



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
ALIMENTOS**

**DESENVOLVIMENTO DE EMBALAGENS RÍGIDAS BIODEGRADÁVEIS A
PARTIR DE FARELO DE TRIGO E CASCA DE PITAYA**

Alessandra Teresinha Wolter

Porto Alegre, junho de 2024.

Alessandra Teresinha Wolter

DESENVOLVIMENTO DE EMBALAGENS RÍGIDAS BIODEGRADÁVEIS A
PARTIR DE FARELO DE TRIGO E CASCA DE PITAYA

Dissertação de Mestrado apresentada
ao Programa de Pós-Graduação em
Ciência e Tecnologia de Alimentos
como requisito parcial para obtenção
do grau de Mestre em Ciência e
Tecnologia de Alimentos.

Orientador: Prof. Dra. Simone Hickmann Flôres e Prof. Dr. Alessandro de
Oliveira Rios

Coorientador: Prof. Dr. Sandro Campos Amico

Porto Alegre, junho de 2024.

CIP - Catalogação na Publicação

Wolter, Alessandra Teresinha
DESENVOLVIMENTO DE EMBALAGENS RÍGIDAS
BIODEGRADÁVEIS A PARTIR DE FARELO DE TRIGO E CASCA DE
PITAYA / Alessandra Teresinha Wolter. -- 2024.
121 f.
Orientadores: Simone Hickmann Flôres, Alessandro de
Oliveira Rios.

Coorientador: Sandro Campos Amico.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Instituto de Ciência e Tecnologia
de Alimentos, Programa de Pós-Graduação em Ciência e
Tecnologia de Alimentos, Porto Alegre, BR-RS, 2024.

1. Casca de pitaya. 2. Farelo de trigo. 3. Cera ded
carnaúba. 4. Amido. 5. Fibra. I. Hickmann Flôres,
Simone, orient. II. de Oliveira Rios, Alessandro,
orient. III. Campos Amico, Sandro, coorient. IV.
Titulo.

DESENVOLVIMENTO DE EMBALAGENS RÍGIDAS BIODEGRADÁVEIS A
PARTIR DE FARELO DE TRIGO E CASCA DE PITAYA

EXECUTOR: Alessandra Teresinha Wolter

Médica veterinária – UFRGS, aluna do Curso de Pós-Graduação
em Ciência e Tecnologia de Alimentos.

ORIENTADOR: Simone Hickmann Flôres - Doutora em Engenharia de Alimentos
e Alessandro de Oliveira Rios -e Doutor em Ciência de Alimentos

Coorientador: Sandro Campos Amico - Doutor em Engenharia de Materiais

LOCAL DE EXECUÇÃO: Laboratório de Química de Alimentos, Laboratório de
Compostos Bioativos (ICTA/UFRGS) e GCOMP (PPG3M/UFRGS).

AGRADECIMENTOS

“Eu moro em mim mesmo. Não faz mal que o quarto seja pequeno. É bom, assim tenho menos lugares para perder as minhas coisas.”. Mário Quintana.

Agradeço primeiramente aos meus orientadores por terem um caminhão de paciência comigo, porque sei que não sou uma orientada fácil.

Agradeço às minhas amigas do laboratório, Ana e Cecília, que sempre tiveram um puxão de orelhas, um abraço ou uma palavra sábia para dar.

Agradeço aos meus amigos no geral que tiveram paciência com minhas negativas para tomar um café porque eu estava constantemente ocupada.

Agradeço ao meu pai que, embora não esteja mais aqui, me forneceu capacidade para seguir estudando.

Agradeço a minha mãe pelos elogios meio tortos, mas sempre sinceros.

Agradeço ao meu namorado que tem sido amor e luz na minha vida.

Agradeço finalmente a mim mesma, por não ter desistido no meio do caminho.

RESUMO

A utilização e o descarte incorreto de embalagens plásticas têm sido um dos responsáveis pelo aumento descontrolado da poluição terrestre e oceânica mundial. Nesse aspecto são várias as pesquisas desenvolvidas em prol do desenvolvimento de embalagens biodegradáveis. Aliado a tais fatores, anualmente, toneladas de alimentos e resíduos não são aproveitados. Ao mesmo tempo existem vários estudos que comprovam que tais resíduos possuem propriedades de reforço e podem agregar propriedades mecânicas desejáveis a certos materiais. Sendo assim, o objetivo desse trabalho foi desenvolver uma embalagem rígida biodegradável, produzida principalmente com matéria-prima proveniente de subprodutos agroindustriais. A casca de pitaya e o farelo de trigo foram utilizados para fornecer reforço adequado às embalagens de amido de milho e que foram desenvolvidas por termo compressão. Foram realizadas análises quanto às suas propriedades mecânicas, térmicas, funcionais e morfológicas. As bandejas com 50% de farelo de trigo ou de farinha de casca de pitaya foram selecionadas por apresentarem melhores propriedades mecânicas e capacidade de absorção de água, nas quais foi aplicado cera de carnaúba como impermeabilizante. A cera de carnaúba conferiu uma cobertura lisa e brilhante à bandeja, garantindo um selamento adequado dos poros e foram utilizadas embalar brócolis armazenado por até 10 dias. Ao final do estudo houve manutenção das propriedades mecânicas da bandeja que também foi capaz de sofrer degradação microbiana em solo. Dessa forma, esse estudo foi eficaz na obtenção de um novo tipo de embalagem biodegradável com aquedada resistência e baixa capacidade de absorção de água para alimentos com elevada umidade.

Palavras-chaves: Casca de pitaya; farelo de trigo; cera de carnaúba; fibra; amido; brócolis.

ABSTRACT

The production and use of plastic packaging has been one of the factors responsible for the rampant increase in global land and ocean pollution. In this respect, there has been a lot of research into developing biodegradable packaging. In addition to these factors, tons of food and waste are not widely used yearly. At the same time, several studies have shown that such waste has reinforcing properties and can add rigidity to certain materials. Therefore, this work aimed to develop a rigid biodegradable packaging produced mainly with raw materials from agro-industrial waste. Pitaya peel and wheat bran were used to provide suitable reinforcement for corn starch packaging produced by thermocompression method, which was then analyzed for its mechanical, thermal, functional, and morphological properties. The trays with 50% of each fiber were selected because they had the most suitable characteristics for use in food, and carnauba wax was applied to them as a waterproofing agent. The carnauba wax gave the tray a smooth, shiny coating, ensuring adequate pore sealing and allowing it to be used for packaging broccoli for up to 10 days. At the end of the study, it was found that the tray was effective in storing broccoli, maintaining its mechanical properties and being able to undergo microbial degradation in soil. This study was, therefore, effective in obtaining a new type of biodegradable packaging with high resistance and water absorption for foods with high humidity.

Key-words: Pitaya peel; wheat bran; carnauba wax; fiber; starch; broccoli.

SUMÁRIO

RESUMO	5
ABSTRACT	6
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	10
CAPÍTULO 2 OBJETIVOS	13
2.1. OBJETIVO GERAL	13
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
CAPÍTULO 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1. EMBALAGENS RÍGIDAS BIODEGRADÁVEIS.....	14
3.1.1. Embalagens rígidas a partir de fontes renováveis.	16
3.1.2. Aproveitamento de resíduos na fabricação de embalagens biodegradáveis	18
3.2. ADITIVOS	34
3.3. APLICAÇÕES EM ALIMENTOS	36
3.5. CASCA DE PITAYA.....	40
3.6. CERA DE CARNAÚBA	41
CAPÍTULO 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1.1. INTRODUÇÃO	43
4.1.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	45
4.1.2.1. Material	45
4.1.2.2. Métodos	45
4.1.2.2.1. Preparo das fibras provenientes dos resíduos agroindustriais.....	45
4.1.2.2.2. Caracterização da farinha de casca de pitaya e do farelo de trigo ..	45
4.1.2.2.3. Elaboração da embalagem rígida	46
4.1.3. CARACTERIZAÇÃO DAS BANDEJAS.....	47
4.1.3.1. Densidade	47
4.1.3.2. Espessura	47
4.1.3.3. Análise colorimétrica	47
4.1.3.4. Propriedades mecânicas	48
4.1.3.5. Absorção de água	48
4.1.3.6. Análise térmica	49
4.1.3.7. Morfologia	49
4.1.3.8. Biodegradabilidade	49
4.1.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	50

4.1.4.1. Caracterização das farinhas de casca de pitaya e de farelo de trigo	50
4.1.4.2.1. Espessura e densidade	51
4.1.4.2.2. Cor	53
4.1.4.2.3. Propriedades mecânicas.....	54
4.1.4.2.3.1. Impacto.....	55
4.1.4.2.3.2. Dureza (Shore D)	55
4.1.4.2.3.4. Propriedades de Flexão	66
4.1.4.2.4. Absorção de água.....	67
4.1.4.2.5. Análise Térmica	69
4.1.4.2.5.1. TGA.....	69
4.1.4.2.5.2. DSC.....	70
4.1.4.2.6. Análise Morfológica.....	71
4.1.4.2.7. Biodegradabilidade	75
4.1.5. CONCLUSÃO	78
4.2. EXPLORANDO NOVAS POSSIBILIDADES: BANDEJAS BIODEGRADÁVEIS A BASE DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS COM COBERTURA IMPERMEABILIZANTE DE CERA DE CARNAÚBA	83
4.2.1. INTRODUÇÃO	83
4.2.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	85
4.2.2.1. Material	85
4.2.2.2. Métodos	85
4.2.2.2.1. Preparo das fibras provenientes dos resíduos agroindustriais.....	85
4.2.2.3. Caracterização das bandejas	87
4.2.2.3.1. Densidade.....	87
4.2.2.3.2. Espessura	87
4.2.2.3.3. Análise colorimétrica	87
4.2.2.3.4. Propriedades mecânicas.....	88
4.2.2.3.5. Absorção de água.....	88
4.2.2.3.6. Morfologia	88
4.2.2.3.7. Biodegradabilidade	89
4.2.2.3.8. Aplicabilidade.....	89
4.2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	90
4.2.3.1. Espessura e Densidade	90
4.2.3.2. Análise Colorimétrica	91
4.2.3.3. Propriedades mecânicas	91

4.2.3.3.1. Dureza (Shore D).....	91
4.2.3.3.2. Impacto	92
4.2.3.3.3. Propriedades de Tração.....	92
4.2.3.3.4. Propriedades de Flexão	95
4.2.3.4. Absorção de Água	96
4.2.3.5. Análise Morfológica	97
4.2.3.6. Biodegradabilidade.....	99
4.2.3.7. Aplicabilidade.....	102
4.2.4. CONCLUSÃO	110
4.2.5. REFERÊNCIAS	111
CAPÍTULO 5 DISCUSSÃO GERAL	114
CAPÍTULO 6 CONCLUSÃO	117
CAPÍTULO 7 PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	118
CAPÍTULO 8 REFERÊNCIAS.....	119

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

A pesquisa de compostos alternativos para a substituição gradativa dos polímeros provenientes de fontes não renováveis tem crescido anualmente. Entretanto, algumas barreiras ainda podem ser encontradas, como falta de resistência dos materiais utilizados e a dificuldade de equipamentos para processamento de tais produtos. Entre os novos materiais pesquisados para produção de embalagens, destaca-se o ácido polilático (PLA), polibutilenosuccinato (PBS), polihidroxialcoanato (PHA), policaprolactona (PCL), proteínas, entre outros, como os diferentes tipos de amido (NCUBE *et al.*, 2021).

O amido tem sido muito pesquisado por ser proveniente de diversas fontes renováveis e pela facilidade de processamento. Esse polímero pode ser extraído de alimentos mundialmente conhecidos como batata (*Solanum tuberosum*), milho (*Zea mays*) e mandioca (*Manihot esculenta*), ou ainda de fontes não-convencionais, como caroço de manga (*Mangifera indica*), gengibre (*Rizhoma curcumae longae*), bambú (*Bambusa vulgaris*), entre outros (TAGLIAPIETRA *et al.*, 2021). Independentemente da fonte, sua composição é basicamente a mesma, ou seja, o polímero é formado por uma estrutura linear, denominada amilose juntamente com a estrutura ramificada, denominada amilopectina (JIANG *et al.*, 2020).

Semelhante aos polímeros derivados de petróleo, os biocompostos originados de fontes renováveis raramente são utilizados de modo isolado. Para melhorar as propriedades do material produzido com amido e diminuir o custo de produção, geralmente ocorre a incorporação de fibras naturais. As fibras de celulose possuem um grande número de grupos hidroxilas na sua superfície e esses grupamentos ao interagirem com as moléculas de amido formam uma densa rede estruturada (CHENG *et al.*, 2021). Essa agregação apresenta vantagens visto que o biopolímero final tem suas características termomecânicas melhoradas e menor custo, pois as fibras são, em sua maioria, oriundas de resíduos que seriam descartados (JIANG *et al.*, 2020).

A utilização de polímeros de fontes renováveis juntamente com a utilização de resíduos agroindustriais pode gerar um produto de alto valor agregado. Tal utilização pode reduzir o desperdício de compostos, que podem

representar poluidores em potencial, além de melhorar a viabilidade econômica no setor de embalagens ao promover o conceito de sustentabilidade.

O farelo de trigo e a casca de pitaya são resíduos descartados ou subaproveitados, logo sua utilização para fabricação de embalagens fornece uma alternativa para redução de material descartado e por consequência da poluição para o ecossistema. O farelo é o principal subproduto obtido do processo de moagem do trigo, sendo extraído a partir da camada externa do grão durante a obtenção da farinha (SHEWRY, 2009). Por sua vez, a pitaya é um fruto proveniente do México e esforços estão sendo realizados para aproveitamento integral desse fruto ainda exótico no Brasil, incluindo a utilização da casca em formulações, suplementos vitamínicos ou outros tipos de tecnologias (FERREIRA, V. C. *et al.*, 2023).

Em contrapartida, uma desvantagem das embalagens biodegradáveis, é a baixa resistência à água. Tal característica representa uma preocupação significativa no desenvolvimento de materiais sustentáveis. Enquanto a busca por alternativas *eco-friendly* ganha impulso, é crucial garantir que essas embalagens possuam durabilidade adequada para resistir às condições ambientais, incluindo a exposição à umidade. A fragilidade frente à água pode comprometer a integridade das embalagens, o que pode ocasionar vazamentos, rupturas prematuras e potencial perda de produtos.

Portanto, torna-se essencial definir um equilíbrio entre biodegradabilidade e resistência à água, com a incorporação de tecnologias inovadoras e de materiais adequados para garantir o desenvolvimento de embalagens que atendam aos padrões de desempenho necessários e simultaneamente minimizar o impacto ambiental. Com esse propósito este trabalho teve como objetivo desenvolver embalagens rígidas biodegradáveis a partir de casca de pitaya e farelo de trigo e avaliar a impermeabilização das embalagens fabricadas, pela imersão em cera de carnaúba.

A dissertação está dividida nos seguintes capítulos: objetivo geral e específicos, revisão bibliográfica, primeiro artigo (Inovação Sustentável: Embalagens Biodegradáveis a partir de Subprodutos de Pitaya e Trigo), segundo artigo (Explorando Novas Possibilidades: Bandejas Biodegradáveis A Base de

Resíduos Agroindustriais com Cobertura Impermeabilizante de Cera de Carnaúba), discussão geral, conclusão e referências.

CAPÍTULO 2 OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Desenvolver, caracterizar e aplicar uma embalagem rígida biodegradável, formulada a partir de amido e incorporada com subprodutos alimentares e cobertura de cera de carnaúba.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obter e caracterizar farinha da casca de pitaya;
- Caracterizar o farelo de trigo;
- Produzir embalagens rígidas biodegradáveis a partir de amido com incorporação de farinha de casca de pitaya;
- Produzir embalagens rígidas biodegradáveis a partir de amido com incorporação de farelo de trigo;
- Caracterizar as embalagens obtidas quanto às propriedades físico-químicas, físicas, mecânicas e termomecânicas, além de análises estruturais;
- Testar a impermeabilização das embalagens com cera de carnaúba;
- Caracterizar as embalagens impermeabilizadas com cera de carnaúba, quanto às propriedades físico-químicas, físicas, mecânicas e termomecânicas, além de análises estruturais;
- Avaliar a aplicabilidade das embalagens no armazenamento de brócolis;
- Analisar as propriedades mecânicas das embalagens ao longo dos dias de acondicionamento dos produtos.

CAPÍTULO 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. EMBALAGENS RÍGIDAS BIODEGRADÁVEIS

A preocupação com a sustentabilidade e com a redução do impacto ambiental tem impulsionado a busca por alternativas sustentáveis no desenvolvimento de embalagens. Nesse contexto, as embalagens biodegradáveis têm despertado grande interesse. Uma das medidas encontradas para a diminuição de custos na fabricação destes produtos é a utilização de resíduos ou subprodutos alimentares na produção. Assim, esta revisão bibliográfica tem como objetivo relatar as pesquisas mais recentes sobre a utilização de subprodutos alimentares na produção de embalagens biodegradáveis, com destaque para os avanços, desafios e oportunidades nessa área. Serão abordados aspectos relacionados às matérias-primas utilizadas, quais processos de produção já consolidados, as propriedades mecânicas, de barreira das embalagens e seu impacto ambiental.

As embalagens plásticas produzidas a partir de derivados do petróleo são mundialmente utilizadas pelo menor custo e durabilidade, além de apresentarem pouca interação com o produto embalado. Contudo, mesmo sendo produzidas em escala global possuem pontos negativos, como o vasto tempo necessário para degradação dos polímeros, o qual tem sido estimado em 500 anos (NCUBE *et al.*, 2020).

A fim de sanar o problema causado pela poluição ambiental do material que não será reciclado e impedir sua deposição sobre a superfície terrestre e marítima, vários esforços têm sido realizados. Nesse sentido, pode-se citar as pesquisas por novos materiais que possuam menor tempo de decomposição e/ou processo de reciclagem mais facilitado.

Entre os polímeros pesquisados pode-se citar os materiais biodegradáveis. As primeiras pesquisas na área do desenvolvimento de uma embalagem de constituição totalmente biodegradável datam do início da década de 1990 que estudou o uso de quitosana em uma matriz de PHA para a fabricação de filmes (WEI *et al.*, 1992). Atualmente são desenvolvidas várias pesquisas para produção de embalagens biodegradáveis, com avaliação de polímeros que apresentam propriedades singulares. Essa grande variação de

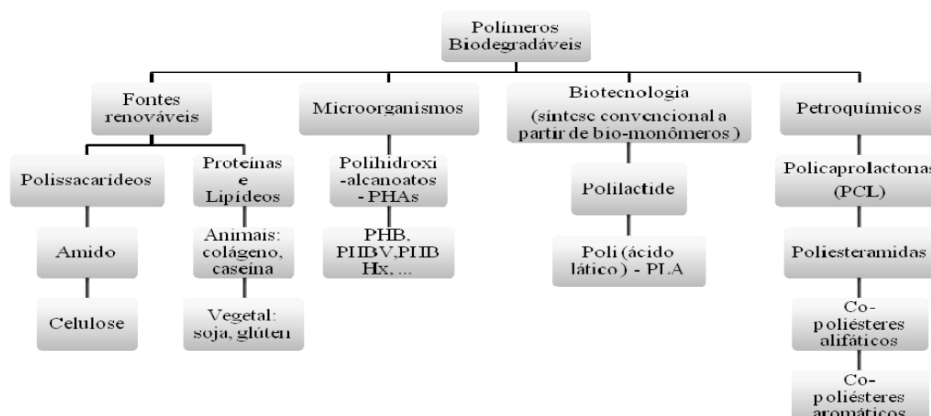
propriedades apresentadas pelas matérias-primas pode gerar embalagens úteis, práticas e menos agressivas ao meio ambiente.

As embalagens biodegradáveis podem ser comumente divididas de acordo com a sua adaptação diante do alimento a ser preservado. Há dois grandes grupos de pesquisas nessa área, as embalagens rígidas e as embalagens flexíveis/maleáveis. Entre as embalagens maleáveis há uma diferenciação de filmes e revestimentos, sendo que filmes são estruturas separadas e independentes, fabricadas e aplicadas em alimentos ou entre camadas de alimentos participantes de um sistema. Por sua vez, revestimentos são normalmente coberturas líquidas aplicadas diretamente aos alimentos (SAHRAEE *et al.*, 2019).

As embalagens biodegradáveis flexíveis têm seu principal componente de origem polissacarídica, lipídica ou proteica. São utilizadas principalmente em frutas e legumes frescos, laticínios, produtos cárneos e peixes, com resultados satisfatórios para aumento da vida de prateleira dos produtos (MOHAMED; EL-SAKHAWY; EL-SAKHAWY, 2020).

Por sua vez, em embalagens biodegradáveis rígidas, a divisão pode ser realizada de acordo com a sua fonte de obtenção. Assim, podem ser polímeros extraídos diretamente de biomassa ou de fontes renováveis, polímeros produzidos por síntese química clássica e bio-monômeros e polímeros obtidos de organismos naturais ou geneticamente modificados (IVANKOVIĆ *et al.*, 2017). A divisão entre as fontes utilizadas para produção de embalagens biodegradáveis pode ser observada na Figura 1.

Figura 1 - Divisão apresentada entre as fontes que compõem os polímeros biodegradáveis. Fonte: Adaptada de (Brito *et al.*, 2011).



As características de formação, propriedades de cada substância e dificuldades de uso de cada material para produção de embalagens rígidas serão discutidas na seção seguinte.

