</b>	<b>Espessura (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
<b>TPA</b>	$0,18 \pm 0,005^a$
<b>TPA 1%</b>	$0,18 \pm 0,011^a$
<b>TPA 3%</b>	$0,20 \pm 0,005^a$
<b>TPA 5%</b>	$0,18 \pm 0,011^a$

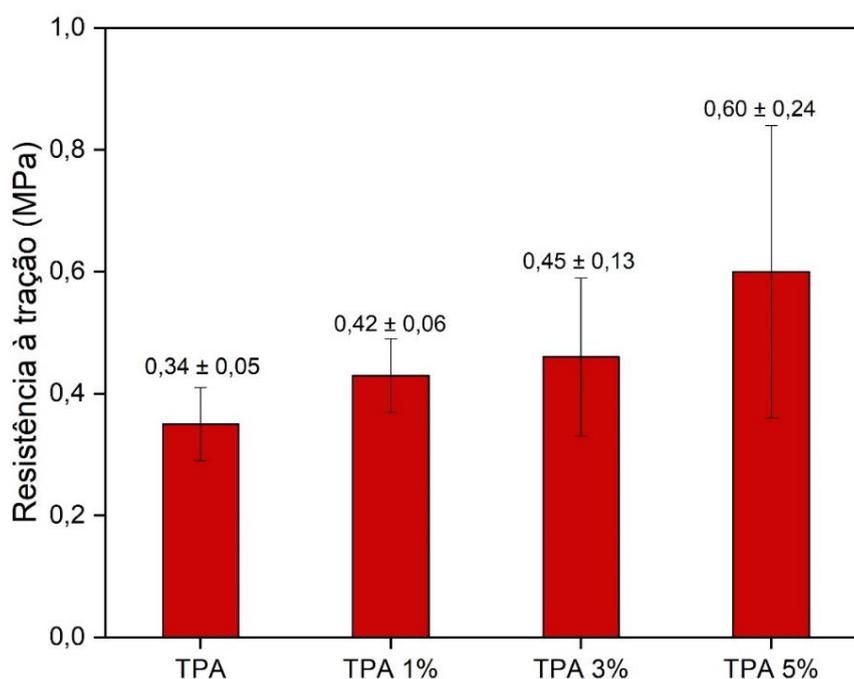
\*Médias seguidas por letras iguais na mesma coluna não diferem significativamente ( $p < 0,05$ ) pelo teste de Duncan

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

#### 4.2.2 Ensaio Mecânico dos corpos de prova

As propriedades mecânicas de resistência à tração, deformação e módulo de elasticidade desempenham um papel fundamental na aplicação de filmes de nanocompósitos no setor de embalagens alimentícios, uma vez que esses materiais são submetidos a forças de tensão durante sua manipulação. A Figura 23 apresenta resultados dos ensaios de resistência à tração na ruptura para os filmes TPA, TPA 1%, TPA 3% e TPA 5%.

Figura 23 – Resultados de resistência à tração na ruptura para os corpos de prova TPA, TPA 1%, TPA 3% e TPA 5%

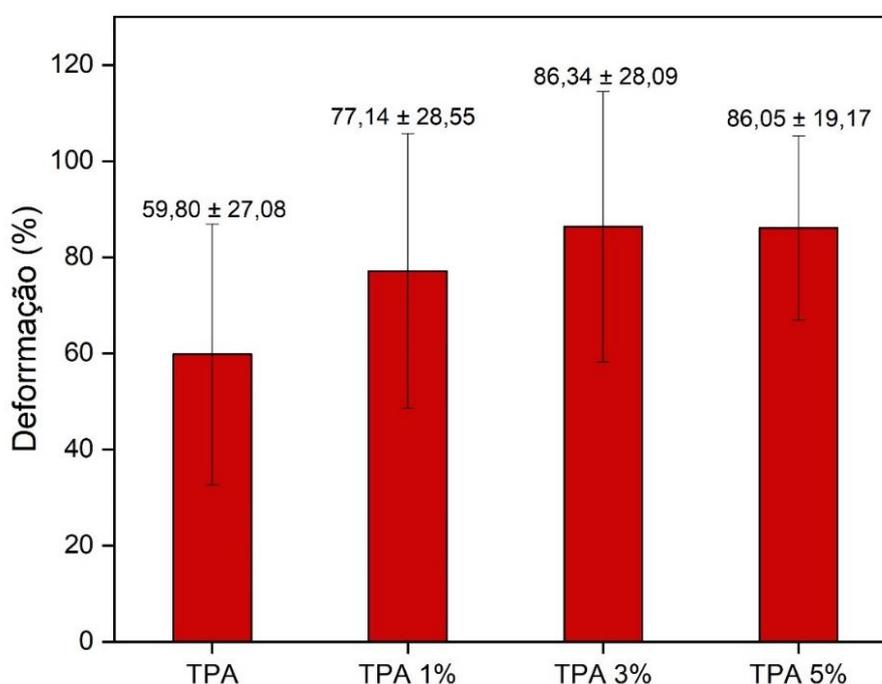


Os resultados apresentados mostram que o filme TPA apresentou valor médio de 0,34 MPa para resistência à tração. Ao adicionar as nanopartículas de ZnO à matriz polimérica, houve o aumento gradual da resistência à tração para os filmes TPA 1%, TPA 3% e TPA 5% respectivamente em relação ao filme TPA. Os valores médios de resistência para os filmes TPA 1%, TPA 3% e TPA 5% foram 0,42 MPa, 0,45 MPa e 0,60 MPa respectivamente. A partir dos resultados apresentados, mostram que a incorporação das NPs ZnO como reforço na matriz polimérica do filme de araruta, induziu para o aumento desta propriedade. Logo, dentre as composições supracitadas na Figura 23, o filme TPA 5%, apresentou maior resistência.