3.1.1. Embalagens rígidas a partir de fontes renováveis.

Conforme ilustrado na Figura 1, no grupo dos polímeros extraídos de biomassa ou fonte renováveis estão contidos os produtos obtidos de plantas e animais (domésticos ou marinhos). Neste contexto tem-se o amido, a celulose, a quitina, a gelatina, proteínas do leite, como caseína ou *whey* e a proteína de soja. O amido a ser utilizado pode ser extraído de fontes como, batata (*Solanum tuberosum*), milho (*Zea mays*), mandioca (*Manihot esculenta*), arroz (*Oryza sativa*), entre outros (TAGLIAPIETRA *et al.*, 2021). O segundo grupo, formado a partir da síntese convencional de bio-monômeros, contém o ácido polilático (PLA), substância extraída do ácido láctico. No terceiro grupo, proveniente de microrganismos, tem-se como exemplo a substância chamada de polihidroxialcoanato (PHA).

O amido, em comparação as outras substâncias, apresenta menor custo e possui a capacidade de ser processado com equipamentos já utilizados para outros polímeros. Por outro lado, o fato de sua molécula possuir grupamentos hidroxila favorece elevada propensão à hidrofilia (JIANG *et al.*, 2020). A celulose, nos bioplásticos, age como um preenchedor da matriz polimérica e atua como um reforçador ao possuir alta força específica. Possui baixa densidade, é proveniente de fonte renovável e seus compostos são atóxicos, pois são derivados de fontes naturais. Entretanto, apresenta algumas desvantagens como sua tendência a absorver umidade e possuir baixa compatibilidade com algumas matrizes de polímeros (THOMAS *et al.*, 2021).

A quitina é um polissacarídeo natural, presente em conchas, exoesqueletos de insetos e parede celular de fungos. Possui um ponto diferente dos materiais já citados, pois representa um resíduo de indústrias de processamento de pescados, ou seja, atualmente muito dessa substância é subaproveitada. Apresenta uma característica diferenciada, que é o fato de ser insolúvel, sendo necessário ser desacetilada e transformada em quitosana para modificar essa condição (SINGH; SHITIZ; SINGH, 2017).

As proteínas são macromoléculas naturais provenientes de plantas ou animais, normalmente são biocompatíveis e de fácil processamento para utilização em embalagens (DEFRATES *et al.*, 2018). Entretanto, possuem algumas características que dificultam o seu uso, como a necessidade de descompressão para derretimento e a imiscibilidade com outros polímeros, além de um custo mais elevado que os materiais já citados (IVANKOVIĆ *et al.*, 2017). A estrutura da proteína é especialmente importante, porque determina a capacidade de interação entre si e com os outros componentes pelas interações eletrostáticas, hidrofóbicas e ligações de hidrogênio. Essas interações podem fornecer propriedades mecânicas ou de barreira diferentes, como por exemplo, o caráter mais ou menos hidrofóbico dos aminoácidos pode propiciar maior resistência ao vapor d'água. Por outro lado, os materiais de embalagem devem ter certas características para garantir um uso adequado e satisfatório (ECHEGARAY *et al.*, 2023).

Os polímeros produzidos por síntese química convencional de biomonômeros têm no ácido poliglicólico e ácido polilático suas principais representações. Esses biopolímeros são exemplos de termoplásticos derivados de produtos da agricultura. O ácido poliglicólico, produzido a partir de ácido glicólico, um produto da fermentação de açúcares, apresenta vasta utilização em produtos biodegradáveis voltados para sutura cirúrgica. O ácido polilático, produzido a partir de ácido láctico, que é uma fonte de fermentação microbiana, possui várias propriedades atrativas para utilização em embalagens, como alta resistência, rigidez e boa capacidade térmica, sendo facilmente processado (ELSAWY *et al.*, 2017). Entretanto, apresenta baixa capacidade de suportar impactos, sendo necessário ser reforçado com outros materiais para desenvolver uma embalagem resistente a choques (SÁNCHEZ *et al.*, 2019; SANTOS *et al.*, 2021; TAWAKKAL; CRAN; BIGGER, 2016).

Os polímeros obtidos de organismos naturais ou geneticamente modificados têm como principais representantes o polihidroxialcoanato e o polihidroxibutirato, produzido por microrganismos como fonte de energia. São poliésteres naturais formados por até seis ácidos hidroxi-alquinóicos. São insolúveis em água, mas solúveis em clorofórmio, possuem boa força de tensão e certa resistência a umidade e vapor de água. Entretanto, apresentam uma

desvantagem econômica, devido ao alto custo ligado a produção fermentativa e a baixa produtividade do processo (RAZA; ABID; BANAT, 2018).

Todos esses materiais que compõem a matriz polimérica de uma embalagem biodegradável possuem uma característica negativa quando comparados aos materiais de fontes não-renováveis: o custo. Tal fato ainda representa um impeditivo ao avanço dessa tecnologia. O custo não está totalmente ligado apenas ao valor da matriz do polímero biodegradável, mas também ao desenvolvimento de equipamentos necessários para processar esse tipo de material (ELSAWY *et al.*, 2017). Na busca para reduzir custos de produção, pesquisas têm sido desenvolvidas sobre o reaproveitamento de resíduos de indústrias. Essa reutilização de compostos apresenta funcionalidades como a diminuição do volume de lixo produzido pelas indústrias diariamente, uma possível aplicação para resíduos que provavelmente se tornariam dejetos e a melhoria das propriedades dos materiais.

3.1.2. Aproveitamento de resíduos na fabricação de embalagens biodegradáveis

A crescente demanda pela utilização de embalagens que não agridam o meio ambiente tem aumentado a cada ano. O desenvolvimento de pesquisas sobre embalagens biodegradáveis permite elucidar algumas características, como sua força de tensão e propriedades termomecânicas. Junto a isso, pesquisas também indicam que a utilização de reforço nos polímeros biodegradáveis pode torná-los competitivos perante aos polímeros sintéticos (SANTOS *et al.*, 2021). Nesse aspecto as fibras naturais têm sido avaliadas como compostos reforçadores que podem ser utilizados para melhorar as propriedades de barreira, diminuir custos e alcançar um patamar singular de biodegradabilidade, além de melhorar as propriedades mecânicas. Porém algumas substâncias, dependendo da sua composição, podem apresentar efeitos não desejáveis, como a facilidade em absorção de umidade (SAENHIRUNWATTANA; NOOMHORM; RUNGSARDTHONG, 2014^a; TAWAKKAL; CRAN; BIGGER, 2016). Essas fibras naturais podem ser obtidas a partir de resíduos industriais provenientes da agricultura ou de outro tipo de produção, como por exemplo industriais têxteis (BHOWMIK *et al.*, 2021).

A fibra de ramie (*Boehmeria nivea* (L.) Gaud.) foi utilizada, em uma matriz de PHA, na porcentagem de 10% com 2 tipos diferentes de maceração, química e microbiológica. A maceração química indicou ser mais efetiva para remover a hemicelulose, celulose e a diminuir a dureza das fibras. Em contrapartida, a maceração microbiológica apresentou fibras menos resistentes e com menor qualidade. Na aplicação em embalagens os resultados foram diferentes entre os dois tipos de maceração, mas semelhantes em relação as propriedades de tensão (Angelini, *et al.*, 2015).

A curauá (*Ananas erectifolius*) foi avaliada como reforço em uma embalagem rígida de polibutileno succinato. A curauá é uma bromélia, também conhecida como “abacaxizinho”, cultivada na região amazônica e seu uso já foi testado em peças de carros, roupas e medicamentos. As amostras foram investigadas de duas formas, na primeira as concentrações utilizadas foram entre 10 a 30% de fibra de curauá, com comprimento da fibra fixado em 3 cm, após isso, uma segunda composição foi testada, com concentração fixada em 20% de fibra e comprimento variando entre 1 e 4 cm. Os resultados indicaram que a adição de 20% da fibra de curauá ao biopolímero formou uma embalagem de microestrutura mais homogênea. Porém, foi a concentração de 30% da fibra com 3 cm de comprimento que apresentou as melhores propriedades mecânicas. Por sua vez, quanto ao comprimento da fibra, a dimensão ótima foi entre 1 e 2 cm. Essa pesquisa também indicou que o composto seria seguro para aplicação em embalagens rígidas (FROLLINI *et al.*, 2015).

A noz pecan (*Carya cathayensis* Sarg), nativa do sul dos Estados Unidos e norte do México, possui uma casca cujo volume representa de 40 a 50% da noz total, fração eliminada ao longo do seu processamento. Devido ao volume produzido, a eliminação da casca pode causar poluição ao meio-ambiente. Esse fato a torna uma ótima fonte de resíduo para reforço em embalagens, sendo testada em uma série de estudos. Em um deles foi incorporada em uma matriz de amido de milho, nas porcentagens de 5%, 10% 15% e 20%, com 2 tratamentos, em água subcrítica e aquecido a 200°C por 15 min. O tratamento em água subcrítica foi eficaz para remover a hemicelulose da casca de noz. A melhor porcentagem foi a de 20% de casca, que apresentou valores

semelhantes ao poliestireno expandido (EPS) com melhores propriedades de flexão (YANG *et al.*, 2015).

Em outro estudo, a noz pecan foi avaliada como reforçador de um biocomposto em uma matriz de ácido polilático (PLA). Os pesquisadores investigaram três tipos de formulações diferentes, uma somente com ácido polilático (como controle), duas concentrações (5 e 7,5%) de casca de noz tratada na matriz do PLA e as mesmas duas concentrações de casca de noz não tratada. O tratamento consistiu na moagem da casca de noz e utilização das partículas de tamanho entre 150 e 180 μm , obtidas por peneiração. Posterior ao processo de peneiração, foi realizado o método de extração de Soxhlet, para remoção de impurezas (lipídios, graxa, taninos e lignina) para facilitar a interação com a matriz. Os biocompostos produzidos com a casca de noz tratada apresentaram melhores valores de densidade, módulo de flexura, força de impacto, módulo de Young e cristalinidade. Entretanto, o composto com a casca de noz, tratada ou não, demonstrou uma pequena diminuição na estabilidade térmica quando comparado com o PLA puro. Enquanto as amostras de PLA puro suportaram 362^o C, as amostras com o reforçador biológico suportaram temperaturas entre 348^o e 359^oC antes da degradação (SÁNCHEZ *et al.*, 2019).

A casca de noz pecan também já foi utilizada em conjunto com a casca de pinhão, juntamente com amido de mandioca. As partículas das cascas de noz e pinhão possuíam tamanho aproximado de 346 μm e 155 μm , respectivamente e foram adicionadas na matriz na proporção 30/70. Os resultados mostraram que ambos os resíduos melhoraram a resistência a capacidade de absorção de água, mas não apresentaram diferença significativa nas propriedades mecânicas, com exceção da casca de noz pecan que mostrou características negativas de flexão. Sobre essa fibra foi possível afirmar que o maior tamanho das partículas resultou em amostras mais heterogêneas. Os autores relataram que tais produtos são promissores para obtenção de embalagens de uso único e descarte rápido (ENGEL *et al.*, 2020).

A fibra de cortiça como fonte de celulose foi estudada em algumas oportunidades. Na primeira, foi aplicada em uma embalagem produzida com amido de batata e outros tipos de amido (batata, milho, tapioca e chayotextle, uma variação de chuchu). Os diferentes tipos de amido não apresentaram

diferença significativa nas propriedades analisadas, entretanto as condições de umidade relativa no armazenamento afetaram as propriedades mecânicas, que valores maiores em umidades maiores. A biodegradabilidade foi alterada pela composição das amostras, sendo menor quando maior a quantidade de fibra de celulose foi adicionada (PALMA-RODRÍGUEZ *et al.*, 2016).

Em um segundo estudo foi utilizada a fibra de nanocelulose (CNF) extraída da cortiça, incorporada em uma matriz de PLA, juntamente com N-Metil-2-pirrolidona, 4-Dimetilaminopiridina e anidrido acético. Os resultados indicaram que os nanocompósitos de PLA/CNF apresentaram melhores propriedades quando comparadas com o PLA puro. Os resultados da microscopia ótica e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) revelaram que a inclusão de CNFs resultou em uma maior taxa de cristalização para o PLA. Além disso, a adição das CNFs modificadas melhorou notavelmente o comportamento espumante do PLA, resultando em um maior poder de expansão da matriz e maior rendimento do material (Palma-Rodríguez *et al.*, 2016).

A fibra de cortiça também foi avaliada em conjunto com a fibra de ervilha (tamanho aproximado de 500 μm), que foram incorporadas em concentrações de 10, 20 e 30%, em uma mistura polimérica a base de PHA, acetil tributílicitrato e carbonato de cálcio. As amostras produzidas com até 30% de fibras aumentaram o módulo de elasticidade, porém, reduziram a força de tensão e flexão, ou seja, o produto desenvolvido apresentou menor elasticidade e maior rigidez. Os autores ainda relataram a importância da valorização dos resíduos alimentares na produção de compósitos sustentáveis (CINELLI *et al.*, 2019).

Por fim, a fibra de cortiça foi utilizada em outro estudo como reforço em uma matriz de PLA. A cortiça passou por um processo de moagem em moinho de esferas para extração da nanocelulose (CNF). Os resultados reológicos indicaram que os nanocompostos de PLA/CNF melhoraram as propriedades de cristalização e derretimento comparadas com o PLA puro. Os resultados do microscópio ótico e do DSC revelaram que a inclusão de CNFs resultou em maior taxa de cristalização para o PLA. Além disso, a adição de CNFs modificadas, melhorou notavelmente o comportamento espumante do PLA (Ren *et al.*, 2022b).

Palhas, de diversos grãos, já foram amplamente citadas na literatura como excelentes fontes de reforço. A palha do trigo, foi testada no formato de palha e papel kraft obtido da polpa da palha foram misturados, nas proporções 100/0, 80/20 e 60/40, e moldados para obtenção de uma embalagem flexível. O material obtido possuiu maior valor de tensão, menor de flexão, maior peso e melhor biodegradabilidade quando comparado ao EPS. Os autores ainda citam que pela primeira vez foi possível produzir um material plano e fino, de palha de cereal, com características físicas e mecânicas adequadas e biodegradável (CURLING *et al.*, 2017).

A palha do milho foi avaliada como matéria-prima para obtenção de biopolióis. O material foi cortado em tamanhos de 0,3 a 0,6 mm e sofreu liquefação, sendo o biopoliol resultante incorporado ao amido de batata. As amostras com os biopolióis mostraram resultados melhores no módulo de *Young*, força de tensão e biodegradabilidade quando comparados com a amostra controle. Os autores destacaram que esse produto pode representar uma solução para aplicação em bioplásticos (BRIONES *et al.*, 2020).

A palha de arroz também foi utilizada, em três estudos. No primeiro foram utilizadas porcentagens que variaram de 0 a 60% em uma embalagem de amido de mandioca. De acordo com os resultados, houve aumento da densidade e redução da capacidade de absorção de água de acordo com o aumento da concentração de palha de arroz. O aumento da concentração de palha de arroz também reduziu a habilidade de expansão das bandejas, porém melhorou as propriedades de flexão (60% de palha de arroz). Os autores ainda destacaram que para melhorar a resistência a umidade são necessários mais estudos sobre o tema (SPADA; JASPER; TESSARO, 2020)

Em um segundo estudo, partículas de 16,59 μm foram adicionadas em uma matriz de polibutirato (PBAT) e polibutileno succinato (PBS), em concentrações de 40%. O biocompósito apresentou maiores valores de *stress* e *strain at break* na tensão, juntamente com o seu módulo de *Young*, sendo adequado para a fabricação de produtos moldados como bandeja, lancheira e canudo (YAP *et al.*, 2020).

Por fim, a palha de arroz foi utilizada na forma de cinzas, como reforço em uma matriz de amido de mandioca. As partículas das cinzas possuíam tamanho

até 0,6 mm e porcentagens utilizadas foram entre 20 a 60 %. Os resultados mostraram que a adição de 20 a 40% de cinzas melhorou as propriedades de tensão e flexão. Entretanto, as bandejas com cinzas mostraram piores resultados para densidade, estabilidade termal e resistência a água (DONATI; SPADA; TESSARO, 2023).

Fibra de dendê, com aproximadamente 180 μm , quitosana, com 150 μm de tamanho médio, juntamente com azeite de dendê, em porcentagens entre 9-15%, 0-6% e 0-15% respectivamente, foram inseridos na produção de uma bandeja de amido de mandioca. Os resultados indicaram que a adição de quitosana foi essencial para diminuir a densidade das amostras, porém essa propriedade ainda foi maior que na amostra de EPS. A força de flexão e resistência a água aumentou ao adicionar a fibra e o azeite de dendê. A amostra com 13% de fibra de dendê e 10% de azeite de dendê foi a que apresentou melhores resultados gerais (KASEMSIRI *et al.*, 2017).

Um prensado de sementes de gergelim, obtido a partir da extração do óleo, foi moído em tamanho médio de 608 μm e avaliado como reforçador em uma matriz de amido de mandioca (proporções de 0/100, 10/90, 20/80, 30/70 e 40/60). As amostras desenvolvidas com 20% ou mais do prensado de sementes de gergelim apresentaram características de embalagens semelhantes ao EPS. De acordo com os autores, apesar de ainda precisar de melhorias, esse material pode ser uma alternativa ao EPS no acondicionamento de alimentos com baixo índice de umidade (MACHADO; BENELLI; TESSARO, 2017).

Fibras de pupunha, de tamanho médio de 1,6 mm, foram retificadas e incorporadas em uma matriz de poli (butileno adipato co-tereftalato) nas proporções de 0/100, 10/90, 20/80 e 30/70. A proporção de fibra em 30% apresentou melhores resultados nas propriedades térmicas e mecânicas, confirmado pelo aumento do módulo de *Young* (PEREIRA DA SILVA *et al.*, 2017).

A banana da terra foi utilizada em uma série de estudos. No primeiro, em forma de farinha (3%, 6%, 9%, 11%, 13,5%, 14,5%) e juntamente com fibra de madeira (14,5%, 11,5%, 9,5%, 6,5% 3,5% e 1%), incorporadas em uma matriz de amido de batata e de chayotextle. A adição tanto da banana da terra quanto da fibra de madeira melhorou o caráter hidrofóbico do biocomposto. As amostras

desenvolvidas também apresentaram melhor resistência ao calor e maior densidade que a amostra controle (VARGAS-TORRES *et al.*, 2017a).

No segundo estudo a banana da terra nas formas de amido e farinha, foram incorporadas com amido e farinha extraídos de chayote (*Sechium edule Sw.*). A banana, em farinha e amido, foi adicionada em concentrações entre 0 e 18%, e os resultados mostraram que ao aumentar o percentual da fibra da banana houve aumento na tensão e no módulo de *Young*. A resposta mais significativa em relação a adição de fibras ocorreu para os parâmetros de densidade e capacidade de absorção de água (ROMAN-BRITO *et al.*, 2020).

No terceiro estudo, a banana foi utilizada na forma de farinha incorporadas com fibras de cana-de-açúcar (tamanhos entre 30 a 70 mesh) em porcentagens entre 5 a 10%. As fibras de cana-de-açúcar melhoraram a característica hidrofóbica das embalagens, porém a farinha de banana da terra piorou essa característica. Além disso, as fibras de cana-de-açúcar melhoraram a tensão das amostras, sendo que a sua concentração foi mais importante que o tamanho das fibras (ROMÁN-MORENO *et al.*, 2020).

A fibra de sisal também já foi investigada em dois trabalhos. No primeiro, a fibra de sisal (6mm de tamanho médio) foi utilizada em uma formulação com amido de milho modificado (de termoplástico industrial, oxidado com sulfato de cobre e peróxido de hidrogênio e termoplástico industrial oxidado). O compósito com a fibra de sisal e o amido termoplástico oxidado apresentou melhores características gerais para força de tensão, pela eliminação da cristalização e formação de uma estrutura uniforme entre o amido e a fibra (SUN *et al.*, 2021).

No segundo estudo, a fibra de sisal (20g, comprimento de 5 mm e diâmetro próximo a 60 μm), foi homogeneizada com amido de milho (50g) e carbonato de cálcio (CaCO_3) em três concentrações (5%, 10% e 15%) como agente espumante em busca de melhoramento das propriedades de performance do material na produção das embalagens. Os resultados mostraram que a adição de 5% do carbonato de cálcio formou células mais uniformes e densas, além disso, apresentou aumento do valor das propriedades mecânicas em até 156% e reduziu a capacidade de absorção de água (ZHANG *et al.*, 2017).

Escama de peixe bruta e calcinada (500°C por 5h e 700°C por 3h), na proporção de 10%, foi avaliada em uma matriz de amido de mandioca. A amostra com a escama calcinada por menor tempo em maior temperatura apresentou melhores propriedades mecânicas, provavelmente pelo seu maior conteúdo de cálcio e menor de proteínas. Os autores relataram que a escama de peixe pode ser utilizada como um reforçador eficaz na produção de compósitos seguros ao meio-ambiente (CHIARATHANAKRIT; RIYAJAN; KAEWTATIP, 2018).

Casca de camarão, de ovo e carbonato de cálcio comercial foram adicionados (0, 5, 10, 15 e 20%), em uma matriz de amido de mandioca. A adição de casca de camarão propiciou uma estrutura mais densa, com prejuízos na capacidade de expansão do amido. A melhor adesão entre amido e preenchedor foi relatada na casca de ovo, mais precisamente na porcentagem de 10%, que apresentou menor densidade e melhor impacto *Izod* (KAEWTATIP; CHIARATHANAKRIT; RIYAJAN, 2018).