Helmiyati *et al.* (2021) ao estudar o efeito das nanopartículas de ZnO nas propriedades dos filmes de carboximetilcelulose e álcool polivinílico (CMC-PVA) observou que ao incorporar as NPs ZnO em diferentes concentrações no biopolímero, exibiu o aumento da resistência mecânica.

A Figura 24 apresenta os resultados de deformação para os filmes TPA, TPA1%, TPA3% e TPA5% obtidos no ensaio mecânico.

Figura 24 – Gráfico de deformação dos corpos de prova de TPA e filmes reforçados com NPs ZnO



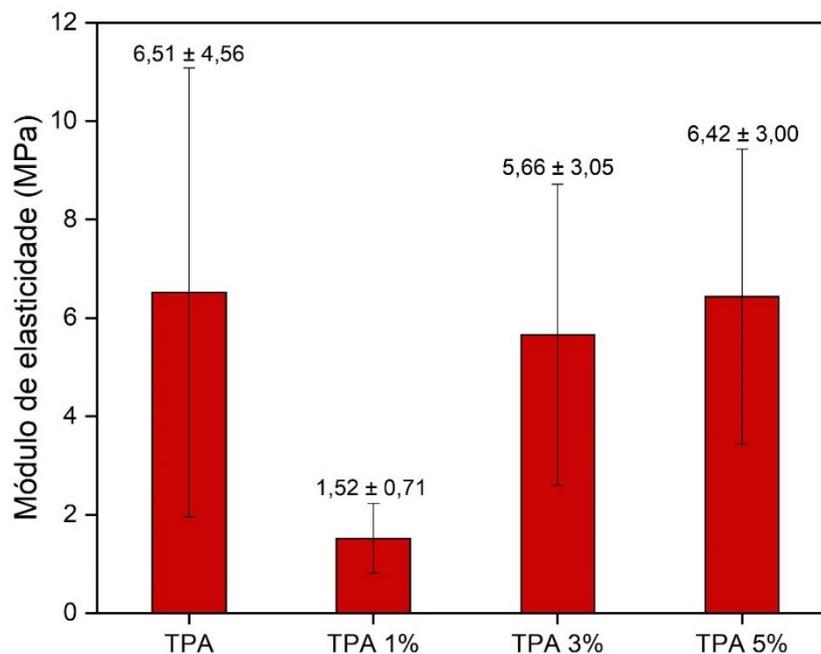
Para o ensaio mecânico de deformação para os filmes de nanocompósitos, foi possível notar por meio dos resultados, que o filme TPA exibiu valor médio de 59,80% de deformação na ruptura. Ao realizar a incorporação das nanopartículas de ZnO à matriz polimérica houve o

aumento gradual da deformação para os filmes TPA 1%, TPA 3% e TPA 5% com valores iguais a 77,14 %, 86,34 % e 86,05 % respectivamente. Logo, o filme TPA 3%, segue a tendência com valor superior de deformação na ruptura em relação aos demais filmes.

A adição das nanopartículas de ZnO proporcionou este aumento, devido as NPs atuarem satisfatoriamente como reforço na matriz de amido. Em adição, este comportamento pode ser explicado também devido as interações interfaciais estabelecidas entre as nanopartículas de ZnO e a matriz de amido (Helmiyati *et al.*, 2021).

A Figura 25, representa os valores obtidos do módulo de elasticidade por meio do ensaio mecânico.

Figura 25 – Gráfico do módulo de elasticidade dos corpos de prova da matriz polimérica e reforçados com nanopartículas de óxido de zinco



Para o módulo de elasticidade, o filme TPA exibiu valor médio de 6,51 MPa. Ao adicionar as NPs de ZnO à matriz polimérica de araruta, percebeu-se que houve a diminuição do módulo de elasticidade para o filme TPA1% com valor médio de 1,52 MPa resultando em um material com menor rigidez. Por outro lado, foi possível verificar o aumento do módulo de elasticidade para os filmes TPA3% e TPA5% em que apresentou valores médios 5,66 MPa e 6,42% indicando filmes com maior rigidez dentre as demais composições supracitadas.

Para avaliar diferenças significativas entre as médias de tração ( $\sigma$ ), deformação ( $\epsilon$ ) e módulo de elasticidade ( $Y$ ) para os filmes de TPA e filmes de TPA incorporados com NPs de

ZnO (1%, 3% e 5%), foi conduzido o teste de Duncan, com um nível de significância de 5%. Esse procedimento permitiu comparar e identificar quais composições são responsáveis pelas diferenças nos resultados. A análise estatística realizada pelo método de Duncan está resumida na Tabela 8.