Fibras de kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) foram analisadas como reforço em dois estudos, ambos com matriz polimérica de PLA. No primeiro foi analisada uma comparação entre fibras de kenaf (tamanho aproximado 920 μm x 100 μm) tratadas e não tratadas com reagente alcalino. As fibras, em suas duas formas, juntamente com timol (0, 5 e 10%), foram adicionadas em concentrações de 30% em uma matriz polimérica de PLA. A adesão entre as fibras e o amido foi menor nas amostras que continham timol, porém este melhorou a estabilidade térmica da matriz. Além disso, as amostras com fibras tratadas apresentaram melhores resultados. No geral, as amostras com fibras tratadas e timol apresentaram resultados ligeiramente maiores de tensão e dados de degradação semelhantes, quando comparadas a amostra produzida somente com PLA (TAWAKKAL; CRAN; BIGGER, 2018).

No segundo estudo, o pó das fibras (tamanho médio 100-150 μm) foi adicionado em concentração de 20% ao PLA, e um agente espumante de nome azodicarbonamida (ADC) (1 a 5%). A densidade diminuiu com o aumento do ADC, porém reduziu os valores de tensão. Sobre o kenaf/PLA foi relatado a formação de uma mistura com boa homogeneidade, sendo a melhor composição na amostra com 3% de ADC e processada a menor temperatura (entre 160-175°) (ABU HASSAN *et al.*, 2020).

Fibras provenientes de casca de abacaxi (*Ananas comosus*), tamanho médio 106 μm , foram incorporadas em uma matriz de amido de mandioca, em porcentagens variando entre 0 e 20%. As bandejas produzidas tiveram boa aparência, boa expansão e distribuição homogênea das fibras, sendo a porcentagem de 5% de fibras a que obteve melhores resultados de dispersão das fibras na matriz e menor densidade. Entretanto todas as amostras, com algum percentual de fibra, apresentaram alta capacidade de absorção de água e a fibra não melhorou a resistência e a força de rompimento das embalagens (CABANILLAS *et al.*, 2019).

Bagaço de cana-de-açúcar e pele de aspargo, em partículas de 180 e 300 μm , foram misturados, em porcentagens variando entre 0 e 40% a uma matriz polimérica de amido de batata doce. Todas bandejas produzidas apresentaram maior densidade e espessura que as amostras de EPS. As amostras de bagaço de cana-de-açúcar apresentaram estrutura mais compacta e menos poros em relação as bandejas de pele de aspargo ou sem qualquer fibra. As concentrações de até 10% de bagaço de cana-de-açúcar e 5% de pele de aspargo foram as que obtiveram melhores resultados gerais. Entretanto, de acordo com os autores, esse biomaterial deve ter seu uso restringido a produtos leves e com baixa liberação de umidade (CRUZ-TIRADO *et al.*, 2019).

O bagaço da cana-de-açúcar foi novamente estudado em mais duas pesquisas. No primeiro com fibras medindo entre 0,40mm e 1,46 mm, sendo incorporado em amido catiônico, bicarbonato de sódio (NaHCO_3) como agente espumante e álcool polivinílico (PVA). A relação utilizada entre os compostos foi de 7:2:1 para a fibra, o amido catiônico e o álcool polivinílico, respectivamente, e essa mistura foi aquecida em um micro-ondas por diferentes tempos. A porosidade do composto foi investigada e os resultados mostraram que quanto maior a concentração do agente espumante e quanto mais tempo no micro-ondas, mais poroso o material ficou.

No segundo estudo, foi utilizado o bagaço de cana (SCB) e a casca de banana (BP) com partículas de tamanhos de 105,3 μM e 326,5 nM, respectivamente. Essas fibras em razões de 1:1, 1:9 e 9:1 foram misturadas com goma-guar e posteriormente foi utilizada uma impressora 3D para formar a embalagem. A mistura de 1:1 apresentou amostras com melhor aplicabilidade,

mas a mistura 9BP:1SCB também foi passível de ser impressa. O estudo ainda relata a importância de buscar resultados para melhorar a capacidade de absorção de água nos resíduos agroindustriais (HUANG; ZHANG; LIU, 2021; NIDA; MOSES; ANANDHARAMAKRISHNAN, 2022).

Fibra de algodão proveniente de resíduos foi avaliada em dois estudos. No primeiro, as partículas possuíam 4mm de tamanho médio e a porcentagem utilizada foi de 10%, em uma matriz mista de PLA e amido de milho (adicionado à matriz, cobrindo as fibras e em ambos). As bandejas com fibras de algodão apresentaram melhores resultados gerais que aquelas produzidas somente com PLA e amido. Além disso, o amido adicionado à matriz e às fibras mostrou melhor estabilidade termal e microdureza (DE MACEDO; DOS SANTOS; DOS SANTOS ROSA, 2019).

No segundo estudo as fibras de algodão foram usadas como matéria-prima para obtenção de fibras e microfibras de celulose. O amido utilizado foi de batata e as fibras e microfibras foram adicionadas em porcentagens de 0 a 5%. No geral, as amostras com as fibras de algodão apresentaram melhores propriedades mecânicas e capacidade de absorção de água do que as amostras com as microfibras. Além disso, essas embalagens mostraram maior densidade e uma estrutura mais compacta. Os autores relataram que as amostras com 5%, tanto de fibra quanto de microfibras, podem ser utilizadas para substituir as embalagens em EPS (BERGEL; ARAUJO; SANTANA, 2021).

Engaço de uva *Cabernet Sauvignon* foi utilizado em três estudos. O primeiro, através de delineamento experimental, onde as partículas possuíam tamanho variando entre 0,18mm e 0,85mm e as porcentagens entre 1 e 30%, em amido de mandioca. A melhor amostra desse estudo foi utilizada em outra pesquisa que analisou também a aplicabilidade e a biodegradabilidade. A adição do engaço melhorou a resistência a umidade e a hidrofobia. A melhor formulação foi a que utilizou 13,6% de engaço de uva com tamanho menor que 0,18mm. Esta amostra apresentou menor densidade e boas propriedades mecânicas gerais, porém baixa resistência a umidade (ENGEL; AMBROSI; TESSARO, 2019a, 2019b).

No terceiro estudo, o engaço de *Cabernet Sauvignon* foi misturado ao engaço da uva Isabel em uma proporção de 1:1, onde foram realizados quatro tratamentos (controle, tratado quimicamente com uma solução de 10% de NaOH, autoclavado e autoclavado seguido pelo tratamento químico com 10% de NaOH). A essas fibras foi adicionado amido e casca de mandioca, onde a proporção final amido/fibra foi 37,2% de amido e 0% de fibra (controle) e 28,6% de amido e 7,2% de fibra. Os resultados mostraram que a embalagem com amido, casca de mandioca e o tratamento de autoclave do engaço de uva apresentou melhor aplicabilidade em bolo de cenoura. Ainda foi relatado que tomates cereja acondicionados nestas embalagens apresentaram menor perda de peso, maior firmeza e constância de pH durante toda análise, quando comparadas a embalagem de EPS (ENGEL; LUCHESE; TESSARO, 2022).

Resíduo de cervejaria, na proporção de 20, 40, 60 e 80%, gelatina e quitosana, na concentração de 60% do resíduo, foram incorporadas em amido de batata, sendo ainda imersas em cera de abelha. Todas amostras apresentaram melhor força de flexão e rigidez que o EPS, porém, após a análise de capacidade de absorção de água, esses valores diminuíram nas amostras não imersas em cera de abelha. A amostras imersas em cera de abelha e com a presença de quitosana apresentaram resultados mais próximos ao EPS, porém ainda com diferença significativa (0% de absorção de água no EPS e aproximadamente 6% na amostra imersa em cera de abelha). Os autores reforçam que é possível o processamento de um material de baixo custo e biodegradável e que este pode ser usado em aplicações onde se utiliza o EPS (FERREIRA, A. *et al.*, 2019).

A pele de amendoim (*Arachis hypogaea*) em partículas de 2 mm foi adicionada, com porcentagens variando entre 2 e 40% em relação ao amido de mandioca, para produção de bandejas biodegradáveis em um estudo de modelo experimental fatorial. A pele de amendoim demonstrou uma grande contribuição para diminuir a capacidade de absorção de água, sendo a melhor formulação com 23,71% do resíduo. Os autores destacaram que a casca de amendoim é um aditivo com alto poder para desenvolvimento de embalagens com hidrofília diminuída (MACHADO; BENELLI; TESSARO, 2019).

Um segundo estudo, baseado nas informações prévias de MACHADO; BENELLI; TESSARO, (2019), utilizou novamente a pele de amendoim, em partículas de 550 μm na concentração de 24% em relação ao peso do amido de mandioca. A adição de pele de amendoim resultou em amostras com menos espaços ociosos, maior densidade, menor hidrofília e menor deformação a tensão, porém sem diferenças significativas na força de tensão e módulo de elasticidade. Além disso, os autores relataram a alta interação entre o amido e resíduo de amendoim, que resultou no aumento da densidade e hidrofobia, devido provavelmente à redução dos grupos OH ligados à água (MACHADO; BENELLI; TESSARO, 2020).

Em outra pesquisa foi avaliado o bagaço de batata na matriz de PLA, sendo que tal resíduo é obtido da extração do amido de batata, gerando em média 0,75 tonelada de polpa de batata para cada tonelada de amido puro produzida. Foram testadas três formulações diferentes que continham o bagaço de batata (concentrações de 5, 10 e 20%) Nas concentrações utilizadas não houve agregação de reforço na matriz polimérica, porém seu uso não afetou negativamente as propriedades mecânicas da embalagem. Logo, o uso de bagaço de batata pode representar uma estratégia para diminuir o custo da produção de embalagens rígidas biodegradáveis (Righetti *et al.*, 2019).

Outro resíduo da industrialização deste tubérculo, resíduo gerado durante a seleção de batatas cozidas para industrialização, foi utilizado para obtenção de uma bandeja com adição de três concentrações (10, 15 e 20%) de fibra de aveia e goma xantana. Os resultados mostraram que a capacidade de absorção de água foi maior na concentração mais alta de fibra (20%), sendo que essa concentração também demonstrou possuir a maior resistência. Os autores relataram que esse produto pode ser uma excelente opção a polímeros sintéticos, promovendo uma solução ao problema de poluição e utilização de derivados do petróleo (RODRIGUES *et al.*, 2020).

Farinha de linhaça, com partículas menores que 0,25 mm e seus óleos, maleinizado e epoxidado, foram utilizados em uma matriz de PLA, para produção de embalagens sustentáveis para alimentos. A farinha de linhaça foi mantida em concentração de 30%, enquanto os óleos foram adicionados em porcentagens variando entre 2,5 e 5%. A incorporação da farinha de linhaça e óleos resultou

no desenvolvimento de embalagens mais rígidas e com melhor estabilidade térmica, causando um efeito plastificante na matriz de PLA. Os produtos desenvolvidos podem ter uso em bandejas, copos ou ainda cápsulas para alimentos (AGÜERO *et al.*, 2020).

A fibra de jacinto-de-água, ou aguapé, (*Eichhornia crassipes*) foi utilizada em duas situações. Na primeira adicionada em amido de mandioca e imersas cera de abelha. As partículas possuíam tamanho médio de 250µm e foram adicionadas em percentuais variando de 0 a 10% de fibra em amido. A amostra com 5% de fibra de aguapé foi a que obteve melhores propriedades mecânicas, melhor resistência a umidade, além de células mais uniformes. Além disso, a cera de abelha melhorou a hidrofobia das amostras, mantendo a baixa solubilidade e o formato após imersão em água (CHAIREH; NGASATOOL; KAEWTATIP, 2020).

No segundo estudo foi avaliada em uma matriz de álcool poli vinílico (PVA) juntamente com amido de mandioca. A planta utilizada foi colhida do rio, sendo utilizada somente a parte do pecíolo, seca em estufa a 50 °C por 24 h e moída até atingir 60 mesh, sendo incorporada aos polímeros em porcentagens entre 5 a 20%. Os resultados mostraram que a adição em quantidades baixas dessa fibra (10%), melhorou as propriedades físicas e mecânicas, porém em porcentagens maiores não foram obtidos bons resultados. A adição do PVA também afetou positivamente a compressibilidade, densidade e capacidade de absorção de água (NUGROHO *et al.*, 2022).

Resíduo de feltro foi usado como reforço em uma matriz de termoplástico (TPS), formado por amido de milho e policaprolactona (PCL). O feltro foi utilizado em concentrações de 10 a 40%. Os resultados mostraram que a amostra com 30% de feltro apresentou melhor força de tensão e de flexão, com 4 vezes maiores que o controle, sem o feltro. Segundo os autores, as amostras também se mostraram com moderada hidrofobia, sendo potenciais produtos para o desenvolvimento da “tecnologia verde” (BEHERA *et al.*, 2021).

A fibra de coco foi incorporada, como reforçadora, em concentrações de 2,7 a 10,9% em uma base de TPS e PLA (60:40) para o desenvolvimento de embalagens moldados por injeção. Nesse estudo foi observado que os compostos mostraram melhor resistência e dureza que as amostras sem fibra,

além de menor elasticidade. Entretanto, o resultado foi positivo com propriedade mecânicas mais adequadas que as amostras sem o acréscimo da fibra de coco (CHOTIPRAYON; CHAISAWAD; YOKSAN, 2020).

A polpa de mandioca, um resíduo da extração do amido, foi incorporada no amido do tubérculo, juntamente com PLA. As concentrações utilizadas foram de 40%, 22,11% a 44,22% e 0 a 22,11%, para o PLA, o amido de mandioca e a sua polpa, respectivamente. A polpa de mandioca agiu como um reforço na matriz de amido e PLA, aumentando sua força de tensão e o módulo de *Young*. Os resultados sugerem que a mistura polpa e amido de mandioca juntamente com PLA, podem ser utilizados para fabricar materiais renováveis e biodegradáveis (JULLANUN; YOKSAN, 2020).

Fibras de celulose, foram extraídas de fibras de henequen (*Agavae fourcroydes*), e adicionadas, juntamente com carbonato de cálcio (CaCO_3), a uma matriz de amido de mandioca e PLA. As fibras de celulose foram adicionadas em porcentagens variando de 5 a 10% em amido, sendo essa mistura gelatinizada e 10% dela adicionada aos outros ingredientes para formar a embalagem. Os resultados mostraram que a adição simultânea de PLA, celulose e do CaCO_3 à matriz de amido melhoraram as propriedades mecânicas e resistência a umidade. A melhor embalagem, com características desejáveis para o armazenamento de alimentos, foi obtida com a formulação de 17,5% de CaCO_3 , 12% a 17,5% de PLA e 7 a 8% de celulose. A embalagem desenvolvida apresentou melhores propriedades mecânicas que o EPS, tanto em ambientes secos quanto úmidos, podendo ser uma solução para substituição do EPS (MOO-TUN; IÑIGUEZ-COVARRUBIAS; VALADEZ-GONZALEZ, 2020).

A farinha da casca do café, oriundo do processamento de café, foi avaliada em uma matriz de ácido polilático. O estudo investigou três formulações de biocomposto, uma somente com ácido polilático, outra com 20% de farinha de casca de café e a terceira variando a concentração 20 a 50% de farinha torrada de casca de café (FTCC). A melhor resposta quanto as características mecânicas e de estabilidade termal foi na formulação com 20% da farinha torrada em 80% de PLA, podendo esta ser aplicada em várias utilizações de embalagens rígidas. Essa formulação mostrou um efeito positivo na melhoria mecânica geral e na estabilidade térmica. Além disso, a adição de FTCC levou a uma melhoria

na resistência termomecânica, permitindo que as peças resultantes fossem capazes de suportar temperaturas de até cerca de 60 °C. Esse material pode ser utilizado para produção de copos e pratos, ou embalagens em contato direto com alimentos (ORTIZ-BARAJAS *et al.*, 2020).

A semente de soja foi pesquisada para incorporação em termoplástico (TPS), produzido a partir de amido de milho, policaprolactona e celulose microcristalina. A polpa da soja foi usada em concentrações variadas entre 5 e 25%, mesma concentração utilizada para celulose. Nas análises do material foi observado que os compostos com baixo teor (10%) de resíduos de soja ou celulose apresentaram a maior resistência. A adição dos resíduos também diminuiu a capacidade de absorção de água dos compostos. Além disso, os compostos mostraram alta taxa de biodegradação, perdendo mais de 50% de seu peso após 60 dias (BEHERA; MANNA; DAS, 2022).

Resíduo de seda foi incorporado em uma matriz de glúten de trigo sendo que as partículas da seda possuíam em média 1,3 mm de diâmetro e comprimento entre 750 e 1000 mm. As fibras foram misturadas com o glúten com concentrações variando entre 40 a 60% da base glúten e seda. Os resultados mostraram que os compostos, com 50% de glúten de trigo e 50% de fibra de seda, apresentaram um desempenho superior em termos de resistência, elasticidade e alongamento em comparação com os outros tipos de compósitos. O uso de suco de limão como reticulante natural melhorou a interação entre os componentes. Além disso, os compósitos mostraram alta taxa de biodegradação, dissolvendo-se completamente no solo em apenas duas semanas (BHOWMIK *et al.*, 2021).

O uso de caroço de manga foi avaliado para incorporação em embalagens tendo como matriz o PLA. O caroço da manga pode ser dividido em duas partes, a parte central da semente, ou seja, o núcleo e a parede ou tegumento. Foram testadas quatro tipo de amostras: somente o PLA (controle), formulações com 10 e 20% de tegumento em PLA, formulações com 10 e 20% do núcleo em PLA e uma última formulação com 10% de tegumento, 10% de núcleo e 80% de PLA. Nos resultados foram encontradas cavidades nas amostras do biocomposto, entre as interfaces do PLA e do resíduo de manga. De acordo com os autores, tal resultado foi devido a característica hidrofóbica do PLA e hidrofílica do

resíduo, já sendo esperado, visto que não foi utilizado nenhum tipo de compatibilizante. Apesar da baixa compatibilidade melhorias significativas foram observadas nas propriedades mecânicas e de barreira na formulação com 80% de PLA e 20% do tegumento do caroço, onde foi relatado um aumento de até 38% no módulo de elasticidade. Portanto, os biocompostos produzidos com PLA e tegumento do caroço de manga tem potencial para o desenvolvimento de novas embalagens rígidas para alimentos (LIMA *et al.*, 2021).

Resíduo de semente de girassol prensado (SOPC), resultante da extração do óleo, foi testado como reforço ao ser incorporado em uma matriz de amido de mandioca juntamente com ureia. As partículas eram de tamanho médio de 500 μM e foram testadas concentrações entre 0 e 40% do total de sólidos. A inclusão do prensado de sementes de girassol modificou a estrutura das espumas desenvolvidas, levando a um material mais duro e denso com maior capacidade de absorção de água e cor mais intensa, sua coloração amarelada. A adição de ureia decompôs a produção de gases que agiam como formadores da espuma. Dessa forma, as espumas com SOPC e ureia eram mais flexíveis a deformação do que os outros compostos. A composição que apresentou melhor estrutura com um grande número de células pequenas e uniformes foi a termoprensada a 140° por 5 min (VERSINO; LÓPEZ; GARCÍA, 2021).

Plantas invasoras foram testadas em uma matriz de PHBV. As plantas estudadas foram o capim-amarelo (*Phalaris arundinacea*) e a madressilva (*Lonicera japonica*). As plantas foram secas e moídas em fibras com 100 a 500 μm de diâmetro e 2 a 8 cm de comprimento, posteriormente tratadas com hidróxido de sódio durante diferentes tempos (1, 3 e 5h) e concentrações (2, 6 e 10%), lavadas e secas a 80° até peso constante. As amostras foram fabricadas com as fibras tratadas e não tratadas utilizando as concentrações de 5, 10, 15 e 20%. O efeito do tratamento com NaOH nas propriedades das fibras e dos compósitos foi investigado. Os resultados mostraram que o tratamento foi efetivo para obtenção da máxima aderência entre as fibras e o PHBV. Os compósitos apresentaram desempenho semelhante a plásticos convencionais, com custos reduzidos e maior estabilidade térmica, tornando-se uma alternativa promissora para diversas aplicações industriais (ZHAO *et al.*, 2021).

A grande maioria dos reforçadores utilizados melhoraram as propriedades mecânicas nas embalagens rígidas testadas. Assim, a principal função da embalagem rígida biodegradável que é proteger o material que ela envolve, tem sido pesquisada onde os resultados encontrados têm sido bem positivos. Além das fibras utilizadas como reforçadores existem outras substâncias, as quais podem compor a embalagem. Entre esses materiais estão os plastificantes, utilizados para aumentar o grau de maleabilidade nas embalagens, ou ainda compostos com ação antimicrobiana. Tais compostos são amplamente estudados para utilização em alimentos, pois além da proteção, a embalagem pode apresentar uma função extra, como aumentar a vida útil do produto armazenado. Em busca desse incremento na produção de embalagens biodegradáveis, já foram testados alguns aditivos orgânicos a fim de manter o frescor do produto por um tempo maior.

3.2. ADITIVOS

Em conjunto com as matrizes utilizadas para compor as embalagens biodegradáveis pode ser incluído outras substâncias, denominadas de aditivos, que propiciarão ao material-base algumas características almejadas. As substâncias pertencentes a esse grupo podem atuar como plastificantes, como o glicerol, sorbitol, entre outros. Plastificantes são pequenas moléculas de baixa volatilidade, aplicadas a biopolímeros a fim de modificar as suas propriedades funcionais como elasticidade, rigidez e propriedades mecânicas. Essa adição reduz o número de reações polímero-polímero, o que permite que o material sofra deformação, sem haver ruptura (MEKONNEN *et al.*, 2013; SUDERMAN; ISA; SARBON, 2018).