Tabela 8 – Teste de Duncan para os dados obtidos a partir dos ensaios mecânicos de tensão, deformação e módulo de elasticidade

<b>Corpos de prova (%)</b>	<b>Resistência a tração (MPa)</b>	<b>Deformação (%)</b>	<b>Módulo de elasticidade (MPa)</b>
<b>TPA</b>	0,34 ± 0,055 <sup>a</sup>	59,80 ± 27,08 <sup>a</sup>	6,51 ± 4,56 <sup>a</sup>
<b>TPA 1%</b>	0,42 ± 0,064 <sup>ab</sup>	77,14 ± 28,55 <sup>a</sup>	1,52 ± 0,71 <sup>b</sup>
<b>TPA 3%</b>	0,45 ± 0,133 <sup>ab</sup>	86,34 ± 28,09 <sup>a</sup>	5,66 ± 3,05 <sup>ab</sup>
<b>TPA 5%</b>	0,60 ± 0,244 <sup>b</sup>	86,05 ± 19,17 <sup>a</sup>	6,42 ± 3,00 <sup>a</sup>

\*Médias seguidas por letras iguais na mesma coluna não diferem significativamente ( $p < 0,05$ ) pelo teste de Duncan  
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Os dados apresentados na Tabela 8, mostram resultados obtidos para o teste de Duncan, com nível de significância de 5% para os filmes TPA, TPA 1%, TPA 3% e TPA 5%. Para os ensaios de resistência à tração, é possível observar a diferença significativa entre as médias para os filmes TPA e TPA 5%. Esta diferença significativa está associada a incorporação das nanopartículas que atua como reforço na matriz polimérica, pois o filme TPA é constituído apenas por amido de araruta e glicerol.

No entanto, é possível observar que não há diferença significativa entre os filmes de nanocompósitos TPA 1% e TPA 3%, encontradas para esta propriedade, indicando que a incorporação das nanopartículas de ZnO não exerceu influência sobre essas propriedades, não havendo diferença estatística para a máxima força suportada pelos filmes antes da ruptura.

Considerando o nível de significância de 5 % para a deformação, é possível observar não há diferença significativa entre as médias para o filme TPA e filmes de nanocompósitos TPA 1%, TPA 3% e TPA 5% respectivamente.

Para o módulo de elasticidade, observa-se que para os filmes TPA e TPA 5% não houve diferença entre as médias considerando o nível de significância de 5%. Por outro lado, para os filmes TPA 1% e TPA 3% diferem significativamente dos demais filmes. Diante do exposto, o filme TPA e TPA 5% apresentaram maior rigidez.

Esse mesmo padrão foi identificado por Chieh e Siddique (2018) que conduziram um

estudo visando reforçar as propriedades mecânicas de biopolímeros de amido de sagu com nanocargas de ZnO em diferentes porcentagens de 0 a 5%. Os resultados indicaram que o aumento progressivo das NPs ZnO na matriz polimérica resultou em maior resistência à tração e módulo de elasticidade. Os autores destacaram uma melhora no alongamento de ruptura dos filmes, atribuída ao deslizamento das nanocargas de ZnO.

Helmiyati *et al.* (2021) investigaram o efeito das NPs ZnO na composição físico-química de filmes de (CMC-PVA) em concentrações de 0,5%, 1,0%, e 1,5%. Os resultados indicaram que a adição de NPs ZnO nos filmes de nanocompósitos resultou em maior resistência à tração e alongamento. Os maiores valores foram obtidos para CMC-PVA com 1,5% de NPs ZnO. Esse efeito decorre da influência das NPs de ZnO, que preenchem uniformemente a matriz do biopolímero, favorecendo a distribuição homogênea e, conseqüentemente, aumentando a resistência dos filmes.

Delavari e Stiharu (2022) estudaram a resistência à tração e alongamento de filmes ao adicionar nanopartículas de óxido de zinco a um material à base de amido, álcool polivinílico, ácido cítrico e glicerol. Os resultados indicaram um aumento significativo na resistência à tração e uma redução gradual no alongamento de ruptura dos filmes com a adição progressiva de NPs ZnO à solução.

Os autores atribuíram o aumento da resistência à tração à dispersão uniforme das NPs de óxido de zinco na matriz, criando propriedades superficiais específicas. Além disso, destacaram a influência direta do teor de umidade nas propriedades mecânicas dos filmes. A adição de NPs ZnO à solução reduziu o conteúdo de moléculas de água, diminuindo a flexibilidade e aumentando a resistência dos filmes resultantes.

Com base nos resultados obtidos neste estudo, sugere-se que o filme TPA 5% apresenta um comportamento mecânico superior, juntamente com características de deformação e módulo de elasticidade que o tornam adequado para embalar alimentos. No entanto, recomenda-se a realização de mais ensaios e testes adicionais para confirmar essa conclusão.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No âmbito deste estudo, foram obtidos filmes de TPA e filmes de nanocompósitos de amido de araruta termoplastificado com diferentes concentrações de NPs ZnO (1%, 3% e 5%). A partir dos resultados obtidos para o aspecto visual, a luminosidade não foi impactada nos distintos tratamentos; entretanto, a intensidade da cor foi afetada pelo aumento da incorporação das NPs na matriz polimérica. Os filmes de TPA demonstraram maior flexibilidade em comparação aos filmes com TPA com NPs ZnO.

Os filmes de TPA, TPA 1%, TPA 3%, e TPA 5% foram obtidos com êxito por meio da técnica de evaporação por solvente. Conforme os resultados apresentados nos espectros FTIR, a incorporação de NPs ZnO na matriz polimérica não provocou alterações estruturais nas cadeias poliméricas.

Nas análises termogravimétricas, observou-se a remoção de grupos funcionais de hidrogênio, a degradação e despolimerização do polímero de cadeias de carbono e amido, com a decomposição térmica do material ocorrendo acima de 300 °C. A respeito da morfologia dos filmes analisada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), as imagens revelam a presença randomicamente dispersa de agregados de NPs ZnO em nível nanométrico nos filmes TPA 1%, TPA 3%, e TPA 5%, incorporados na matriz polimérica de araruta.

Ao considerar os resultados do percentual de solubilidade em água para os filmes TPA, TPA 1%, TPA 3%, e TPA 5%, observa-se que não houve alterações significativas ao adicionar as nanopartículas de óxido de zinco. A adição das NPs nas concentrações de 1%, 3%, e 5% à matriz polimérica induziu a redução no percentual de umidade em comparação ao filme contendo apenas o amido de araruta.

Os filmes de TPA apresentaram elevado grau de intumescimento no período de 1 hora e 3 horas, assim como os filmes de TPA 3% e 5%, que manifestaram comportamento semelhante. No entanto, os filmes TPA 1% exibiram baixo grau de intumescimento nos períodos de 1, 2 e 3 horas, respectivamente.

Com base nos resultados do ensaio de tração, o teste de Duncan revelou que não houve diferença significativa entre os filmes TPA 1% e TPA 3%. No entanto, foi possível observar uma diferença estatística para os filmes TPA e TPA 5% devido à incorporação das NPs na matriz de amido, resultando em uma maior resistência. Quanto ao ensaio de deformação, não foi observada diferença estatística significativa entre as médias dos filmes TPA, TPA 1%, TPA 3% e TPA 5%. Além disso, foi observado que não houve diferença significativa entre os filmes TPA e TPA 5%. No entanto, essa diferença foi observada nos filmes TPA 1% e TPA 3%.

## 6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Utilizar diferentes concentrações de nanopartículas de óxido de zinco em matriz polimérica com amido de araruta;
- Realizar testes laboratoriais como ângulo de contato e permeabilidade ao vapor de água;
- Empregar técnicas de caracterização de difração de raio-x para verificar o índice de cristalinidade dos materiais;
- Realizar testes biológicos *in vitro* para avaliar a atividade antimicrobiana;
- Conduzir ensaios de citotoxicidade como forma de avaliar a biocompatibilidade do material desenvolvido no presente estudo, com o objetivo de determinar se ele manifesta compatibilidade com sistemas biológicos, sem induzir efeitos adversos à saúde humana.

## REFERÊNCIAS

ABDILLAH, A. A.; CHARLES, A. L. Characterization of a natural biodegradable edible film obtained from arrowroot starch and iota-carrageenan and application in food packaging. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 191, n. September, p. 618–626, 2021.

ABDUL KHALIL, H. P. S. et al. Cellulose reinforced biodegradable polymer composite film for packaging applications. Em: **Bionanocomposites for Packaging Applications**. [s.l.] Springer International Publishing, p. 49–69, 2017.

ADEWALE, P.; YANCHESHMEH, M. S.; LAM, E. Starch modification for non-food, industrial applications: Market intelligence and critical review. **Carbohydrate Polymers**, v. 291, p. 119590, 1 set. 2022.

ALFREY, T. **Structure-Property Relationships in Polymers. 1985**

ALI, S. S. et al. Degradation of conventional plastic wastes in the environment: A review on current status of knowledge and future perspectives of disposal. **Science of The Total Environment**, v. 771, p. 144719, 1 jun. 2021.

ALIZADEH-SANI, M. et al. pH-sensitive (halochromic) smart packaging films based on natural food colorants for the monitoring of food quality and safety. **Trends in Food Science & Technology**, v. 105, p. 93–144, 1 nov. 2020.

AL-SALEM, S. M. et al. **A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW)**. **Journal of Environmental Management** Academic Press, 15 jul. 2017.

ANDOH, C. N. et al. Fourier Transform Infrared Spectroscopy: An analytical technique for microplastic identification and quantification. **Infrared Physics & Technology**, v. 136, n. December 2023, p. 105070, 2024.

APRIYANTO, A.; COMPART, J.; FETTKE, J. A review of starch, a unique biopolymer – Structure, metabolism and in planta modifications. **Plant Science**, v. 318, p. 111223, 1 maio 2022.

ALASHEK, F.; KESHE, M.; ALHASSAN, G. Preparation of glycerol derivatives by entered of glycerol in different chemical organic reactions: A review. **Results in Chemistry**, v. 4, p. 100359, 1 jan. 2022.

ARAÚJO, M. S. et al. Araruta, seu beneficiamento e utilização em preparações

gastronômicas. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 15, p. e387101522776, 28 nov. 2021.

BABAPOUR, H.; JALALI, H.; MOHAMMADI NAFCHI, A. The synergistic effects of zinc oxide nanoparticles and fennel essential oil on physicochemical, mechanical, and antibacterial properties of potato starch films. **Food Science and Nutrition**, v. 9, n. 7, p. 3893–3905, 2021.

BAHRAMI, A. et al. Antimicrobial-loaded nanocarriers for food packaging applications. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 278, p. 102140, 1 abr. 2020.

BELTRÁN-SANAHUJA, A. et al. Degradation of conventional and biobased plastics in soil under contrasting environmental conditions. **Science of the Total Environment**, v. 787, 15 set. 2021.

BEMILLER, J. N. **6. Starches: Molecular and Granular Structures and Properties**. [s.l.: s.n.]. 2019

BERGEL, B. F.; LUZ, L. M. DA; SANTANA, R. M. C. Comparative study of the influence of chitosan as coating of thermoplastic starch foam from potato, cassava, and corn starch. **Progress in Organic Coatings**, v. 106, p. 27–32, 1 maio 2017.