Conforme citado anteriormente, uma das características negativas das matrizes poliméricas biodegradáveis é a sua fragilidade. Nesse aspecto os plastificantes são utilizados para reduzir a rigidez do produto, permitindo que ele possa ter certa maleabilidade sem quebrar. Como exemplos têm-se o polietilenoglicol, acetil tributil citrato e também oligômeros de ácido láctico (ANGELINI *et al.*, 2015; COLTELLI *et al.*, 2021; RIGHETTI *et al.*, 2019a).

Óleos vegetais não modificados têm sido avaliados em matrizes de PLA, mas a sua utilização é restrita devido a grande diferença de solubilidade entre

os dois produtos. Desse modo, o óleo de soja acrilatado e epoxidado, foi proposto como um novo aditivo por possuir um parâmetro de solubilidade mais próximo do PLA, sendo assim testado como aditivo em relação às propriedades mecânicas, térmicas e termomecânicas. Entretanto, seu efeito como plastificante não foi de grande importância. Esse óleo teve resultado positivo no alongamento de ruptura, mas não apresentou diferença significativa na melhora da rigidez. Apesar disso, esse óleo pode representar uma solução amigável para o meio ambiente, para reduzir a fragilidade intrínseca do PLA, sendo de boa utilização em embalagens rígidas ou peças para automóveis (QUILES-CARRILLO. *et al.*, 2018).

Quiles-Carillo, *et al.* (2018), utilizaram o óleo maleinizado de semente de cânhamo como plastificante em uma matriz de PLA. Os resultados mostraram que o óleo em questão induziu um incremento no alongamento de ruptura e resistência a impactos, além disso, apresentou melhora no módulo elástico e força de tração, que é um efeito que o difere dos plastificantes tradicionais. As peças de PLA com 2,5 a 7,5% de óleo de semente de cânhamo foram as que apresentaram melhor combinação de propriedades mecânicas e termomecânicas, mantendo as propriedades térmicas constantes.

Outra substância testada para melhorar a fragilidade do PLA foi a policaprolactona em conjunto com o termoplástico de amido. Policaprolactona é um conhecido biopolíester sintético e alifático, com alta maleabilidade e cristalinidade e de rápida degradação. O melhor resultado encontrado foi na amostra com maior quantidade de policaprolactona e menor de termoplástico, onde foram visualizadas melhorias na rigidez e na maleabilidade. Tal mistura pode ser utilizada para produção de embalagens rígidas como garrafas, bandejas, entre outras (QUILES-CARRILLO *et al.*, 2018c).

O óleo da semente de linhaça também foi testado na sua forma maleinizada em uma matriz obtida com a mistura de PLA e um termoplástico à base de poliestireno. O papel do óleo no estudo foi melhorar a reação entre os polímeros da matriz, superando a imiscibilidade de ambos, já que o óleo em questão reage tanto com o PLA quanto com o outro termoplástico. Os resultados mostraram que o óleo de linhaça na proporção de 5 phr (partes por cem de resina) foi a amostra que obteve melhor resposta em relação ao controle. A

incorporação do óleo melhorou a força de impacto do material e aumentou estabilidade térmica. O óleo tornou os materiais utilizados mais compatíveis e tal produto pode ser utilizado para fabricação de embalagens rígidas pela indústria (TEJADA-OLIVEROS *et al.*, 2021).

De acordo com ALDAS *et al.*, (2020), o glicerol é o plastificante mais utilizado mundialmente em termoplásticos de amido, sendo utilização em muitos estudos (Bueno *et al.*, 2021; Coelho *et al.*, 2017; Noomhorm; Rungsardthong, 2014). Ainda, segundo os autores, para produzir o efeito de plastificação em estruturas de amido são necessárias 3 características principais: temperaturas acima de 70° C, presença de um plastificante (água ou algum polioli) e tensão de corte. Esses autores testaram a fabricação de um termoplástico de amido de milho com aditivo de resina de pinho. Essa resina é denominada de resina de goma (RG) e é obtida a partir do aquecimento e evaporação da resina de pinho. Nesse estudo foi fabricado o termoplástico de amido de milho, a partir de amido, glicerol e água. Posteriormente, o material foi extrusado com 5 tipos diferentes de RG, na proporção de 90% de termoplástico e 10% de resina. Foi fabricada também uma amostra somente com o termoplástico, como controle. Os resultados encontrados mostraram que todas formulações testadas com a resina de pinho apresentaram melhoria na estabilidade térmica e boa compatibilidade com o termoplástico desenvolvido. Três tipos de RG apresentaram resultados melhores entre as amostras: a resina modificada com anidrido maleico, a resina com ésteres de glicerol e a resina com ésteres de pentaeritritol. A adição desses 3 tipos de resinas elevou a temperatura máxima suportada de 45° para mais de 70° C, sendo uma opção para a fabricação em embalagens rígidas para bebidas ou alimentos com altas temperaturas (ALDAS *et al.*, 2020).

3.3. APLICAÇÕES EM ALIMENTOS

O “Regulamento Técnico Disposições Gerais Para Embalagens E Equipamentos Celulósicos Em Contato Com Alimentos” (Portaria nº 177/1999) estabelece critérios de aceitação sobre substâncias que entrarão em contatos com alimentos, sendo na fabricação ou acondicionamento. Segundo essa portaria, as fibras celulósicas de primeiro uso estão na lista positiva para incorporação na embalagem que entrará em contato com alimentos. Além disso,

amidos ou féculas, podem ser utilizados para a mesma finalidade, desde que as impurezas no material não ultrapassem 50 mg/kg (BRASIL., 1999). Já no caso de cera utilizada como revestimento em embalagens, a legislação correspondente é o “Regulamento Técnico sobre Ceras e Parafinas em Contato com Alimentos” onde estão aprovadas para uso ceras parafínicas sintéticas, de petróleo e de polietileno. Estas podem ser adicionadas de aditivos permitidos para utilização em alimentos (BRASIL, 2001). No caso da cera de carnaúba, ela é permitida como aditivo alimentar, segundo o Regulamento Técnico Aditivos Alimentares (Portaria nº 540/1997), sendo liberado seu uso como glaceante que é uma “substância que, quando aplicada na superfície externa de um alimento, confere uma aparência brilhante ou um revestimento protetor”, no limite máximo de 0,01g/100g (BRASIL, 2013).

Qualquer ingrediente adicionado intencionalmente aos alimentos, sem propósito de nutrir, com o objetivo de modificar as características físicas, químicas, biológicas ou sensoriais, durante a fabricação, processamento, preparação, tratamento, embalagem, acondicionamento, armazenagem, transporte ou manipulação de um alimento, são consideradas aditivos e precisam de aprovação da U.S. *Food and Drug Administration* (FDA), para comercialização nos Estados Unidos e da ANVISA para o Brasil. Tal aprovação, nos Estados Unidos, não torna-se necessária quando o composto é reconhecido como seguro, tendo a denominação de “*Generally Recognized as Safe*” ou GRAS (ROBERTS; HAIGHTON, 2016).

Embora as embalagens não sejam propriamente adicionadas aos alimentos que conservam, ao manterem contato com o produto, devem também ser fabricadas a partir de materiais GRAS. Essa indicação se deve pela liberação de compostos da embalagem, que podem dissolver e diluir até atingir um equilíbrio com os produtos depositados na sua superfície (TAWAKKAL; CRAN; BIGGER, 2016).

Um estudo, já citado anteriormente, onde foi usada farinha da casca do grão do café, obteve resultados interessantes em embalagens rígidas para alimentos. Apesar da matriz polimérica utilizada ter sido o PLA, com incorporação em sua composição a farinha da casca do café, ocorreu melhoras nas suas propriedades térmicas, permitindo o armazenamento de alimentos com

temperatura de até 60° C. Destaca-se novamente a importância da utilização de preenchedores em matrizes poliméricas biodegradáveis, a fim de melhorar as propriedades termomecânicas (ORTIZ-BARAJAS *et al.*, 2020).

Outra formulação que obteve resultados promissores para embalar alimentos foi a matriz de bio-HDPE com os zeólitos. A embalagem apresentou excelente ação contra os microrganismos. Assim, de acordo com os autores, tais compostos podem ser aplicados para o desenvolvimento de embalagens rígidas e também para embalagens que terão contato direto com o alimento. Entre esses materiais avaliados, o estudo indica sua utilização para produção de talheres, equipamentos de cozinha ou tábuas de corte, na intenção de diminuir a multiplicação ou a formação de biofilme bacteriano (TORRES-GINER *et al.*, 2017).

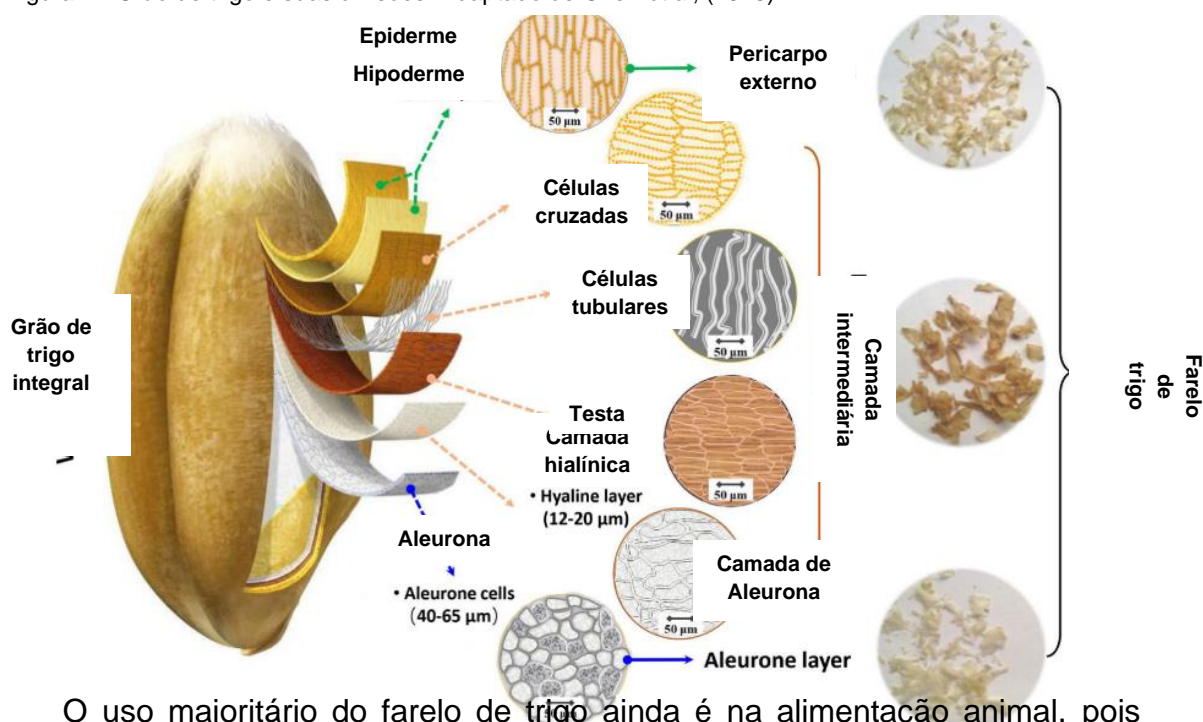
A quitosana também tem se apresentado uma boa matriz para a aplicação em embalagens de alimentos, isso porque além de possuir certa rigidez para a fabricação de produtos protetores ela possui características antimicrobianas. Ela foi investigada quanto as suas propriedades mecânicas, térmicas e antimicrobianas em uma matriz de ácido polilático. Além do propósito mecânico da embalagem, apresentou resultados positivos quanto à não toxicidade no uso em recipientes para acondicionar sementes de pepino (*Cucumis sativus*) e rabanete (*Raphanus sativus*), permitindo boa germinação nas amostras analisadas (RÂPĂ *et al.*, 2016).

Todas as embalagens desenvolvidas citadas nos tópicos anteriores apresentaram bons resultados no acondicionamento de alimentos. Os materiais podem ser utilizados para produção de embalagens ou para a fabricação de talheres, pratos e copos descartáveis (materiais que necessitem de certa rigidez). Ainda existe uma infinidade de materiais não testados que podem possuir propriedades interessantes para a utilização nesse tipo de produção. Isso permite o desenvolvimento de novas pesquisas relacionadas ao uso de matrizes biodegradáveis que visem a substituição gradual na utilização de fontes não renováveis para produção de embalagens ou utensílios descartáveis.

3.4. FARELO DE TRIGO

O trigo é uma das principais fontes de alimento para a humanidade, sendo cultivado em larga escala em países de todos os continentes, e desempenha um papel crucial na segurança alimentar global. O principal produto da moagem do grão do trigo com a finalidade da obtenção da farinha é o farelo de trigo, que representa entre 15 a 20 % do peso do grão integral. A Figura 2 mostra como é a divisão do grão de trigo integral, suas subdivisões e de qual composto será obtido o farelo de trigo (CHEN *et al.*, 2023).

Figura 2 - Grão de trigo e suas divisões. Adaptado de Chen *et al.*, (2023).



O uso majoritário do farelo de trigo ainda é na alimentação animal, pois representa uma fonte rica em fibras, proteínas e outros nutrientes essenciais, sendo frequentemente adicionado às rações para bovinos, suínos e aves, contribuindo para uma dieta balanceada e para o bom funcionamento do sistema digestivo dos animais (SKENDI *et al.*, 2020).

Na indústria de panificação, pesquisas estão avançando na utilização do farelo como um ingrediente adicional para enriquecer produtos como pães, bolos e biscoitos, onde há indícios de que o mesmo possa equilibrar a microbiota intestinal, diminuir o risco de doenças cardiovasculares e melhorar o perfil lipídico. Outras aplicações incluem seu uso na produção de fertilizantes orgânicos, na fabricação de suplementos alimentares e até mesmo na

composição de alguns produtos de beleza e cuidados com a pele, devido às suas propriedades hidratantes e esfoliantes (CHEN *et al.*, 2023).

As fibras do farelo de trigo que podem ser classificadas em solúveis e insolúveis, sendo maior a proporção de fibras insolúveis, o que o torna eficaz em reduzir a absorção de água. Essa característica o elege como uma boa fibra para ser utilizada como reforçadora em embalagens biodegradáveis, pois a alta absorção de água ainda é uma das desvantagens desse tipo de invólucro, conforme relatado nos estudos citados (CHEN *et al.*, 2023).

3.5. CASCA DE PITAYA

A pitaya, também conhecida como fruta do dragão, tem origem nas regiões tropicais e subtropicais da América Central e do Sul, bem como em partes da Ásia, incluindo México, América Central, Israel, Vietnã, Tailândia e Filipinas. Pertencente à família dos cactos, a pitaya é cultivada em diferentes variedades, sendo as mais comuns a pitaya branca e a pitaya vermelha. Essas frutas, considerada exóticas no Brasil, são apreciadas pelo sabor delicado, levemente adocicado e também por sua aparência impressionante. Apresenta uma casca escamosa e polpa suculenta repleta de pequenas sementes comestíveis. Ao longo dos anos, a pitaya ganhou popularidade em todo o mundo devido ao seu valor nutricional, sendo uma excelente fonte de antioxidantes, vitaminas e minerais essenciais. O cultivo da pitaya tem se expandido para diversas regiões subtropicais e pode ser realizado em estufas em regiões de clima temperado (SHAH *et al.*, 2023).

Os antioxidantes e polifenóis presentes na casca de pitaya combatem os radicais livres e podem prevenir danos celulares. Além disso, tais fitoquímicos podem ter propriedades anti-inflamatórias, anticancerígenas e neuroprotetoras (GARCÍA-CRUZ *et al.*, 2022; SHAH *et al.*, 2023; TAHARUDDIN *et al.*, 2023). Entre outros compostos benéficos a saúde, destacam-se as fibras dietéticas, vitaminas e minerais essenciais, antioxidantes, polifenóis e fitoquímicos. As fibras auxiliam na saúde digestiva, enquanto as vitaminas e minerais, como a vitamina C e o cálcio, fortalecem o sistema imunológico e promovem a saúde óssea.

A casca de pitaya corresponde a 33% do fruto integral, sendo uma parte frequentemente subestimada. Quando seca e moída, origina uma farinha com

umidade de aproximadamente 12% (UTPOTT *et al.*, 2020), podendo ser utilizada das mais variadas formas, incluindo a redução de resíduos descartados no meio ambiente.

3.6. CERA DE CARNAÚBA

A palmeira de carnaúba (Figura 3) é uma parte importante do ecossistema da região norte e nordeste do Brasil e sua exploração é cuidadosamente regulamentada para garantir sua preservação e o sustento das comunidades. Essa palmeira é encontrada principalmente em Estados como Ceará, Piauí, Maranhão e Rio Grande do Norte. A carnaúba é uma parte integral da cultura e da economia dessas regiões há séculos (JUNIOR *et al.*, 2022).

Figura 2 - Palmeira de Carnaúba.



A cera de carnaúba, também conhecida como "a rainha das ceras", é produzida a partir das folhas da palmeira *Copernicia prunifera*. É uma das ceras naturais mais duras e é amplamente utilizada em uma variedade de aplicações industriais e comerciais. A cera de carnaúba é valorizada por suas propriedades únicas, como alto ponto de fusão, resistência à água e brilho natural (DE FREITAS *et al.*, 2019a).

Na indústria de alimentos a cera de carnaúba tem sido utilizada como agente de revestimento em frutas e na formulação de doces para melhorar o brilho e a aparência. Além disso, é amplamente utilizada na indústria de cosméticos e na farmacêutica, onde representa um ingrediente comum em produtos como batons, pomadas e medicamentos. A carnaúba é uma importante fonte de renda para as comunidades onde é cultivada e seu uso sustentável é

fundamental para garantir a preservação das áreas de vegetação nativa (de Freitas *et al.*, 2019a). Já existe uma grande variabilidade de estudos utilizando a cera de carnaúba como cobertura hidrofóbica em alimentos, mas sua utilização em embalagens é pouco relatada.

CAPÍTULO 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A metodologia, os resultados e a discussão do trabalho desenvolvido e descrito nesta dissertação serão apresentados no capítulo 4 na forma de dois artigos científicos, sendo o item 4.1 apresentando o primeiro artigo intitulado: Inovação Sustentável: Embalagens Biodegradáveis a Partir de Resíduos de Pitaya e Trigo. E o item 4.2, o qual descreve o segundo artigo, intitulado Explorando Novas Possibilidades: Bandejas Biodegradáveis a Base de Resíduos Agroindustriais com Cobertura Impermeabilizante de Cera de Carnaúba.

4.1. INOVAÇÃO SUSTENTÁVEL: EMBALAGENS BIODEGRADÁVEIS A PARTIR DE SUBPRODUTOS DE PITAYA E TRIGO

Alessandra Teresinha Wolter, Alessandro de Oliveira Rios, Sandro Campos Amico, Simone Hickmann Flôres

Resumo

O estudo abordou o desenvolvimento de embalagens biodegradáveis utilizando dois pos de resíduos: farinha de casca de pitaya ou farelo de trigo em três diferentes proporções em relação ao amido de milho (50%, 65% e 80%). As embalagens resultantes foram comparadas ao poliestireno expandido (EPS) em relação a espessura, densidade, propriedades mecânicas, capacidade de absorção de água e biodegradabilidade. Os testes revelaram que as embalagens biodegradáveis desenvolvidas apresentaram desempenho superior para os parâmetros de tração, flexão, dureza e impacto em relação ao poliestireno expandido, que por sua vez apresentou maior elasticidade e menor capacidade de absorção de água. A análise de biodegradabilidade indicou degradação de 50% do peso inicial das embalagens em apenas 49 dias. Os resultados indicaram que bandejas rígidas biodegradáveis podem ser elaboradas com polímeros de baixo custo, podendo representar uma alternativa promissora para reduzir a poluição causada por embalagens convencionais, contribuindo para práticas sustentáveis na indústria.

Palavras-chave: Embalagens sustentáveis; biodegradabilidade; poliestireno; resíduos agroindustriais.

4.1.1. INTRODUÇÃO

As pesquisas por soluções sustentáveis para reduzir o uso de embalagens plásticas derivadas do petróleo têm sido muito relevantes no tocante aos atuais

desafios ambientais. Uma alternativa refere-se à reciclagem, contudo a quantidade de materiais reciclados ainda é pequena, sendo que apenas 29,3% do polietileno de alta densidade (PEAD) e 26,8% do polietileno tereftalato (PET) são destinados a esse processo. Além disso, a reciclagem pode envolver o uso de solventes de alto custo e não amigáveis ao meio ambiente (TURNER, 2020).

Um polímero amplamente utilizado no setor de alimentos para a produção de bandejas é o poliestireno expandido (EPS), porém esse material também apresenta uma baixa taxa de reciclagem (27% em média), pois resíduos de alimentos que foram armazenados em tais embalagens, dificultam a etapa de descontaminação para o processo de transformação de materiais descartáveis em novos insumos e produtos (TURNER, 2020). Além disso, o EPS é composto por 98% de ar e somente 2% de matéria-prima, o poliestireno, logo a reciclagem acaba não compensando pois a quantidade final de resíduo do processo se torna diminuta (GIL-JASSO *et al.*, 2022).