BORBA, V. S. DE et al. Modificações Do Amido E Suas Implicações Tecnológicas E Nutricionais. p. 428–457, 2021.

BRITO, G. F. et al. Biopolímeros, Polímeros Biodegradáveis e Polímeros Verdes. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 6, n. 2, p. 127–139, 2011.

BRITO, V. et al. Arrowroot (*Maranta arundinacea* L.): Botany, Horticulture, and Uses. Em: WARRINGTON, I. (Ed.). **Horticultural Reviews**. 1. ed. [s.l.] John Wiley & Sons, Inc., 2021. v. 48p. 233–274.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 9. ed. [s.l.] LTC, 2016.

CHANG, Q. et al. A comprehensive review of the factors influencing the formation of retrograded starch. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 186, p. 163–173, 1 set. 2021.

CHAROENSRI, K. et al. Investigation of functionalized surface charges of thermoplastic starch/zinc oxide nanocomposite films using polyaniline: The potential of improved antibacterial properties. **Polymers**, v. 13, n. 3, p. 1–15, 2021.

CHIEH, J. S. P.; SIDDIQUE, B. M. Preparation of degradable sago starch film incorporated with zinc oxide (Zno) nanoparticles for enhanced chemical barrier and mechanical properties. **Key Engineering Materials**, v. 792, p. 104–110, 2018.

CORRADINI, E. et al. **Amido Termoplástico**. 1ª Edição ed. [s.l: s.n.]. v. 30, 2007.

CUI, C. et al. Bioactive and intelligent starch-based films: A review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 116, p. 854–869, 1 out. 2021.

CUNHA, A. L. **Caracterização do amido da Araruta tipos seta e redonda, visando utilização na indústria de alimentos**. Dissertação Lavras-MG: Universidade Federal de Lavras, 22 fev. 2016.

DAMIAN, K. B. B. T. et al. Fabrication and characterization of biocomposite membranes from polycaprolactone and native arrowroot (*Maranta arundinacea* l.) extracted starch. **Materials Science Forum**, v. 998 MSF, n. 1, p. 163–169, 2020.

DELAVARI, M. M.; STIHARU, I. Preparing and Characterizing Novel Biodegradable Starch/PVA-Based Films with Nano-Sized Zinc-Oxide Particles for Wound-Dressing Applications. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 12, n. 8, 2022.

DESWINA, P.; PRIADI, D. **Development of Arrowroot (*Maranta arundinacea* L.) as Functional Food Based of Local Resource**. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. **Anais...**Institute of Physics Publishing, 21 fev. 2020.

DONMEZ, D. et al. Characterization of starch–water interactions and their effects on two key functional properties: starch gelatinization and retrogradation. **Current Opinion in Food Science**, v. 39, p. 103–109, 1 jun. 2021.

EDHIREJ, A. et al. Cassava/sugar palm fiber reinforced cassava starch hybrid composites: Physical, thermal and structural properties. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 101, p. 75–83, 1 ago. 2017.

ESMAEILI, M. et al. Poly(lactic acid)/coplasticized thermoplastic starch blend: Effect of plasticizer migration on rheological and mechanical properties. **Polymers for Advanced Technologies**, v. 30, n. 4, p. 839–851, 1 abr. 2019.

ESTEVEZ-ARECO, S. et al. Bioactive starch nanocomposite films with antioxidant activity and enhanced mechanical properties obtained by extrusion followed by thermo-compression. **Food Hydrocolloids**, v. 96, p. 518–528, 1 nov. 2019.

FAKHOURI, F. M. et al. Bioactive edible films based on arrowtoot starch incorporated with cranberry powder: Microestructute, termal Properties, ascorbic acid content and sensory analysis. **Polymers**, v. 11, n. 10, 2019.

FOGHARA, S. K. et al. Fabrication and characterization of an active bionanocomposite film based on basil seed mucilage and ZnO nanoparticles. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 14, n. 6, p. 3542–3550, 2020.

HUNTRAKUL, K.; HARNKARNSUJARIT, N. Effects of plasticizers on water sorption and aging stability of whey protein/carboxy methyl cellulose films. **Journal of Food Engineering**, v. 272, n. October 2019, p. 109809, 2020.

GALLI, R. et al. Antibacterial polyethylene - Ethylene vinyl acetate polymeric blend by incorporation of zinc oxide nanoparticles. **Polymer Testing**, v. 89, 1 set. 2020.

GARRISON, T.; MURAWSKI, A.; QUIRINO, R. Bio-Based Polymers with Potential for Biodegradability. **Polymers**, v. 8, n. 7, p. 262, 14 jul. 2016.

GOYAL, S.; HERNÁNDEZ, N. B.; COCHRAN, E. W. An update on the future prospects of glycerol polymers. **Polymer International**, v. 70, n. 7, p. 911–917, 25 jul. 2021.

GUERRA, I. C. Desenvolvimento de filme e revestimento à base de pectina do pequi incorporado de nanopartículas de ZnO e aplicação em pós-colheita de manga. **Dissertação (Mestrado)** - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - Campus Rio Verde, 2021.

GUILHERME, D. DE O. et al. Starch valorization from corm, tuber, rhizome, and root crops: The arrowroot (*Maranta arundinacea* L.) case. Em: **Starches for Food Application: Chemical, Technological and Health Properties**. [s.l.] Elsevier, p. 167–222, 2018.

- HELMİYATI, H. et al. Antimicrobial packaging of ZnO–Nps infused into CMC–PVA nanocomposite films effectively enhances the physicochemical properties. **Polymer Testing**, v. 104, 1 dez. 2021.
- ILYAS, R. A. et al. Effect of sugar palm nanofibrillated cellulose concentrations on morphological, mechanical and physical properties of biodegradable films based on agro-waste sugar palm (*Arenga pinnata* (Wurmb.) Merr) starch. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, n. 5, p. 4819–4830, 1 set. 2019.
- JAYAKUMAR, A. et al. Starch-PVA composite films with zinc-oxide nanoparticles and phytochemicals as intelligent pH sensing wraps for food packaging application. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 136, p. 395–403, 1 set. 2019.
- KAVITHA, A. et al. A mini review on plant-mediated zinc oxide nanoparticles and their antibacterial potency. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 48, p. 102654, 1 mar. 2023.
- KHAIRNAR, B. A. et al. Study of biogenic fabrication of zinc oxide nanoparticles and their applications: A review. **Inorganic Chemistry Communications**, v. 146, p. 110155, 1 dez. 2022.
- KUNDURU, K. R. et al. Renewable polyol-based biodegradable polyesters as greener plastics for industrial applications. **Chemical Engineering Journal**, v. 459, p. 141211, 1 mar. 2023.
- LANGER, E. et al. Assessment of Traditional Plasticizers. Em: **Plasticizers Derived from Post-Consumer PET**. [s.l.] Elsevier, p. 1–11, 2020.
- LEPOT, N. et al. Influence of Incorporation of ZnO Nanoparticles and Biaxial Orientation on Mechanical and Oxygen Barrier Properties of Polypropylene Films for Food Packaging Applications. v. 1, 2010.
- LI, J. et al. The location of octenyl succinate anhydride groups in high-amylose maize starch granules and its effect on stability of pickering emulsion stability. **LWT**, v. 169, p. 113892, 1 nov. 2022.
- LIU, W. et al. Relationship among gelatinization, retrogradation behavior, and impedance characteristics of potato starch. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 227, p. 354–364, 1 fev. 2023.

MANGARAJ, S. et al. Application of Biodegradable Polymers in Food Packaging Industry: A Comprehensive Review. **Journal of Packaging Technology and Research**, v. 3, n. 1, p. 77–96, mar. 2019.

MANRICH, S. Processamento de Termoplásticos: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e molde, 1. ed. - São Paulo: Artiliber Editora, 2005.

MARICHELVAM, M. K.; JAWAID, M.; ASIM, M. Corn and rice starch-based bioplastics as alternative packaging materials. **Fibers**, v. 7, n. 4, 1 abr. 2019.

MARY, S. K. et al. A review of recent advances in starch-based materials: Bionanocomposites, pH sensitive films, aerogels, and carbon dots. **Carbohydrate Polymer Technologies and Applications**, v. 3, p. 100190, 1 jun. 2022.

MALKI, M. K. S. et al. Characterization of arrowroot (*Maranta arundinacea*) starch as a potential starch source for the food industry. **Heliyon**, v. 9, n. 9, p. e20033, 2023.

MIRZA, A. U. et al. *Malus pumila* and *Juglen regia* plant species mediated zinc oxide nanoparticles: Synthesis, spectral characterization, antioxidant, and antibacterial studies. **Microbial Pathogenesis**, v. 129, p. 233–241, 1 abr. 2019.

MOHD NIZAM, N. H. et al. Physical, thermal, mechanical, antimicrobial, and physicochemical properties of starch-based film containing aloe vera: a review. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 15, p. 1572–1589, 1 nov. 2021.

MURALI, M. et al. Antibacterial and antioxidant properties of biosynthesized zinc oxide nanoparticles from *Ceropegia candelabrum* L. – An endemic species. **Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 179, p. 104–109, 15 maio 2017.

NASCIMENTO, J. A. DE A. et al. Physico-Chemical, Mechanical and Morphological Properties of Biodegradable Films Based on Arrowroot Starch and Poly(vinyl alcohol). **Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics**, v. 60, n. 12, p. 1045–1068, 2021a.

NASCIMENTO, S. S. et al. Prospecção Tecnológica sobre Embalagens Ativas para Alimentos. **Cadernos de Prospecção**, v. 14, n. 4, p. 1310–1325, 1 out. 2021b.

NAZRI, M. S. M. et al. Characterization of Jackfruit Straw-based Films: Effect of Starch and Plasticizer Contents. **Pertanika Journals Science & Technology**, v. 27, n. S1, p. 1–14, 2019.

NDUKO, J. M.; TAGUCHI, S. Microbial Production of Biodegradable Lactate-Based Polymers and Oligomeric Building Blocks from Renewable and Waste Resources. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 8, 4 fev. 2021.

NOGUEIRA, G. F.; FAKHOURI, F. M.; OLIVEIRA, R. A. DE. Extraction and characterization of arrowroot (*Maranta arundinaceae* L.) starch and its application in edible films. **Carbohydrate Polymers**, v. 186, p. 64–72, 15 abr. 2018.

NORDIN, A. H. et al. Starch-based plastics: A bibliometric analysis. **Materials Today: Proceedings**, v. 74, p. 519–523, 1 jan. 2022.

NUNES, J. V. DA S. **Quim. Nova**. v. 41, n. 9, p. 1006–1010, 2018.

OCHOA-YEPES, O. et al. Influence of process (extrusion/thermo-compression, casting) and lentil protein content on physicochemical properties of starch films. **Carbohydrate Polymers**, v. 208, p. 221–231, 2019.