As embalagens biodegradáveis podem representar uma alternativa promissora às tradicionais embalagens plásticas de uso único, além de reduzir o impacto ambiental gerado pelo descarte incorreto e pela ausência de reciclagem. Neste sentido, os polímeros utilizados são diversos e pode-se citar ácido polilático (PLA), poli-hidroxibutirato (PHB), poli-hidroxialcoanato (PHA), amido, celulose, pectinas, gomas (polissacarídeos), ceras, parafinas (lipídeos), caseína, colágeno, glúten (proteínas), entre outros.

Uma abordagem inovadora para produção de embalagens biodegradáveis envolve a utilização de resíduos agroindustriais, como o farelo de trigo e as cascas de frutas, tais como pitaya, banana, abacaxi entre outras, ou seja, materiais que são normalmente descartados. A produção anual mundial de farelo de trigo (*Triticum* spp.) atinge 150 milhões de toneladas e possui seu maior uso na indústria de alimentação animal (CHEN *et al.*, 2023). A pitaya, originária da região do Caribe e norte da América do Sul, pode gerar até 32% de casca após o processamento (FERREIRA, V. C. *et al.*, 2023; GARCÍA-CRUZ *et al.*, 2022).

O farelo de trigo e a casca de pitaya são constituídos por fibras alimentares que podem ser degradadas no meio ambiente e quando utilizados para produção de embalagens podem apresentar valor comercial e permitir outras utilizações juntamente com a alimentação animal, promovendo a sustentabilidade em toda

a cadeia produtiva. O objetivo desse estudo foi avaliar o desenvolvimento de embalagens rígidas biodegradáveis a base de amido de milho, incorporadas com resíduos da indústria alimentícia, como o farelo de trigo ou farinha de casca de pitaya.

4.1.2. MATERIAL E MÉTODOS

4.1.2.1. Material

Foi utilizado amido de milho da Marca Fritz & Frida (com 26% amilose e 12% de umidade) adquirido no mercado local (Porto Alegre, Brasil). A casca da pitaya foi doada pela empresa Pitaya do Brasil (Novo Hamburgo, Brasil). A fibra de trigo foi doada pela indústria Moinho do Nordeste, (Antônio Prado, Brasil). Ainda foi utilizado como plastificante glicerol adquirido de Dinâmica (São Paulo, Brasil), goma-guar, utilizada como espessante, adquirida da marca Êxodo Científica (São Paulo, Brasil) e estearato de magnésio da Dinâmica (São Paulo, Brasil) utilizado como desmoldante.

4.1.2.2. Métodos

4.1.2.2.1. Preparo das fibras provenientes dos resíduos agroindustriais

A casca de pitaya in natura foi lavada em água corrente e higienizada com hipoclorito de sódio (1,5%). Após foram cortadas em pedaços de aproximadamente 2 cm x 3 cm e secas em estufa com circulação de ar a 65°C, (NL-82/100, New Lab, Brasil), por 24 horas, moídas em moinho de facas (SL-31, Solab, Brasil) e padronizadas em peneira de malha <60 Mesh. A fibra de trigo foi seca em estufa de 105° C (B4-AFD, DeLeo, Brasil) por 12h, para eliminar o teor de umidade residual e peneirada até granulometria <20 Mesh. As farinhas obtidas foram armazenadas em sacos de nylon/polietileno selados a vácuo, mantidos em freezer a -18°C até o momento de sua utilização.

4.1.2.2.2. Caracterização da farinha de casca de pitaya e do farelo de trigo

A farinha de casca de pitaya e o farelo de trigo foram caracterizados quanto ao teor de umidade, cinzas e fibras pelo método enzimático-gravimétrico descritos pela *Association of Official Analytical Chemists*, AOAC, (2005). O teor de hemicelulose, celulose e lignina foram determinados pelo método alternativo

de determinação de fibra detergente ácido (FDA) e fibra detergente neutro (FDN) (DE SOUZA *et al.*, 1999). Os resultados foram expressos em g/100 g de matéria seca. A capacidade de absorção de água (CAA) foi determinada de acordo com UTPOTT *et al.*, (2020) e os resultados expressos em g de água/g de farinha. Todas as análises foram realizadas em triplicata.

4.1.2.2.3. Elaboração da embalagem rígida

A elaboração das embalagens seguiu a metodologia adaptada de ENGEL; AMBROSI; TESSARO, (2019) com modificações. Foram elaboradas 7 formulações (Tabela 1) com combinações de resíduo/amido nas proporções de 50/50, 65/35 e 80/20. Foram fixadas as quantidades de 4,5g de água por grama de farinha de casca de pitaya e 3g de água por grama de fibra de trigo, de acordo com os dados obtidos previamente na análise de capacidade de absorção de água. As quantidades de glicerol e goma-guar foram fixadas em 10% (p/p) e do estearato de magnésio foi utilizado 1%(p/p) do total da base da bandeja (fibra+amido).

Tabela 1 – Formulações das bandejas de amido de milho incorporadas com farelo de trigo e farinha de casca de pitaya.

Amostras	Amido (%)	Farinha de casca de pitaya (%)	Farelo de trigo (%)	Estearato de Magnésio (g)	Goma-Guar (g)	Glicerol (g)	Água (mL)
50P	50	50	0	1	10	10	275
65P	35	65	0	1	10	10	327,5
80P	20	80	0	1	10	10	380
50T	50	0	50	1	10	10	200
65T	35	0	65	1	10	10	230
80T	20	0	80	1	10	10	260

50P: amostra com 50% de farinha de casca de pitaya, 65P: amostra com 65% de casca de pitaya, 80P: amostra com 80% de casca de pitaya, 50T: amostra com 50% de farelo de trigo, 65T: amostra com 65% de farelo de trigo, 80T: amostra com 80% de farelo de trigo.

Os ingredientes foram homogeneizados em duas etapas, para melhor homogeneização dos constituintes, com a ajuda de um agitador mecânico (713D, Fisatom, Brasil). Na primeira etapa a fibra foi misturada durante 5 min com estearato de magnésio, goma-guar e água. Posteriormente, foram adicionados o amido e o glicerol e a mistura foi agitada por mais 10 min. A mistura foi disposta em um molde de alumínio com dimensões de 150 x 150 x 30 mm, pré-aquecido a 210 °C. Foram colocadas 150g de cada amostra no molde, que então foi fechado e colocado em uma prensa hidráulica a 210°C (MA 098/A 3030, Marconi, Brasil). O tempo de prensagem foi de 9 minutos para as bandejas

com farinha de casca de pitaya e de 10 minutos para as bandejas de farelo de trigo. Após completa expansão do material, as bandejas foram retiradas do molde e resfriadas até temperatura ambiente. Posteriormente, foram armazenadas em dessecador com sílica sob condições controladas (umidade relativa de 30% e temperatura de ± 25 °C).

4.1.3. CARACTERIZAÇÃO DAS BANDEJAS

4.1.3.1. Densidade

As bandejas foram cortadas em tamanho 2 x 2 cm e tiveram sua densidade aparente calculada através da equação 1. A medição foi efetuada em pontos randômicos de cada bandeja e os resultados foram expressos em g/cm^3 .

$$\text{Equação 1: } D = \frac{m}{v}$$

Onde D em g/cm^3 é a densidade aparente, m é a massa em gramas de cada amostra e v , o volume calculado pela multiplicação da medida de largura, comprimento e espessura, em centímetro, de cada recorte.

4.1.3.2. Espessura

A espessura foi medida com um micrômetro de alta precisão (Digimess, IP40, Brasil) em pelo menos cinco pontos randômicos de cada bandeja e os resultados foram expressos em mm.

4.1.3.3. Análise colorimétrica

As análises de cor das bandejas foram efetuadas por colorímetro (Miniscan XE, Hunter Lab System, EUA). A escala de cor CIELab foi utilizada para medir os parâmetros de cor, onde L^* representa a luminosidade e varia de 0 (preto) a 100 (branco), a^* controla a variação de cor entre $-a$ (esverdeado) e $+a$ (avermelhado) e o b^* estabelece a o alcance de cor entre $-b$ (amarelado) e $+b$ (azulado). A diferença total de cor (ΔE) foi calculada de acordo com a equação 2.

$$\text{Equação 2: } \Delta E = \sqrt{[(\Delta L^*)^2] + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

Onde $\Delta L^* = L^* - L_0$; $\Delta a^* = a^* - a_0$; $\Delta b^* = b^* - b_0$. Onde L_0 , a_0 e b_0 são os valores da bandeja de EPS e L^* , a^* e b^* da bandeja biodegradável.

4.1.3.4. Propriedades mecânicas

Os testes de flexão foram efetuados em peças de 80 mm x 25 mm x 3 mm, de acordo com a ASTM D790, usando um flexurômetro (3382, Instron, EUA), com uma célula de 50 N de peso e método de curvatura utilizando 3 pontos e um espaçamento de 4,5 cm e velocidade de 1 mm/s. Os testes de tração foram efetuados utilizando uma cruzeta com velocidade de 10 mm/s. A dureza foi medida com um durômetro (HPE II, Bareiss, Alemanha), de acordo com a ASTM 2240. A resistência ao impacto foi caracterizada de acordo com a ASTM D256, com o equipamento CEAST, (CEAST 9050, Instron, EUA), com a utilização de um martelo de 0,75J. Para cada teste mecânico efetuado foram testadas pelo menos 5 amostras, 80 mm x 25 mm, diferentes de cada composição. Todos os testes estão de acordo com as normativas do *American Society for Testing and Materials* (ASTM).

4.1.3.5. Absorção de água

A absorção de água foi medida pelo método de Cobb (ABNT, 2011). As amostras medindo 4 cm x 2 cm foram pesadas e mergulhadas em 100 mL de água destilada por 5, 10, 15, 20, 25 e 30 minutos. A cada retirada o excesso de água era removido com a ajuda de um papel toalha e as amostras pesadas novamente. A quantidade de água absorvida foi calculada de acordo com a diferença de peso inicial e final de cada amostra e expressa como a massa de água absorvida pela massa original da amostra, de acordo com a equação 3. A análise foi feita em triplicata para cada amostra.

$$\text{Equação 3: } A\% = \frac{m_f - m_0}{m_0} \times 100$$

Onde $A\%$ é o percentual de água absorvida em relação ao peso inicial, m_0 , em gramas, é a massa inicial de cada amostra e m_f , também em gramas, a massa final em cada tempo.

4.1.3.6. Análise térmica

As amostras foram testadas para características térmicas, através de um calorímetro diferencial exploratório (DSC) (Q20, TA Instruments, Inglaterra). As bandejas foram colocadas em uma estufa a 30°C por 2 min, resfriadas a -25 °C e aquecidas até 190 °C em atmosfera de nitrogênio, a uma velocidade de aquecimento de 10 °C/min. A degradação em altas temperaturas foi avaliada através de análise termogravimétrica (TGA) (Q50, TA Instruments, Inglaterra). A amostra foi aquecida em rampa, em atmosfera de nitrogênio, partindo de 25 °C até atingir 940 °C a uma velocidade de aquecimento de 20 °C/min.

4.1.3.7. Morfologia

As bandejas foram avaliadas em um microscópio eletrônico de varredura (MEV) (Zeiss MA10, EVO, Alemanha) com uma tensão de aceleração de 5kV a uma aproximação entre 50x e 100x para analisar suas morfologias em alta resolução. As peças testadas foram cobertas com uma fina camada de ouro e depois colocadas em uma câmara de vácuo a fim de serem visualizadas através do monitor.

4.1.3.8. Biodegradabilidade

A biodegradabilidade do material foi analisada com um teste qualitativo e quantitativo, seguindo a metodologia de ASSIS et al. (2018), com modificações. As bandejas foram cortadas em amostras com tamanho 2 x 2 cm, envoltas em uma tela de alumínio, para melhor manipulação, e completamente enterradas em composto orgânico pronto para plantio (Terra Fértil). Esse composto foi colocado em espaços separados para cada amostra analisada e estas foram avaliadas visualmente e de acordo com a perda de peso. A caracterização foi feita em temperatura ambiente e a umidade foi mantida constante, através da adição de 10 mL de água 2 vezes na semana em cada espaço, que possuía um volume de 162,5 cm³ de composto vegetal. As amostras foram previamente secas em estufa a 40 °C por 24h e pesadas. A cada semana, por 7 semanas, as amostras eram desenterradas, limpadas delicadamente, secas em estufa e pesadas.

4.1.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1.4.1. Caracterização das farinhas de casca de pitaya e de farelo de trigo

A Tabela 2 apresenta a caracterização da farinha de casca de pitaya e do farelo de trigo.

Tabela 2 – Caracterização da farinha de casca de pitaya e do farelo de trigo.

Amostras	Farinha de casca de pitaya	Farelo de trigo
Umidade (%)	12,38 ± 0,56 ^b	14,28 ± 0,68 ^a
Cinzas (%BS)	17,56 ± 0,29 ^a	5,65 ± 0,10 ^b
Fibra dietética total (%BS)	65,59 ± 1,65 ^a	44,22 ± 0,24 ^b
Fibra dietética insolúvel (%BS)	41,63 ± 1,97 ^a	41,37 ± 0,48 ^a
Fibra dietética solúvel (%BS)	23,96 ± 1,32 ^a	2,84 ± 0,72 ^b
CAA (g água/g fibra)	7,97 ± 0,12 ^a	4,08 ± 0,17 ^b
Hemicelulose (%BS)	Traços	37,44 ± 2,47 ^a
Celulose (%BS)	35,30 ± 1,21 ^a	16,64 ± 0,83 ^b
Lignina (%BS)	4,10 ± 0,21 ^b	8,01 ± 0,68 ^a

BS: Base Seca. CAA: Capacidade de absorção de água. Letras diferentes entre si em uma mesma linha mostra resultados com diferença significativa ($p < 0,05$) entre si.

A farinha da casca de pitaya apresentou teor de umidade significativamente menor que o valor encontrado no farelo de trigo, porém um teor de cinzas significativamente maior. A quantidade de fibra dietética total, soma de fibras insolúveis e solúveis, também foi maior na farinha da casca de pitaya, porém esta diferença foi devido a quantidade de fibra solúvel, muito superior ao resultado encontrado no farelo de trigo. Essa diferença na quantidade de fibra solúvel pode ter influenciado na maior capacidade de absorção água (CAA) demonstrada pela farinha da casca de pitaya, fato esse que está de acordo com a quantidade de água necessária para elaboração da bandeja confeccionada a partir dessa farinha. Os valores de hemicelulose, celulose e lignina do farelo de trigo estão de acordo aos que já foram encontrados na literatura que são de 30 a 39%, 5,5 a 31% e 8 a 15%, respectivamente (SZTUPECKI *et al.*, 2023). A farinha de casca de pitaya apresentou também valores de hemicelulose, celulose e lignina próximos aos encontrados na literatura. A hemicelulose não foi detectada na casca, enquanto,

foram observados resultados de 34,45% para celulose, 6,73% para lignina (TAHARUDDIN *et al.*, 2023).

4.1.4.2. Caracterização das Bandejas Biodegradáveis

4.1.4.2.1. Espessura e densidade

A espessura das bandejas (Tabela 3) variou entre 2,831 e 3,327 mm, valores esses compatíveis com trabalhos já publicados para bandejas incorporadas com bagaço de cana de açúcar, pele de aspargo e sementes de gergelim. Os valores encontrados nas bandejas de bagaço de cana de açúcar e pele de aspargo variaram entre 2,53 mm a 2,63 mm, sendo a menor espessura, da bandeja com 40% de farinha de pele de aspargo, maior percentual de fibra utilizada no estudo. Nas bandejas desenvolvidas com sementes de gergelim a espessura variou de 3,3 mm a 4,6 mm, sendo também a menor espessura atingida com o maior percentual de sementes de gergelim (40%) (CRUZ-TIRADO, Jam Pier *et al.*, 2019; MACHADO; BENELLI; TESSARO, 2017).

As bandejas de farinha de casca de pitaya apresentaram menor espessura em comparação as bandejas produzidas com farelo de trigo, sendo que este resultado está relacionado com a quantidade de água adicionada em cada formulação. Ambas as bandejas foram produzidas a partir de 150 gramas de sólidos e sob a mesma temperatura, porém o tempo de prensagem utilizado foi diferente, sendo de 10 min para as bandejas de farinha da casca de pitaya e de 9 minutos para as de farelo de trigo. Entretanto, para cada grama de farinha de casca de pitaya utilizada foram utilizadas 4,5 g de água, já no farelo de trigo a quantidade de água utilizada foi de 3 g de água por grama do farelo. Logo, ao serem prensadas ocorreu perda da água na forma de vapor, então a quantidade de sólidos totais final foi menor naquelas bandejas elaboradas com a farinha da casca de pitaya, em média 40 g de sólidos totais, sendo que para as bandejas de farelo de trigo esse valor era em média 63,5 g.

De uma forma geral, o aumento da quantidade de fibra adicionada gerou bandejas de menor espessura, porque quanto maior o percentual de fibra utilizada foi necessário um volume maior de solvente na massa crua. Junto a isso, ao aumentar a quantidade de fibras de cada bandeja o percentual de amido

a ser adicionado é menor, esse fato diminui a capacidade de expansão de cada produto, levando a uma menor espessura.

Tabela 3 - Espessuras e densidade das amostras com diferentes percentuais de farinha de casca de pitaya e farelo de trigo

Amostras	E (mm)	D (g/cm ³)
EPS	2,683 ± 0,046 ^g	0,031 ± 0,001 ^c
50P	2,984 ± 0,001 ^d	0,477 ± 0,004 ^b
65P	2,831 ± 0,005 ^f	0,502 ± 0,030 ^b
80P	2,887 ± 0,005 ^e	0,501 ± 0,020 ^b
50T	3,327 ± 0,003 ^a	0,627 ± 0,035 ^a
65T	3,164 ± 0,002 ^b	0,611 ± 0,028 ^a
80T	3,035 ± 0,001 ^c	0,490 ± 0,017 ^b

EPS: Poliestireno expandido, 50P: amostra com 50% de farinha de casca de pitaya, 65P: amostra com 65% de casca de pitaya, 80P: amostra com 80% de casca de pitaya, 50T: amostra com 50% de farelo de trigo, 65T: amostra com 65% de farelo de trigo, 80T: amostra com 80% de farelo de trigo. Letras diferentes entre si em uma mesma coluna mostra resultados com diferença significativa ($p < 0,05$).

A densidade é uma das características mais importantes em bandejas, tanto pela sua relação à capacidade de expansão dos materiais quanto por suas propriedades térmicas (AMARAWEEERA *et al.*, 2022; NUGROHO *et al.*, 2022). O aumento da densidade tem relação contraditória, pois ao mesmo tempo que não é visto como algo desejado pelas possíveis dificuldades no transporte (OLIVER-ORTEGA *et al.*, 2021), também proporciona melhor condutividade térmica ao produto (NUGROHO *et al.*, 2022). Os resultados encontrados nas bandejas desenvolvidas a partir de farinha de casca de pitaya não mostraram diferença significativa na densidade. Por sua vez, nas bandejas desenvolvidas a base de farelo de trigo a densidade diminuiu com o aumento da proporção farelo/amido, com valores entre 0,627 a 0,490 g/cm³, e apresentando diferença significativa somente a partir da bandeja produzida com 80% de farelo de trigo. Esse fato pode ser explicado pelo aumento da quantidade de água necessária, para dispersão dos sólidos conforme aumenta o percentual de fibra. Desse modo a densidade tende a diminuir com o aumento da fibra na bandeja.

Quando comparados com a amostra fabricada em EPS todas as bandejas biodegradáveis apresentaram maior densidade e maior espessura. A densidade da bandeja tem relação direta com a sua resistência e segundo, RODRIGUES *et al.*, (2020) maior densidade em bandejas tende a resultar em maior

resistência. Assim sendo, as bandejas produzidas apresentam potencial para aplicação como embalagem para diversos produtos, ou alimentos, mais pesados em comparação às bandejas de EPS.

4.1.4.2.2. Cor

A tabela 4 mostra que o maior valor de L^* , entre as embalagens desenvolvidas, foi encontrado na amostra que continha 50% de farinha da casca de pitaya, apresentando diferença significativa das bandejas contendo 65 e 80% ($p < 0,05$). Já, entre as bandejas produzidas com farelo de trigo não houve diferença significativa entre os parâmetros analisados ($p > 0,05$). CABANILLAS et al. (2019) e CRUZ-TIRADO et al. (2019) relataram que a adição de fibras, farinha de casca de abacaxi e farinha de pele de aspargo e de bagaço de cana, respectivamente, em matrizes poliméricas à base de amido, diminui o valor de luminosidade (parâmetro L).

Em relação ao valor do parâmetro a^* , as bandejas não apresentaram diferença significativa, com exceção da amostra contendo 50% de farelo de trigo. Os valores para o parâmetro a^* foram positivos, tendendo para o avermelhado. Nas bandejas de farelo de trigo houve um aumento desse parâmetro, quando foi quando acrescentado um valor superior a 50% de fibra.

As coordenadas do parâmetro b^* apresentaram valores positivos em um intervalo entre 10,49 e 17,08, indicando que as bandejas possuem cores tendendo para o amarelo, sendo que a amostra com 50% de farinha de casca de pitaya foi a que atingiu maior tom amarelado. Por sua vez, nas bandejas desenvolvidas com farelo de trigo não ocorreu diferença significativa, ou seja, indicando a mesma coloração entre as diferentes porcentagens adicionadas.

Tabela 4 – Valores dos parâmetros de cor das amostras com diferentes percentuais de farinha de casca de pitaya e de farelo de trigo.