OGUNSONA, E.; OJOGBO, E.; MEKONNEN, T. **Advanced material applications of starch and its derivatives**. **European Polymer Journal** Elsevier Ltd, 1 nov. 2018.

ÖZEREN, H. D. et al. Role of hydrogen bonding in wheat gluten protein systems plasticized with glycerol and water. **Polymer**, v. 232, p. 124149, 12 out. 2021.

ÖZGÜR, Ü. et al. A comprehensive review of ZnO materials and devices. **Journal of Applied Physics**, v. 98, n. 4, p. 1–103, 15 ago. 2005.

PALAI, B. et al. In situ reactive compatibilization of polylactic acid (PLA) and thermoplastic starch (TPS) blends; synthesis and evaluation of extrusion blown films thereof. **Industrial Crops and Products**, v. 141, p. 111748, 1 dez. 2019.

PEDROSA SILVA CLERICI, M. T.; SCHMIELE, M. **Starches for food application: Chemical, technological and health properties**. [s.l: s.n.], 2018.

PETKOSKA, A. T. et al. Edible packaging: Sustainable solutions and novel trends in food packaging. **Food Research International**, v. 140, p. 109981, 1 fev. 2021.

PRIYADARSHI, R.; KUMAR, B.; RHIM, J.-W. Green and facile synthesis of carboxymethylcellulose/ZnO nanocomposite hydrogels crosslinked with Zn<sup>2+</sup> ions. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 162, p. 229–235, 1 nov. 2020.

REDDY, P. P. Arrowroot, *Maranta arundinacea*. Em: **Plant Protection in Tropical Root and Tuber Crops**. [s.l.] Springer India, p. 319–322, 2015.

REGUBALAN, B., PANDIT, P., MAITI, S., NADATHUR, G. T., & MALLICK, A. Potential bio-based edible films, foams, and hydrogels for food packaging. In S. Ahmed (Ed.), *Bio-based materials for food packaging: Green and sustainable advanced packaging materials*, p. 105–123, 2018.

RIVERA LEIVA, A. F.; HERNÁNDEZ-FERNÁNDEZ, J.; ORTEGA TORO, R. Active Films Based on Starch and Wheat Gluten (*Triticum vulgare*) for Shelf-Life Extension of Carrots. **Polymers**, v. 14, n. 23, p. 5077, 23 nov. 2022.

ROCHA, M. DA et al. Effects of agar films incorporated with fish protein hydrolysate or clove essential oil on flounder (*Paralichthys orbignyanus*) fillets shelf-life. **Food Hydrocolloids**, v. 81, p. 351–363, 1 ago. 2018.

RODRIGUES, L. B. O. et al. Rheological and textural studies of arrowroot (*Maranta arundinacea*) starch–sucrose–whey protein concentrate gels. **Journal of Food Science and Technology**, v. 55, n. 8, p. 2974–2984, 1 ago. 2018.

ROMÃO, S.; BETTENCOURT, A.; RIBEIRO, I. A. C. Novel Features of Cellulose-Based Films as Sustainable Alternatives for Food Packaging. **Polymers**, v. 14, n. 22, p. 4968, 16 nov. 2022.

ROMRUEN, O. et al. Development of Smart Bilayer Alginate/Agar Film Containing Anthocyanin and Catechin-Lysozyme. **Polymers**, v. 14, n. 22, p. 5042, 21 nov. 2022.

SAKLANI, P. et al. A Review of Edible Packaging for Foods. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, v. 8, n. 07, p. 2885–2895, 20 jul. 2019.

SANTHOSH, R.; NATH, D.; SARKAR, P. Novel food packaging materials including plant-based byproducts: A review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 118, p. 471–489, 1 dez. 2021.

SANYANG, M. L.; JAWAID, M. **Bio-based Polymers and Nanocomposites**. Cham: Springer International Publishing, 2019.

SEDIYAMA, M. A. N. et al. Growth analysis and photoassimilated partition in arrowroot plants in organic crop system. **Revista Caatinga**, v. 35, n. 2, p. 482–489, 5 jun. 2022.

SEUNG, D. Amylose in starch: towards an understanding of biosynthesis, structure, and function. **New Phytologist**, v. 228, n. 5, p. 1490–1504, 9 dez. 2020.

SHAFQAT, A. et al. A review on environmental significance carbon footprints of starch-based bioplastic: A substitute of conventional plastics. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 27, p. 101540, 1 ago. 2020.

SMAOUI, S. et al. Zinc oxide nanoparticles in meat packaging: A systematic review of recent literature. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 36, p. 101045, 1 abr. 2023.

SUDERMAN, N.; ISA, M. I. N.; SARBON, N. M. **The effect of plasticizers on the functional properties of biodegradable gelatin-based film: A review**. Food Bioscience Elsevier Ltd, 1 ago. 2018.

SYAFIQ, R.; SAPUAN, S. M.; ZUHRI, M. R. M. Antimicrobial activity, physical, mechanical and barrier properties of sugar palm based nanocellulose/starch biocomposite films incorporated with cinnamon essential oil. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 11, p. 144–157, 1 mar. 2021.

TAHERIMEHR, M. et al. Trends and challenges of biopolymer-based nanocomposites in food packaging. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 20, n. 6, p. 5321–5344, 5 nov. 2021.

TARIQUE, J. et al. Recent developments in sustainable arrowroot (*Maranta arundinacea* Linn) starch biopolymers, fibres, biopolymer composites and their potential industrial applications: A review. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 13, p. 1191–1219, 1 jul. 2021.

TARIQUE, J.; SAPUAN, S. M.; KHALINA, A. Effect of glycerol plasticizer loading on the physical, mechanical, thermal, and barrier properties of arrowroot (*Maranta arundinacea*) starch biopolymers. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, 1 dez. 2021.

TEIXEIRA, S. C. et al. Glycerol and triethyl citrate plasticizer effects on molecular, thermal, mechanical, and barrier properties of cellulose acetate films. **Food Bioscience**, v. 42, 1 ago. 2021.

TOSIF, M. M. et al. Starch–Mucilage Composite Films: An Inclusive on Physicochemical and Biological Perspective. **Polymers**, v. 13, n. 16, p. 2588, 4 ago. 2021.

TURAN, D., GUNES, G., KILIC. **A Perspectives of bionanocomposites for food packaging applications**. In M. Jawaid & S. K. Swain (Eds.), *Bionanocomposites for packaging applications*, p. 1-32, 2018.

VALENCIA, A. G. et al. Physicochemical Properties of Maranta (Maranta arundinacea L.) Starch. *International Journal of Food Properties*, v. 18, n. 9, p. 1990–2001, 2015.

VIEIRA, M. G. A. et al. Natural-based plasticizers and biopolymer films: A review. **European Polymer Journal**, v. 47, n. 3, p. 254–263, mar. 2011.

VISWAN, J. P. et al. Rhizome of Maranta arundinacea Linn. (Tugaksheeri)-pharmacognostical study. **International Journal of AYUSH**, v. 11, n. 4, p. 37–45, 2022.

WANG, J. et al. Thermoplastic starch plasticized by polymeric ionic liquid. **European Polymer Journal**, v. 148, p. 110367, 5 abr. 2021.

WU, Z. et al. Physical properties and structural characterization of starch/polyvinyl alcohol/graphene oxide composite films. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 123, p. 569–575, fev. 2019.

YILDIRIM, S. et al. Active Packaging Applications for Food. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 17, n. 1, p. 165–199, 1 jan. 2018.

YONG, H.; LIU, J. **Recent advances in the preparation, physical and functional properties, and applications of anthocyanins-based active and intelligent packaging films**. *Food Packaging and Shelf Life* Elsevier Ltd, 1 dez. 2020.

ZDANOWICZ, M.; SAŁASIŃSKA, K. Characterization of Thermoplastic Starch Plasticized with Ternary Urea-Polyols Deep Eutectic Solvent with Two Selected Fillers: Microcrystalline Cellulose and Montmorillonite. **Polymers**, v. 15, n. 4, p. 972, 16 fev. 2023.

ZHAO, L. et al. Anthocyanin-based pH-sensitive smart packaging films for monitoring food freshness. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 9, p. 100340, 1 set. 2022.

ZHONG, Y. et al. **Biodegradable polymers and green-based antimicrobial packaging materials: A mini-review**. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research* KeAi Communications Co., 1 jan. 2020.

ZHU, F.; LIU, P. Starch gelatinization, retrogradation, and enzyme susceptibility of retrograded starch: Effect of amylopectin internal molecular structure. *Food Chemistry*, v. 316, 30 jun. 2020.

ŻOŁEK-TRYZNOWSKA, Z.; KAŁUŻA, A. The influence of starch origin on the properties of starch films: Packaging performance. *Materials*, v. 14, n. 5, p. 1–11, 1 mar. 2021b.

## ANEXOS

Nesta seção serão apresentadas as comprovações de trabalhos oriundos desta pesquisa, e o pedido de patente realizado ao Instituto Nacional da Propriedade Intelectual (INPI).

## Pedido de patente ao Instituto Nacional de Propriedade Intelectual



18/12/2023 870230111448  
14:16  
29409162313770105

Pedido nacional de invenção, Modelo de Utilidade, Certificado de Adição de Invenção e entrada na fase nacional do PCT

Número do Processo: BR 10 2023 026682 7

## Dados do Depositante (71)

## Depositante 1 de 8

Nome ou Razão Social: BIANCA CORREA PINTO

Tipo de Pessoa: Pessoa Física

CPF/CNPJ: 02700974220

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Estudante de Pós Graduação

Endereço: Passagem Primavera

Cidade: Ananindeua

Estado: PA

CEP: 67035030

País: Brasil

Telefone:

Fax:

Email: biancacorreapinto18@gmail.com

## Dados do Pedido

Natureza Patente: 10 - Patente de Invenção (PI)

Título da Invenção ou Modelo de Utilidade (54): FILME PARA EMBALAGENS ATIVAS FORMADO POR NANOCOMPÓSITO POLIMÉRICO DE AMIDO DE ARARUTA TERMOPLASTIFICADO E NANOPARTÍCULA DE ÓXIDO DE ZINCO

Resumo: É apresentado nesta patente de invenção um nanocompósito polimérico formado pelo amido de araruta termoplastificado e nanopartícula de óxido de zinco, para ser utilizado no setor de embalagem de ativas. Trata-se de um nanocompósito, onde as nanopartículas de óxido de zinco estão dispersas na matriz de amido de araruta, tais nanopartículas têm também atividade antimicrobiana. Os filmes de nanocompósitos poliméricos obtidos nesta patente de invenção são biocompatíveis e biodegradáveis, podendo serem utilizados em outras aplicações como material biodegradável e biocompatível.

Figura a publicar: FIG 1