Amostras	L^*	a^*	b^*	ΔE^*
EPS	82,65 ± 0,24 ^a	0,07 ± 0,01 ^c	-0,464 ± 0,03 ^d	0
50P	44,03 ± 2,40 ^b	7,84 ± 0,43 ^a	17,08 ± 0,83 ^a	43,14 ± 2,22 ^c
65P	37,65 ± 0,99 ^c	8,03 ± 0,34 ^a	15,00 ± 0,60 ^b	48,10 ± 0,76 ^b
80P	36,31 ± 1,61 ^c	7,87 ± 0,27 ^a	14,87 ± 0,59 ^b	49,43 ± 1,24 ^b
50T	31,51 ± 0,69 ^d	7,03 ± 0,41 ^b	10,49 ± 0,56 ^c	52,76 ± 0,64 ^a
65T	31,29 ± 2,02 ^d	7,92 ± 0,34 ^a	10,87 ± 0,90 ^c	53,19 ± 1,75 ^a
80T	31,60 ± 1,18 ^d	7,96 ± 0,53 ^a	10,79 ± 0,74 ^c	52,87 ± 1,10 ^a

EPS: Poliestireno expandido, 50P: amostra com 50% de farinha de casca de pitaya, 65P: amostra com 65% de casca de pitaya, 80P: amostra com 80% de casca de pitaya, 50T: amostra com 50% de farelo de trigo, 65T: amostra com 65% de farelo de trigo, 80T: amostra com 80% de farelo de trigo. Letras diferentes entre si em uma mesma coluna mostra resultados com diferença significativa ($p < 0,05$) entre si.

A bandeja de EPS foi escolhida como bandeja padrão, assim os parâmetros L^* , a^* e b^* medidos nessa amostra foram os valores padrões utilizados para calcular o ΔE das bandejas biodegradáveis. Todas as bandejas desenvolvidas mostraram coloração diferente da amostra controle (EPS). Esse resultado era esperado, pois qualquer adição de fibra tende a escurecer o produto se comparado a uma amostra sem a incorporação de resíduos. Essa coloração, tendendo para o marrom em comparação com a bandeja de EPS, pode reforçar o apelo de sustentabilidade do produto para o consumidor. O valor de ΔE indica uma diferença de cor entre as bandejas da seguinte forma: uma diferença imperceptível na cor varia de 0 a 0,5, uma ligeira diferença de 0,5 a 1,5, uma diferença quase perceptível de 1,5 a 3,0, uma diferença notável de 3,0 a 6,0, uma diferença extremamente notável de 6,0 a 12,0, e ΔE com valores acima de 12,0 indicam uma tonalidade totalmente diferente da bandeja padrão, nesse caso a amostra de EPS (KIM; PARK; HWANG, 2002).

A diferença total de cor (ΔE) das bandejas fabricadas a partir de farelo de trigo foram as que apresentaram maior diferença na tonalidade, com valores entre 52,76 e 53,19, sem diferença significativa entre si. As bandejas fabricadas com farinha de casca de pitaya também apresentaram diferença no parâmetro ΔE , sendo a amostra 50P a que se apresentou mais clara. As bandejas com farelo de trigo à olho nu também se mostraram mais escuras. A cor da massa crua tem ligação direta com a cor inerente do resíduo adicionado, já a cor final da bandeja pode estar associada a reação de Maillard pela quantidade presente de carboidratos e proteínas no resíduo cru (MACHADO; BENELLI; TESSARO, 2017). De acordo com a literatura, a porcentagem de proteína na casca desse fruto pode chegar a 10,36% da base seca, enquanto o total de carboidratos pode a 70,69% (FERREIRA, V. C. *et al.*, 2023)

4.1.4.2.3. Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas desempenham um papel fundamental no desempenho das embalagens, garantindo a proteção adequada dos produtos durante o transporte e armazenamento. A resistência à flexão, tração, dureza e impacto são características essenciais que uma embalagem deve possuir para garantir a integridade do conteúdo. As propriedades mecânicas, relatadas na

tabela 5, desempenham um papel crucial na preservação da qualidade dos alimentos armazenados e na satisfação dos consumidores.

4.1.4.2.3.1. Impacto

A análise de impacto é de extrema importância nos materiais com finalidade de utilização como embalagens (BERGEL; ARAUJO; SANTANA, 2021). Nas bandejas, de ambas as fibras em todas suas proporções, não foi observada diferença significativa para impacto, entretanto todas apresentaram valores significativamente superiores a embalagem de EPS. O maior valor de impacto, $0,80 \text{ KJ/m}^2$, foi encontrado, em todas bandejas de farelo de trigo, já para a bandeja de EPS esse valor foi bem inferior, sendo de $0,54 \text{ KJ/m}^2$. Tais resultados podem ser explicados pela boa dispersão entre os resíduos utilizados e o amido, dando proteção contra rupturas às células de expansão do amido originadas durante a prensagem da embalagem (KAEWTATIP; CHIARATHANAKRIT; RIYAJAN, 2018).

4.1.4.2.3.2. Dureza (Shore D)

Quanto à dureza (Shore D), não houve diferença significativa (tabela 5) entre as bandejas de trigo e aquelas com 50% de farinha de casca de pitaya. As bandejas de 65 e 80% de farinha de casca de pitaya também não apresentaram diferença significativa entre si. Entretanto, todas as bandejas apresentaram resultados significativamente superiores ao EPS, tendo uma dureza elevada frente a esse material. Tais resultados demonstram que quando aumenta o percentual de casca de pitaya, acima de 50%, diminui o valor de dureza da embalagem. Esse fato pode ser explicado pela concentração de hemicelulose e lignina nesse tipo de fibra, pois são esses dois polímeros que conferem rigidez e resistência mecânica às plantas e às embalagens as quais os resíduos são adicionados (TAPIA-BLÁCIDO *et al.*, 2022). Não foram encontrados na literatura resultados de dureza Shore D em estudos de embalagens produzidas somente a base de amido com a incorporação de resíduos agroindustriais. Entretanto, AGÜERO *et al.*, (2020), utilizaram farinha de linhaça dourada (30%) como preenchedor em uma matriz de PLA (70%) e encontraram valores de dureza entre 75,4 e 81,2. Por sua vez, CHOTIPRAYON; CHAISAWAD; YOKSAN, (2020) produziram um *blend* com PLA (40%), amido de aipim (60%) e fibra de coco, e

encontraram valores entre 67,3 e 71,1, sendo os maiores valores para as bandejas que foram incorporadas com a quantidade de 8,2% de fibra de coco (segundo maior percentual de fibra). Segundo os autores, ao aumentar a fibra houve uma diminuição da dureza que pode ser explicada pela baixa adesão interfacial entre o PLA e a farinha de linhaça, fato esse que pode ter ocorrido no presente estudo. Essa variação de percentuais de PLA/amido entre ambos os estudos mostra que quanto maior a concentração de fibra ou amido, em relação à matriz (PLA), menor será a dureza. Assim, os valores encontrados nesse estudo variaram entre 23,87 e 44,07, sendo o maior valor observado na amostra com 50% de farinha de farelo de trigo e o menor visto no EPS, estão dentro do esperado para uma amostra produzida somente a partir de amido e fibra, sem a adição de qualquer outro polímero.

Tabela 5 - Propriedades mecânicas das amostras com diferentes percentuais de farinha de casca de pitaya e de farelo de trigo.

Amostra	Propriedade de Tensão					Propriedade de Flexão		
	Impacto (kJ/m ²)	Dureza Shore D	Stress at Break (Mpa)	Strain at Break (%)	MY (Mpa)	Stress at Break (Mpa)	Strain at Break (%)	MY (Mpa)
EPS	0,54 ± 0,02 ^b	23,87 ± 0,11 ^c	0,28 ± 0,22 ^b	2,42 ± 0,52 ^d	19,70 ± 0,37 ^d	1,05 ± 0,05 ^e	6,07 ± 0,23 ^a	103,40 ± 9,38 ^d
50P	0,75 ± 0,09 ^a	41,60 ± 0,87 ^a	2,47 ± 0,14 ^a	5,05 ± 0,36 ^a	203,86 ± 10,55 ^{b,c}	7,22 ± 0,16 ^b	1,06 ± 0,09 ^{b,c}	749,10 ± 33,69 ^b
65P	0,69 ± 0,08 ^a	29,53 ± 2,08 ^b	2,55 ± 0,21 ^a	4,33 ± 0,18 ^b	220,88 ± 3,08 ^a	6,39 ± 0,83 ^{b,c}	1,19 ± 0,19 ^{b,c}	513,68 ± 46,74 ^c
80P	0,67 ± 0,10 ^a	32,73 ± 1,70 ^b	2,46 ± 0,14 ^a	3,63 ± 0,37 ^c	232,77 ± 17,85 ^a	6,29 ± 0,34 ^c	1,24 ± 0,04 ^b	589,76 ± 48,91 ^c
50T	0,80 ± 0,08 ^a	44,07 ± 2,34 ^a	2,90 ± 0,65 ^a	4,96 ± 0,89 ^{a,b}	200,62 ± 8,72 ^c	8,27 ± 0,29 ^a	0,91 ± 0,04 ^d	939,70 ± 101,72 ^a
65T	0,80 ± 0,13 ^a	42,03 ± 1,48 ^a	3,06 ± 0,61 ^a	4,29 ± 0,92 ^{a,b,c}	217,03 ± 4,95 ^{a,b}	7,28 ± 0,66 ^{b,c}	0,90 ± 0,03 ^d	821,46 ± 18,38 ^a
80T	0,80 ± 0,03 ^a	40,67 ± 2,53 ^a	2,72 ± 0,52 ^a	4,63 ± 0,71 ^{a,b,c}	213,45 ± 11,64 ^{a,b,c}	4,90 ± 0,62 ^d	0,98 ± 0,07 ^{c,d}	585,11 ± 86,10 ^c

EPS: poliestireno expandido. 50P: 50% de farinha de casca de pitaya. 65P: 65% de farinha de casca de pitaya. 80P: 80% de farinha de casca de pitaya. 50T: 50% de farelo de trigo. 65T: 65% de farelo de trigo. 80T: 80% de farelo de trigo. MY: módulo de young. Letras diferentes entre si em uma mesma coluna mostra resultados com diferença significativa ($p < 0,05$) entre si.

4.1.4.2.3.3. Propriedades de Tração

As características de *stress* e *strain at break*, tanto na tração quanto na flexão, são consideradas as mais importantes para avaliação de bandejas em relação ao seu uso (MACHADO; BENELLI; TESSARO, 2017). As bandejas não mostraram diferença significativa (tabela 5) entre si com os resultados variando entre 2,46 e 3,06 MPa. Todas as bandejas apresentaram valores significativamente superiores quando comparadas a bandeja de EPS (0,28 MPa). A ausência de diferença significativa no *stress at break* entre as bandejas produzidas com farinha de casca de pitaya e farelo de trigo mostra que não houve disparidade na interação entre os percentuais, tipos de fibra e o amido. Isso ocorre porque ambos os componentes fibrosos (farinha de casca de pitaya e farelo de trigo) junto com o amido possuem grupos hidroxila, que proporcionam ligações de hidrogênio que, por sua vez, tendem a ser mais fortes (BERGEL; ARAUJO; SANTANA, 2021; KHOO *et al.*, 2022; LAI *et al.*, 2023; VARGAS-TORRES *et al.*, 2017b). (BERGEL; ARAUJO; SANTANA, 2021; KHOO *et al.*, 2022; LAI *et al.*, 2023; VARGAS-TORRES *et al.*, 2017a).

Em relação ao *strain at break*, as bandejas com 50% de farinha de casca de pitaya e com todos os percentuais de farelo de trigo não mostraram diferença significativa entre si, apresentando resultados entre 4,29 e 5,05%. Entretanto, foi possível visualizar que ao aumentar o percentual de farinha de casca de pitaya houve uma diminuição no valor encontrado dessa propriedade. A casca de pitaya possui um alto teor de fibras dietéticas solúveis e aproximadamente 4% de lignina (metade do valor do farelo de trigo) e somente traços de hemicelulose. A fibra solúvel não ajuda a conferir resistência à embalagem, pois é solubilizada em água, junto a isso, a lignina e a hemicelulose que forneceriam resistência a bandeja estão presentes em baixa concentração. Visto que o *strain at break* mede a capacidade de deformação de um material antes da quebra, os resultados mostraram que todas as bandejas possuem maior resistência frente a rupturas, quando comparadas ao EPS. O conteúdo de proteínas, 6,3% na farinha da casca de pitaya (UTPOTT *et al.*, 2020) e de 13 a 18% no farelo de trigo (JIMENEZ-PULIDO *et al.*, 2022) pode ter contribuído para melhorar a resistência e reduzir a fragilidade das bandejas, pois elas são afetadas pelo calor, resultando em uma reconstituição das ligações com a matriz polimérica.

Essa mudança nas ligações, em conjunto com o conteúdo de fibra no resíduo podem ter resultado na formação de bandejas menos quebradiças (MACHADO; BENELLI; TESSARO, 2017).

O módulo de elasticidade (Módulo de Young) aumentou com o incremento da relação fibra/amido, sendo as bandejas com 50% de fibra aquelas que apresentaram menores valores. Esses resultados mostram que as bandejas fabricadas nesse estudo são mais rígidas que o EPS quando submetidas a uma força longitudinal, suportando cargas mais pesadas, porém com menor elasticidade, ou seja, possuindo uma dureza maior, mas sem apresentar grande deformação quando comparadas ao EPS.

4.1.4.2.3.4. Propriedades de Flexão

A bandeja ao ser flexionada está sujeita a valores altos de estresse em sua superfície. O maior valor de *stress at break* (tabela 5) foi encontrado na bandeja com 50% de farinha de farelo de trigo, porém todas as embalagens desenvolvidas tiveram valores, em um intervalo de 4,90 a 8,27 MPa, significativamente maiores que a amostra de EPS. Valores semelhantes de *stress at break* do EPS aqui analisado, já foram publicados anteriormente por CHIARATHANAKRIT; RIYAJAN; KAEWTATIP, (2018) em bandejas biodegradáveis. Os autores utilizaram 10% de escama de peixe como reforçador em bandejas de amido de mandioca. Foram encontraram valores entre 1,03 e 1,54 MPa para as bandejas de amido e amido com escama de peixe, calcinada a 700 °C por 3 horas, respectivamente. Esses valores são muito inferiores aos encontrados na amostra com 50% de farelo de trigo (8,27 MPa), porém próximos aos encontrados aqui no EPS analisado, demonstrando a alta resistência do composto biodegradável aqui desenvolvido. Resultados semelhantes aos de *stress at break* desse estudo, foram encontrados em bandejas fabricadas a partir de TPS (*blend* de amido de milho e policaprolactona) e adição de 5% a 25% de polpa de soja insolúvel, as quais apresentaram valores entre 2,02 a 6,12 MPa, sendo o maior valor alcançado na amostra com 10% de polpa de soja. Esse estudo sugere que a diminuição encontrada na força de flexão conforme a adição do resíduo de soja é explicada pelo excesso de resíduo adicionado frente a indisponibilidade de locais de reação no TPS (BEHERA; MANNA; DAS, 2022).

Outro estudo que utilizou um prensado de semente de gergelim, em concentrações entre 10 e 40%, em uma matriz de amido de mandioca, encontrou valores entre 1,9 e 5,5 MPa, sendo o maior valor encontrado na amostra com 10% de semente de gergelim e o menor valor na amostra de 40% (MACHADO; BENELLI; TESSARO, 2017). Assim, houve uma relação negativa entre a força de flexão e a adição de sementes de gergelim, assim como os resultados aqui encontrados nas bandejas a partir de farinha de casca de pitaya e de farelo de trigo. Segundo os autores, essa diminuição da força de flexão tem relação com o aumento de células maiores na estrutura interna das bandejas no momento da expansão do material.

Na aferição do *strain at break* os maiores valores foram observados para as embalagens contendo todas as concentrações de farinha de casca de pitaya (média de 1,15%, sem diferença estatística entre elas). Já nas bandejas de farelo de trigo os valores foram menores, entre 0,9 e 0,98%, mas sem diferença significativa entre si. Por fim, todas as bandejas obtiveram resultados significativamente menores que o valor de 6,90% encontrado na bandeja de EPS. Esse resultado era esperado, pois o EPS é conhecido pela sua elasticidade mecânica elevada e as bandejas aqui fabricadas, como outras de resíduos agroindustriais, possuem melhores propriedades de rigidez (ANKESH; JAIKANT; SANJEEV, 2021; TAPIA-BLÁCIDO *et al.*, 2022).

O módulo de Young calculado mostrou que o EPS ainda mantém sua forma durante um tempo maior, sendo mais elástico, pois apresentou resultados significativamente menores que qualquer amostra analisada. Essa análise indicou que as embalagens desenvolvidas suportam uma força de flexão maior que o isopor, entretanto são menos elásticas, ou seja, deformam menos antes da ruptura quando comparadas com o EPS, tradicionalmente utilizado. Fato esse que pode ser explicado pelas ligações de hidrogênio entre o amido e as fibras utilizadas, pois esse tipo de ligação possui uma força elevada (HERSCHLAG; PINNEY, 2018).

4.1.4.2.4. Absorção de água

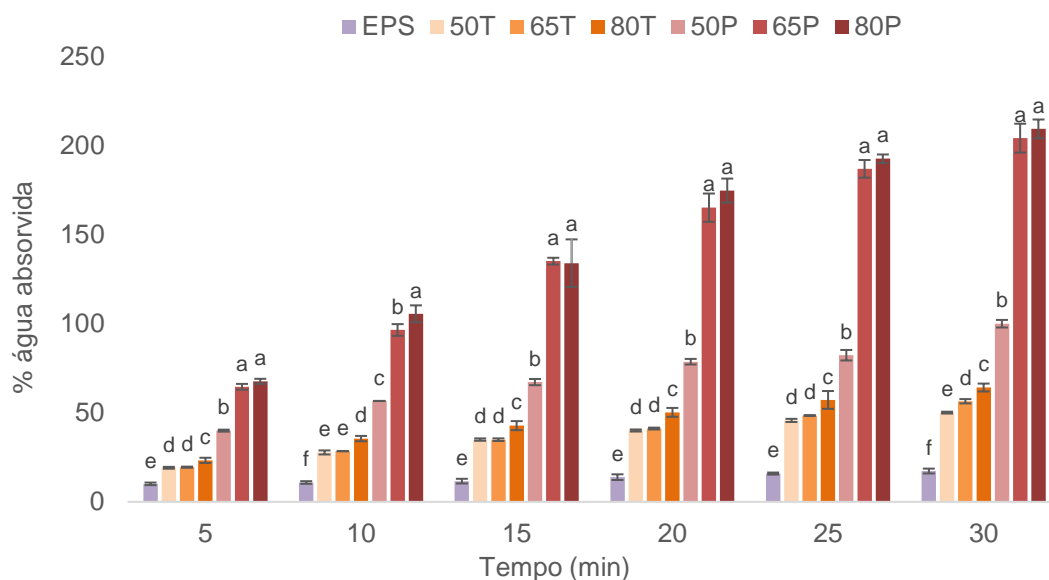
As bandejas mostraram comportamento diverso entre si em relação a absorção de água, sendo aquelas contendo farinha de casca de pitaya as que

apresentaram maior poder de absorção (Figura 1). A farinha da casca de pitaya utilizada absorveu em média 7,97 g de água por grama de produto, por sua vez, o farelo de trigo absorveu, em média, 4,08 g de água conforme capacidade medida anterior a utilização.

A quantidade de água fixada na metodologia para o farelo de trigo e farinha de casca de pitaya foi 3g/g e 4,5g/g, respectivamente: valores inferiores a capacidade total de absorção de água, de modo a promover a viscosidade adequada na elaboração das bandejas. Junto a isso, as bandejas desenvolvidas com farelo de trigo mostraram caráter mais hidrofóbico comparado com as de farinha de casca de pitaya. A característica hidrofílica da farinha de casca de pitaya pode ser explicada pelo menor tamanho das partículas, já que possui tamanho menor que 60 mesh, que aumenta a superfície de contato com a água e por consequência a absorção de água. Além disso, a fibra da casca de pitaya possui grande concentração de fibras solúveis (23,96%), valor muito superior ao do farelo de trigo (2,84%). Devido a esses fatores os resultados encontrados foram divergentes aos da literatura, que indicam que o um aumento da concentração de fibra pode promover uma diminuição da capacidade de absorção de água das bandejas. Diversos estudos encontraram nas propriedades de embalagens uma correlação negativa entre a absorção de água e o aumento do percentual de fibras utilizadas como reforço (ENGEL, Juliana Both; LUCHESE; TESSARO, 2022; FERREIRA, A. *et al.*, 2019; MACHADO; BENELLI; TESSARO, 2017).

Entretanto, um estudo que utilizou fibra de casca de abacaxi como reforçador obteve resultados semelhantes aos encontrados neste trabalho, explicado pelo baixo conteúdo de celulose da fibra e pela maior porosidade das bandejas ao aumentar o percentual de fibra (CABANILLAS *et al.*, 2019). Os resultados encontrados sugerem que as bandejas desenvolvidas nesse estudo devem ser utilizadas em alimentos que possuam baixa liberação de umidade, como grãos, farinhas, ervas secas e assemelhados.

Figura 1 – Percentuais de água absorvida das bandejas de farinha de casca de pitaya e farelo de trigo, entre os diferentes tempos avaliados. EPS: Poliestireno expandido, 50P: amostra com 50% de farinha de casca de pitaya, 65P: amostra com 65% de casca de pitaya, 80P: amostra com 80% de casca de pitaya, 50T: amostra com 50% de farelo de trigo, 65T: amostra com 65% de farelo de trigo, 80T: amostra com 80% de farelo de trigo.



4.1.4.2.5. Análise Térmica

4.1.4.2.5.1. TGA

Para avaliar o efeito das fibras e do amido em um aumento gradual de temperatura foi feita a análise termogravimétrica sob atmosfera de nitrogênio. A primeira perda de massa, de aproximadamente 20% do peso inicial, ocorreu por volta de 110°C, e foi causada pela evaporação de água e pela decomposição do glicerol (SUN *et al.*, 2021). Essa perda de massa pode ser devido a difusão das moléculas de água relacionadas a densidade (CRUZ-TIRADO, J. P. *et al.*, 2019). A perda de massa principal, de 60% da massa inicial, ocorreu entre 250 e 350°C. Essa perda massiva de peso das bandejas ocorre pela decomposição do amido e das fibras que formam as embalagens, além da formação de levoglucosana e derivados pela reação de pirólise

A terceira e última perda de massa, que ocorreu em torno dos 400°C até o fim da análise, causada pela carbonização das bandejas. Resultados semelhantes foram relatados por inúmeros estudos com amido e fibras (ENGEL, *et al.*, 2020; KAEWTATIP; CHIARATHANAKRIT; RIYAJAN, 2018; ROMAN-BRITO *et al.*, 2020).

A perda de massa do EPS ocorreu de forma muito mais homogênea, tendo entre 380°C e 425°C seu único pico de decomposição do material. Isso acontece porque a formulação do EPS possui uma homogeneidade muito maior quando comparada ao material biodegradável. O EPS não possui estruturas intermediárias, como o amido, fibra ou glicerol, que possam afetar significativamente a perda de massa da amostra (Barrera Castro *et al.*, 2017a).

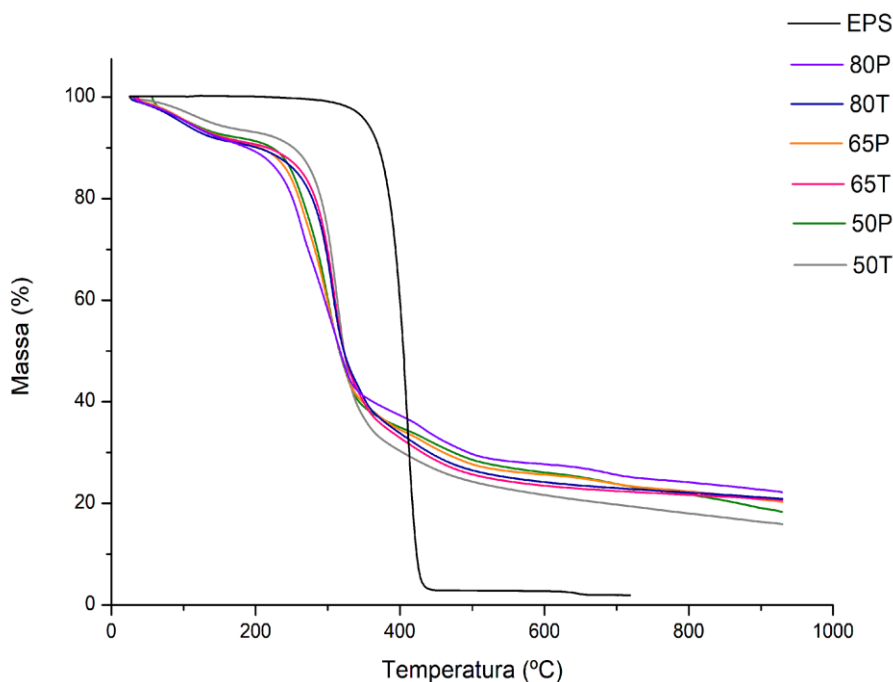


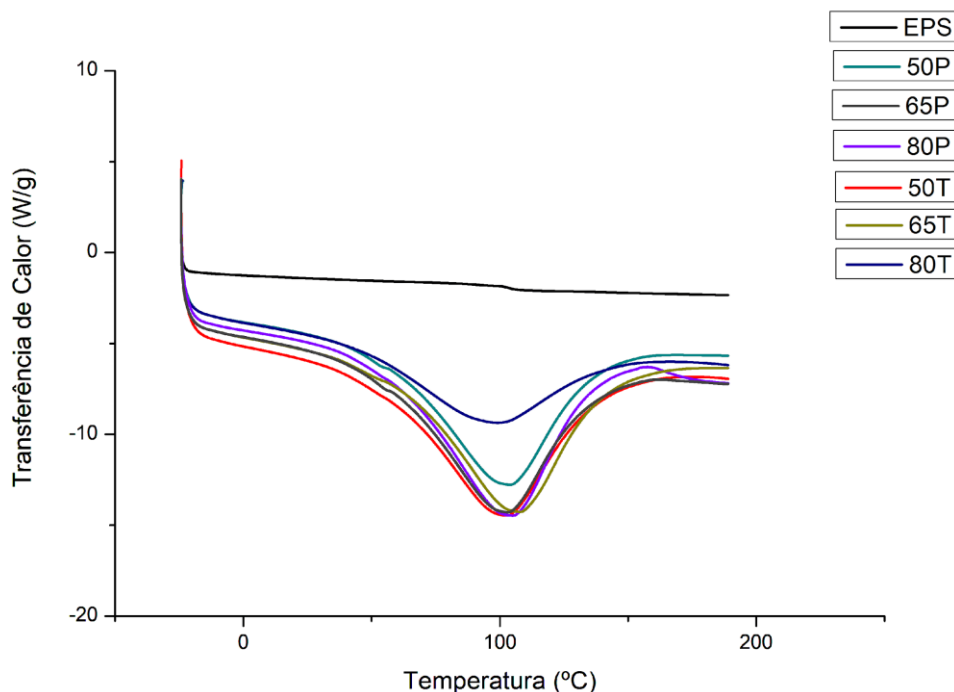
Figura 2. Análise termogravimétrica das diferentes bandejas produzidas com percentuais de farinha de casca de pitaya e farelo de trigo. EPS: Poliestireno expandido, 50P: amostra com 50% de farinha de casca de pitaya, 65P: amostra com 65% de casca de pitaya, 80P: amostra com 80% de casca de pitaya, 50T: amostra com 50% de farelo de trigo, 65T: amostra com 65% de farelo de trigo, 80T: amostra com 80% de farelo de trigo.

4.1.4.2.5.2. DSC

Através dos resultados da análise de DSC, pode-se observar que a volatilização da água aconteceu por volta dos 100°C, resultado esse corroborado pela análise de TGA. Entretanto, após essa evaporação da umidade o gráfico não mostrou nenhuma outra perda de componente, a qual deve acontecer em temperaturas maiores, também mostrado visualmente pelo TGA por volta de 200°C. O EPS não apresentou mudança de forma física, mostrando que é resistente a temperaturas mais altas quando comparado as embalagens biodegradáveis desenvolvidas. Esse fato ocorre pela maior homogeneidade do

EPS, uma vez que é derivado da polimerização do feniletano, tendo em sua formulação somente esse composto (Castro *et al.*, 2017b).

Figura 3. Análise de *Differential Scanning Calorimetry* das diferentes bandejas produzidas com percentuais



de farinha de casca de pitaya e farelo de trigo. EPS: Poliestireno expandido, 50P: amostra com 50% de farinha de casca de pitaya, 65P: amostra com 65% de casca de pitaya, 80P: amostra com 80% de casca de pitaya, 50T: amostra com 50% de farelo de trigo, 65T: amostra com 65% de farelo de trigo, 80T: amostra com 80% de farelo de trigo. Tm: Temperatura de fusão e ΔH : variação da entalpia.

Tabela 6 - Análise da *Melting Temperature* das diferentes bandejas produzidas com percentuais de farinha de casca de pitaya e farelo de trigo. EPS: Poliestireno expandido, 50P: amostra com 50% de farinha de casca de pitaya, 65P: amostra com 65% de casca de pitaya, 80P: amostra com 80% de casca de pitaya, 50T: amostra com 50% de farelo de trigo, 65T: amostra com 65% de farelo de trigo, 80T: amostra com 80% de farelo de trigo. Tm: Temperatura de fusão e ΔH : variação da entalpia.

Amostras	Tm(°C)	ΔH (J/g)
50T	102,31	419,3
65T	107,46	407,1
80T	98,02	243,8
50P	103,66	388,6
65P	102,82	387,5
80P	104,75	437,7
EPS	106,79	0,6568

4.1.4.2.6. Análise Morfológica

A amostra de EPS foi a que apresentou superfície mais homogênea e sem acidentes, já as bandejas produzidas com fibras apresentaram superfície com

maior concentração de irregularidades. Também foi observado que existem diferenças visuais entre as três concentrações das fibras utilizadas, sendo a amostra com 50% de farinha de casca de pitaya a mais semelhante ao EPS. Esse resultado pode ser explicado pela diferença entre as partículas das diferentes fibras, onde as fibras da farinha da casca de pitaya eram menores comparadas com a farinha do farelo de trigo.

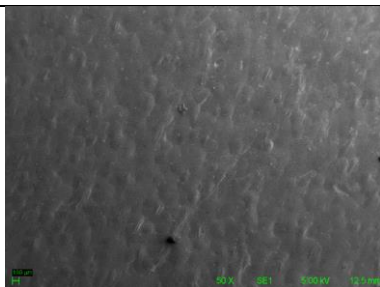
Essa diferença propiciou a formação de uma bandeja com superfície mais plana e homogênea. MACHADO; BENELLI; TESSARO, (2020) também encontraram uma superfície mais rugosa em bandejas desenvolvidas com amido de mandioca, contendo 24% de pele de amendoim. Os autores concluíram que a presença de aditivos na formulação pode ocasionar um efeito adverso na gelatinização do amido. De forma geral, conforme aumentou a proporção fibra/amido foram observadas superfícies mais irregulares e rugosas. Logo, pode-se inferir que a alta concentração de fibra proporciona superfícies irregulares a embalagem, devido à menor qualidade da rede formada com o amido, resultado de uma ligação fibra/polímero prejudicada. Esse resultado concorda com os valores encontrados nas propriedades mecânicas das bandejas já que conforme aumentou-se a inserção das fibras, as bandejas se mostraram mais frágeis e passíveis de ruptura.

No corte transversal foi visto que o EPS possui células em maior número, porém de menor tamanho que as demais bandejas. As imagens demonstram que ao aumentar a concentração de fibra, o corte transversal mostrou um interior mais desnivelado com uma estrutura que se assemelha a lâminas sobrepostas. Outros estudos citam uma estrutura semelhante a um sanduíche, fato esse que pôde ser melhor observado com 65% de fibra. As imagens mostraram resultados que corroboram os valores encontrados nas propriedades mecânicas, pois ao aumentar a razão fibra/amido tais valores diminuíram resultando numa bandeja mais quebradiça e menos resistente. Não foi possível observar as partículas de farinha de casca de pitaya ou de farelo de trigo, demonstrando boa adesão entre essas e o amido.

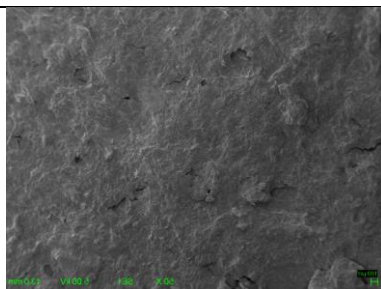
Figura 4 – Microscopia eletrônica de varredura com magnificação de 50x. da superfície das bandejas. EPS: Poliestireno expandido, 50P: amostra com 50% de farinha de casca de pitaya, 65P: amostra com 65% de casca de pitaya, 80P: amostra com 80% de casca de pitaya, 50T: amostra com 50% de farelo de trigo, 65T: amostra com 65% de farelo de trigo, 80T: amostra com 80% de farelo de trigo.

Superfície

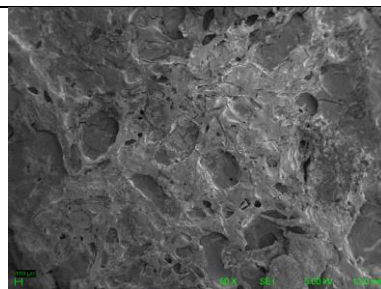
EPS



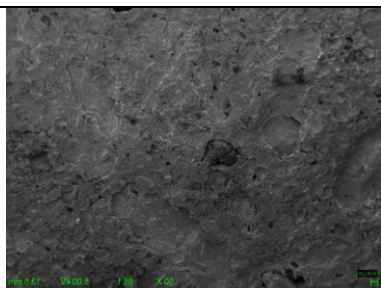
50P



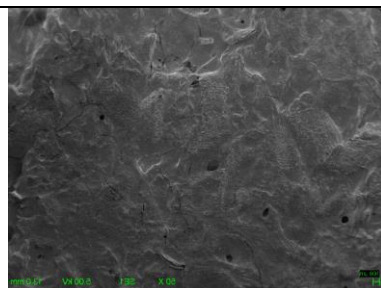
50T



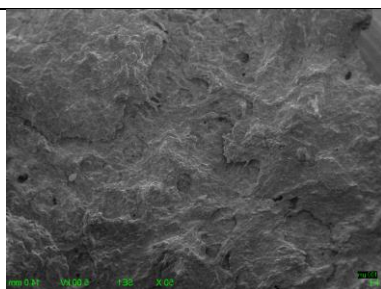
65P



65T



80P



80T

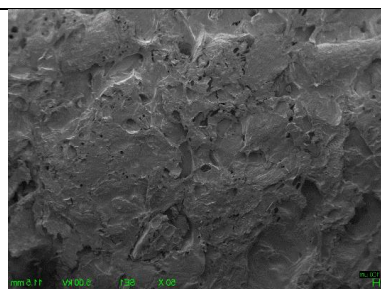
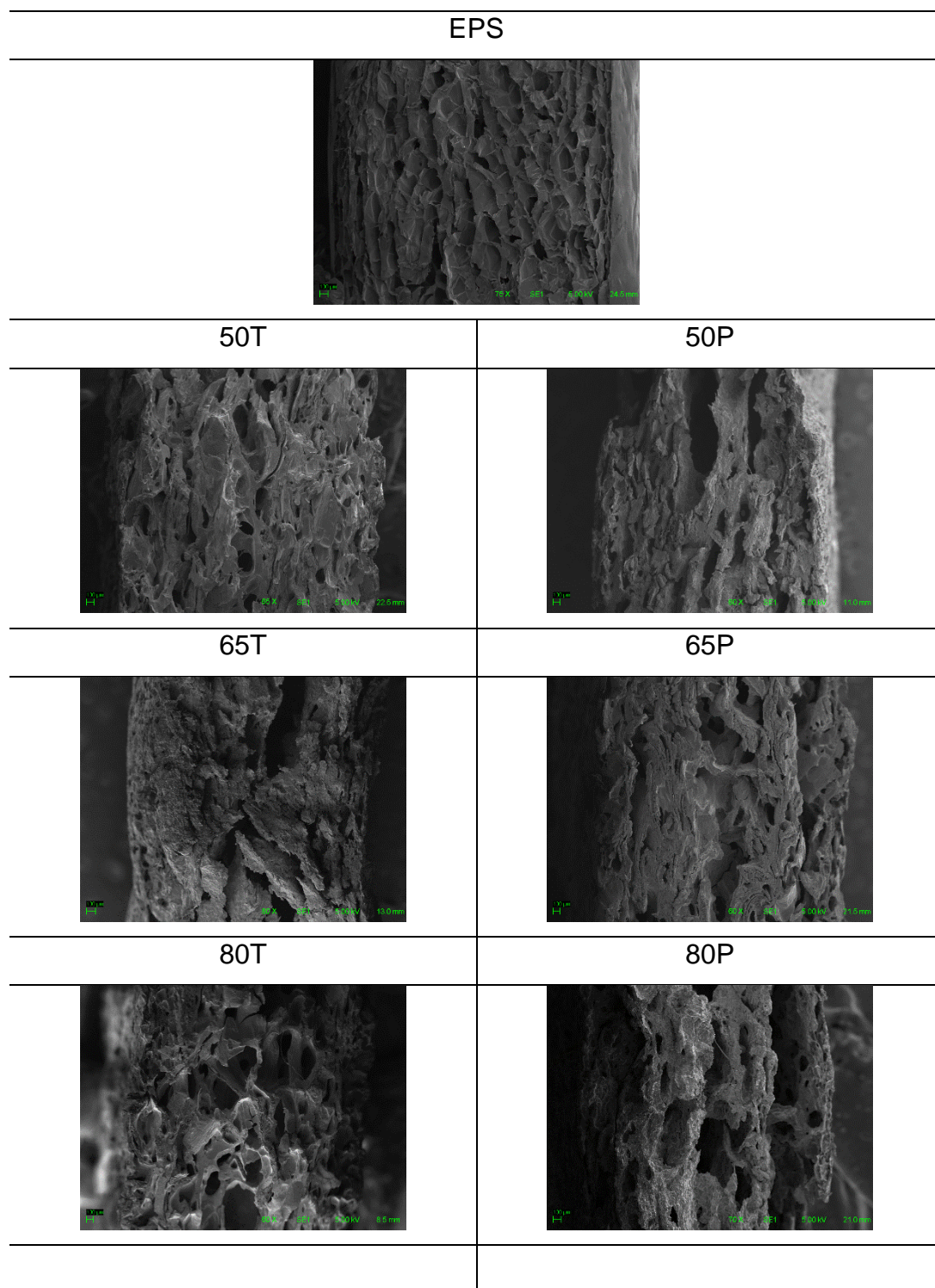


Figura 5 – Microscopia eletrônica de varredura com magnificação entre 50x.e 85x do corte lateral das bandejas EPS: Poliestireno expandido, 50P: amostra com 50% de farinha de casca de pitaya, 65P: amostra com 65% de casca de pitaya, 80P: amostra com 80% de casca de pitaya, 50T: amostra com 50% de farelo de trigo, 65T: amostra com 65% de farelo de trigo, 80T: amostra com 80% de farelo de trigo.

Corte Transversal



4.1.4.2.7. Biodegradabilidade

Biodegradável é o composto que pode ser totalmente degradado por microrganismos em tempo razoável (VIEYRA *et al.*, 2022). Essa característica pode ser influenciada pela morfologia das bandejas, pois células interiores maiores aumenta a probabilidade de ação pelos microrganismos do solo e conseqüentemente maior degradação. Além disso, quanto maior for o número de células, aumenta a superfície de contato amostra-enzima, que facilita a deterioração (ENGEL; AMBROSI; TESSARO, 2019). A degradação das bandejas testadas atingiu em média mais de 50% do seu peso inicial perdido aos 49 dias.

Vale salientar que devido a composição majoritária das bandejas ser de resíduos de alimentos, as mesmas podem servir como adubo orgânico para o solo. Cascas de frutas e farelo de cereais são degradados por microrganismos aeróbios, sendo ricos em nitrogênio, nutriente mais utilizado pelas plantas no seu processo de crescimento. Assim, as bandejas deste estudo podem ajudar a diminuir o impacto ambiental gerado pela poluição do EPS descartado e ainda gerar nutrientes que servem como adubo (BERGSTRAND, 2022; SIDDEEG; TAHOON; BEN REBAH, 2020; TAGHIAN DINANI; VAN DER GOOT, 2022).

Ao longo da análise as amostras absorveram umidade, o que as tornou mais macias e inchadas, fato esse que era observado no momento em que amostras foram desenterradas e avaliadas. No entanto, ao serem secas em estufa elas voltavam a sua textura e dureza originais. A degradação em si foi observada semanalmente pela diminuição da espessura das amostras, esse fato as deixava mais passíveis de quebra e fragmentação quando foram retiradas da tela de proteção (Figura 7).

A textura também apresentou mudanças graduais, evoluindo para uma superfície mais friável conforme avançaram as semanas do estudo. Junto a isso, a Figura 6 mostra que as variações entre as perdas de peso das amostras eram maiores até a quarta semana de estudo, o que tendeu a diminuir ao final da avaliação. Pode-se observar que a partir de 7 dias as amostras já mostravam sinais de degradação, sendo que as produzidas com farelo de trigo mostravam perda de peso considerável, com valores próximos a 30%. Entretanto, ao final da análise, foram as amostras de farinha de casca de pitaya que se mostravam

mais quebradiças, fator explicado pela sua espessura inicial menor. Entre a terceira e a quarta semana de análises foi observado que as amostras estavam fortemente aderidas a tela de proteção utilizada, fator esse que causou o rompimento de algumas amostras quando esse invólucro era aberto para fotografar.

Figura 6 - Perda de peso das diferentes amostras das embalagens ao longo das semanas do estudo da biodegradabilidade. 50P: amostra com 50% de farinha de casca de pitaya, 65P: amostra com 65% de casca de pitaya, 80P: amostra com 80% de casca de pitaya, 50T: amostra com 50% de farelo de trigo, 65T: amostra com 65% de farelo de trigo, 80T: amostra com 80% de farelo de trigo.

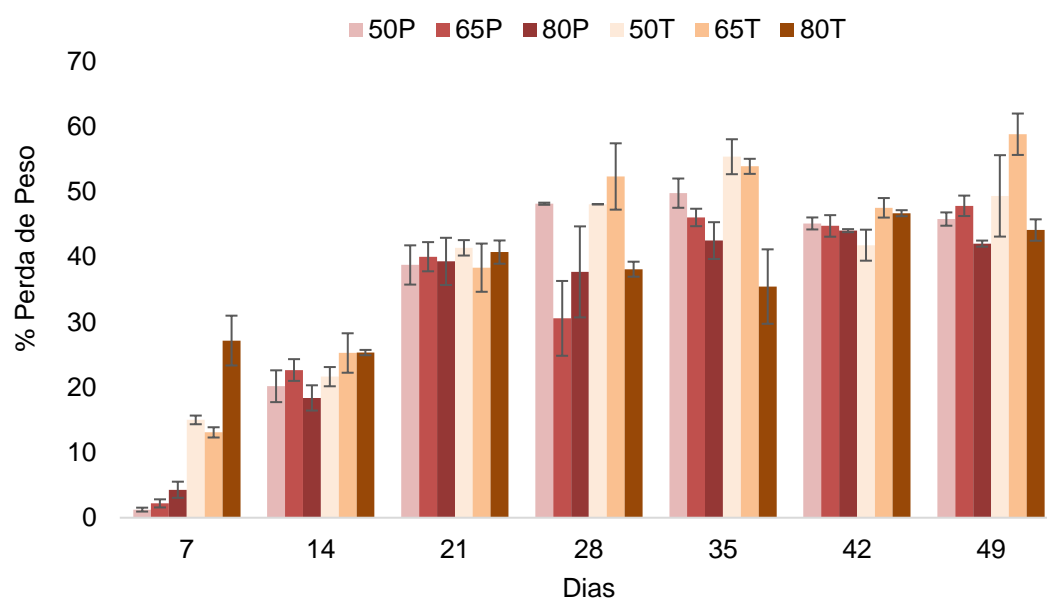
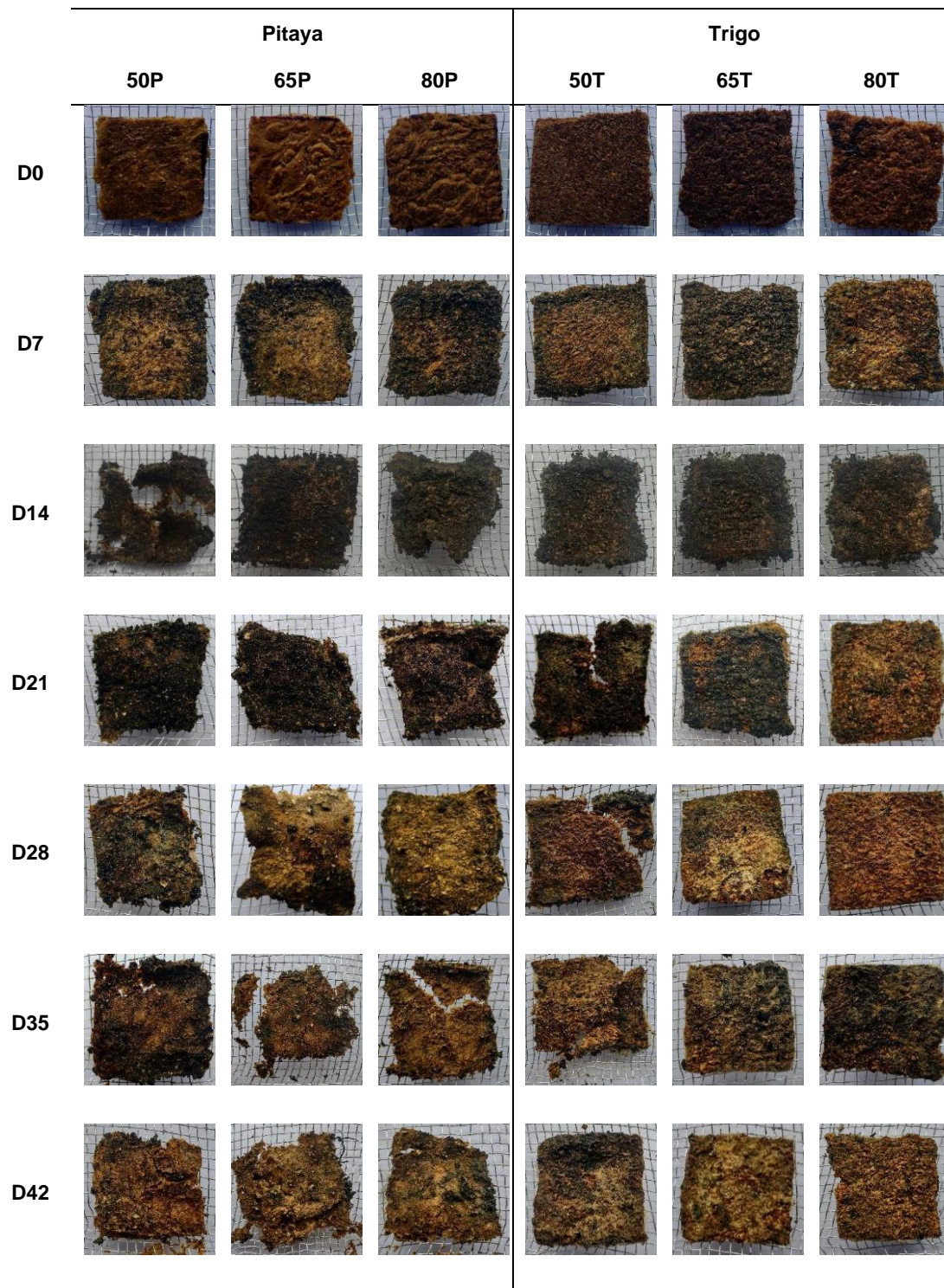


Figura 7 - Imagens da análise de biodegradabilidade das embalagens produzidas a partir da farinha de casca de pitaya e farelo de trigo ao longo das 7 semanas de análise. EPS: Poliestireno expandido, 50P: amostra com 50% de farinha de casca de pitaya, 65P: amostra com 65% de casca de pitaya, 80P: amostra com 80% de casca de pitaya, 50T: amostra com 50% de farelo de trigo, 65T: amostra com 65% de farelo de trigo, 80T: amostra com 80% de farelo de trigo. 0D: dia zero, 7D: dia 7, 14D: dia 14, 21D: dia 21, 28D: dia 28, 35D: dia 35, 42D: dia 42, 49D: dia 49.



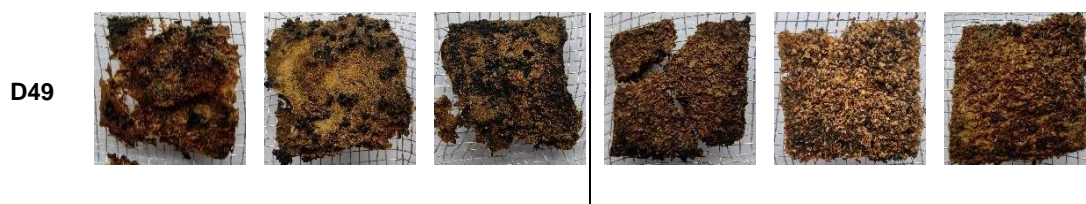


Figura 5 - Imagens da análise de biodegradabilidade das embalagens produzidas a partir da farinha de casca de pitaya e farelo de trigo ao longo das 7 semanas de análise. EPS: Poliestireno expandido, 50P: amostra com 50% de farinha de casca de pitaya, 65P: amostra com 65% de casca de pitaya, 80P: amostra com 80% de casca de pitaya, 50T: amostra com 50% de farelo de trigo, 65T: amostra com 65% de farelo de trigo, 80T: amostra com 80% de farelo de trigo. 0D: dia zero, 7D: dia 7, 14D: dia 14, 21D: dia 21, 28D: dia 28, 35D, dia 35, 42D, dia 42, 49D: dia 49.

4.1.5. CONCLUSÃO

As bandejas biodegradáveis com farinha de farelo de trigo superaram aquelas com farinha de casca de pitaya e o EPS em propriedades mecânicas. A bandeja com 50% de farelo de trigo suportou mais deformação e tensão que o EPS e embora menos elásticas, foram mais rígidas durante a flexão. Sua alta hidrofília sugere melhor uso para alimentos secos. Embalagens com 50% de sólidos de farelo de trigo e casca de pitaya mostraram os resultados mais promissores. Isso sugere que embalagens sustentáveis podem ser feitas com metade da matéria-prima de resíduos agroindustriais. Sua rápida biodegradabilidade as torna ideais para embalagens de uso único, perdendo metade do peso inicial em 49 dias sem impactos ambientais prejudiciais. Estes resultados destacam a viabilidade de embalagens feitas de subprodutos, que podem ser compostadas após o uso, fechando o ciclo na cadeia produtiva.

4.1.6. REFERÊNCIAS

AGÜERO, Á. et al. Valorization of linen processing by-products for the development of injection-molded green composite pieces of polylactide with improved performance. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 2, 2020.

AMARAWEEERA, S. M. et al. Preparation and Characterization of Dual-Modified Cassava Starch-Based Biodegradable Foams for Sustainable Packaging Applications. 2022.

ANKESH, S.; JAIKANT, K.; SANJEEV, G. PROPERTIES OF EXPANDED POLYSTYRENE (EPS) AND ITS ENVIRONMENTAL EFFECTS. **Advances and Applications in Mathematical Sciences**, v. 20, n. 10, p. 2151–2162, 2021.

ASSIS, R. Q. et al. Synthesis of biodegradable films based on cassava starch containing free and nanoencapsulated β -carotene. **Packaging Technology and Science**, v. 31, n. 3, p. 157–166, 2018.

BARRERA CASTRO, G. et al. Production and characterization of the mechanical and thermal properties of expanded polystyrene with recycled material // Producción y caracterización de las propiedades mecánicas y térmicas de poliestireno expandido con material reciclado. **Univ**, v. 21, n. 2, p. 177–194, 2017a.

BARRERA CASTRO, G. et al. Production and characterization of the mechanical and thermal properties of expanded polystyrene with recycled material // Producción y caracterización de las propiedades mecánicas y térmicas de poliestireno expandido con material reciclado. **Univ**, v. 21, n. 2, p. 177–194, 2017b.

BEHERA, A. K.; MANNA, S.; DAS, N. Effect of Soy Waste/Cellulose on Mechanical, Water Sorption, and Biodegradation Properties of Thermoplastic Starch Composites. **Starch/Staerke**, v. 74, n. 1–2, p. 1–7, 2022.

BERGEL, B. F.; ARAUJO, L. L.; SANTANA, R. M. C. Effects of the addition of cotton fibers and cotton microfibers on the structure and mechanical properties of starch foams made from potato starch. **Carbohydrate Polymer Technologies and Applications**, v. 2, p. 100167, 2021.

BERGSTRAND, K. J. Organic fertilizers in greenhouse production systems – a review. **Scientia Horticulturae**, v. 295, n. December 2021, p. 110855, 2022.

CABANILLAS, A. et al. Pineapple shell fiber as reinforcement in cassava starch foam trays. **Polymers and Polymer Composites**, v. 27, n. 8, p. 496–506, 2019.

CHEN, Z. et al. Wheat bran layers: composition, structure, fractionation, and potential uses in foods. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 0, n. 0, p. 1–24, 2023.

CHIARATHANAKRIT, C.; RIYAJAN, S. A.; KAEWTATIP, K. Transforming fish scale waste into an efficient filler for starch foam. **Carbohydrate Polymers**, v. 188, n. January, p. 48–53, 2018.

CHOTIPRAYON, P.; CHAISAWAD, B.; YOKSAN, R. Thermoplastic cassava starch/poly(lactic acid) blend reinforced with coir fibres. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 156, p. 960–968, 2020.

CRUZ-TIRADO, J. P. et al. The addition of sugarcane bagasse and asparagus peel enhances the properties of sweet potato starch foams. **Packaging Technology and Science**, v. 32, n. 5, p. 227–237, 2019a.

CRUZ-TIRADO, J. P. et al. Biodegradable foam tray based on starches isolated from different Peruvian species. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 125, p. 800–807, 2019b.

DE SOUZA, G. B. et al. Método alternativo de fibra em detergente neutro e detergente ácido. **Embrapa Pecuária Sudeste. Boletim de Pesquisa**, p. 21, 1999.

ENGEL, J. B. et al. Reuse of Different Agroindustrial Wastes: Pinhão and Pecan Nutshells Incorporated into Biocomposites Using Thermocompression. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 28, n. 5, p. 1431–1440, 2020.

ENGEL, J. B.; AMBROSI, A.; TESSARO, I. C. Development of biodegradable starch-based foams incorporated with grape stalks for food packaging. **Carbohydrate Polymers**, v. 225, n. August, p. 115234, 2019.

ENGEL, J. B.; LUCHESE, C. L.; TESSARO, I. C. Making the reuse of agro-industrial wastes a reality for starch-based packaging sector: A storage case study of carrot cake and cherry tomatoes. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 206, n. March, p. 740–749, 2022.

FERREIRA, A. et al. Biosourced Disposable Trays Made of Brewer's Spent. **Polymers**, v. 11, n. 5, p. 1–14, 2019.

FERREIRA, V. C. et al. An updated review of recent applications and future perspectives on the sustainable valorization of pitaya (*Hylocereus* spp.) by-products. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 33, n. March, p. 101070, 2023.

GARCÍA-CRUZ, L. et al. Cultivation, quality attributes, postharvest behavior, bioactive compounds, and uses of *Stenocereus*: A review. **Scientia Horticulturae**, v. 304, n. July, 2022.

HERSCHLAG, D.; PINNEY, M. M. Hydrogen Bonds: Simple after All? **Biochemistry**, v. 57, n. 24, p. 3338–3352, 2018.

JIMENEZ-PULIDO, I. J. et al. Impact of Protein Content on the Antioxidants, Anti-Inflammatory Properties and Glycemic Index of Wheat and Wheat Bran. **Foods**, v. 11, n. 14, 2022.

KAEWATIP, K.; CHIARATHANAKRIT, C.; RIYAJAN, S. A. The effects of egg shell and shrimp shell on the properties of baked starch foam. **Powder Technology**, v. 335, p. 354–359, 2018.

KHOO, H. E. et al. Betacyanins and Anthocyanins in Pulp and Peel of Red Pitaya (*Hylocereus polyrhizus* cv. Jindu), Inhibition of Oxidative Stress, Lipid Reducing, and Cytotoxic Effects. **Frontiers in Nutrition**, v. 9, n. June, p. 1–11, 2022.

KIM, S.; PARK, J.-B.; HWANG, I.-K. Quality Attributes of Various Varieties of Korean Red Pepper Powders (*Capsicum annuum* L.) and Color Stability During Sunlight Exposure. **Food Chemistry and Toxicology Quality**, v. 67, n. 8, p. 2957–2961, 2002.

LAI, S. et al. Micronization Effects on Structural, Functional, and Antioxidant Properties of Wheat Bran. **Foods**, v. 12, n. 98, p. 20 pages, 2023.

MACHADO, C. M.; BENELLI, P.; TESSARO, I. C. Sesame cake incorporation on

cassava starch foams for packaging use. **Industrial Crops and Products**, v. 102, p. 115–121, 2017.

MACHADO, C. M.; BENELLI, P.; TESSARO, I. C. Study of interactions between cassava starch and peanut skin on biodegradable foams. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 147, p. 1343–1353, 2020.

NUGROHO, A. et al. Enhanced mechanical and physical properties of starch foam from the combination of water hyacinth fiber (*Eichhornia crassipes*) and polyvinyl alcohol. **Industrial Crops and Products**, v. 183, n. April, 2022.

OLIVER-ORTEGA, H. et al. Nanocomposites materials of pla reinforced with nanoclays using a masterbatch technology: A study of the mechanical performance and its sustainability. **Polymers**, v. 13, n. 13, 2021.

PAGANO, M. et al. Insights on the acetic acid pretreatment of wheat straw: Changes induced in the biomass properties and benefits for the bio-oil production by pyrolysis. **Chemical Engineering Journal**, v. 454, n. November 2022, 2023.

RODRIGUES, N. H. P. et al. Starch-based foam packaging developed from a by-product of potato industrialization (*Solanum tuberosum* L.). **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 10, n. 7, 2020.

ROMAN-BRITO, J. A. et al. Physicomechanical Properties and Biodegradation Rate of Composites Made from Plantain and Chayotextle Starch/Fiber. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 28, n. 10, p. 2710–2719, 2020.

SIDDEEG, S. M.; TAHOON, M. A.; BEN REBAH, F. Agro-industrial waste materials and wastewater as growth media for microbial bioflocculants production: A review. **Materials Research Express**, v. 7, n. 1, 2020.

SUN, K. Q. et al. CaCO₃ blowing agent mixing method for biomass composites improved buffer packaging performance. **RSC Advances**, v. 11, n. 4, p. 2501–2511, 2021.

SZTUPECKI, W. et al. **Functional and Nutritional Characteristics of Natural or Modified Wheat Bran Non-Starch Polysaccharides: A Literature Review**. v. 12, 2021.

TAGHIAN DINANI, S.; VAN DER GOOT, A. J. Challenges and solutions of extracting value-added ingredients from fruit and vegetable by-products: a review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 63, n. 25, p. 7749–7771, 2022.

TAHARUDDIN, N. H. et al. Characterization of Potential Cellulose from *Hylocereus Polyrrhizus* (Dragon Fruit) peel: A Study on Physicochemical and Thermal Properties. **Journal of Renewable Materials**, v. 11, n. 1, p. 131–145, 2023.

TAPIA-BLÁCIDO, D. R. et al. Trends and challenges of starch-based foams for

use as food packaging and food container. **Trends in Food Science and Technology**, v. 119, n. January 2021, p. 257–271, 2022.

TURNER, A. Foamed Polystyrene in the Marine Environment: Sources, Additives, Transport, Behavior, and Impacts. **Environmental Science and Technology**, v. 54, n. 17, p. 10411–10420, 2020.

UTPOTT, M. et al. Characterization and application of red pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) peel powder as a fat replacer in ice cream. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 44, n. 5, p. 1–10, 2020.

VARGAS-TORRES, A. et al. Biodegradable baked foam made with chayotextle starch mixed with plantain flour and wood fiber. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 134, n. 48, p. 1–8, 2017.

XU, F. et al. Improved production of levoglucosan and levoglucosenone from acid-impregnated cellulose via fast pyrolysis. **Cellulose**, v. 29, n. 3, p. 1463–1472, 2022.

4.2. EXPLORANDO NOVAS POSSIBILIDADES: BANDEJAS BIODEGRADÁVEIS A BASE DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS COM COBERTURA IMPERMEABILIZANTE DE CERA DE CARNAÚBA

Alessandra Teresinha Wolter, Alessandro de Oliveira Rios, Sandro Amico e Simone Hickmann Flôres.

As embalagens biodegradáveis são um importante avanço em prol da diminuição da poluição gerada pelos plásticos, porém possuem pouca resistência a absorção de umidade. Para contornar essa desvantagem foi incorporada cera de carnaúba às embalagens já produzidas a base de farelo de trigo e farinha de casca de pitaya. A cera demonstrou excelente poder impermeabilizante, selando a superfície de ambas as embalagens, com manutenção da absorção de água a no máximo 5%. As propriedades mecânicas foram analisadas e mostraram melhores resultados para os parâmetros de tração, flexão, dureza e impacto nas amostras com incorporação da cera, demonstrando boa aderência e funcionalidade da cera nas embalagens. As amostras perderam mais de 50% do seu peso no período de 49 dias, demonstrando alto poder de degradação. A bandeja de farelo de trigo foi selecionada para avaliar a aplicabilidade, utilizando brócolis como matéria prima e apresentou viabilidade no acondicionamento desse vegetal, com manutenção da resistência e do formato durante o armazenamento a 5 °C por até 10 dias. As embalagens impermeabilizadas com cera de carnaúba demonstraram boas propriedades mecânicas e foram adequadas para armazenamento de alimentos com elevada umidade.

Palavras chaves: Biodegradabilidade, embalagens biodegradáveis, carnaúba.

4.2.1. INTRODUÇÃO

A tecnologia e a inovação na indústria são essenciais para a competitividade, de tal modo que setores de pesquisa e desenvolvimento buscam oferecer alimentos seguros, com alto teor nutricional para atender a demanda cada vez mais exigente do consumidor. Neste sentido, a constante evolução das embalagens tornou-se um dos aspectos importantes para o seu crescimento, para facilitar a conservação, o transporte e o armazenando de alimentos frescos ou processados (SALGADO *et al.*, 2021).

A maior parte das embalagens para alimentos são denominadas de embalagens de uso único, por serem utilizadas somente uma vez antes do descarte. Quando tais embalagens não são devidamente destinadas ao processo de reciclagem proporcionam um aumento de resíduos descartados no planeta, fato que tem se tornado um problema ambiental de enorme relevância (COELHO, P. M. *et al.*, 2020).

Dessa forma, a constante utilização de plásticos derivados do petróleo para produção de embalagens tornou-se uma preocupação ambiental global de proporções significativas. A elevada produção desse tipo de plástico associado à sua conveniência e praticidade de utilização, têm resultado em uma quantidade alarmante de resíduos que persistem por séculos, com prejuízos para os ecossistemas marinhos, animais selvagens e até mesmo para a saúde humana (GROH *et al.*, 2019).

Dos resíduos de plásticos mundiais, as embalagens são a maior parcela, responsável por quase 50% do total e estima-se que as embalagens utilizadas em alimentos representem mais de um terço do total de embalagens (NCUBE *et al.*, 2021). Diante desse cenário, a transição para o uso de embalagens biodegradáveis surge como uma solução para propiciar a redução da pegada de carbono, como preservação do meio ambiente para as gerações futuras.

As embalagens biodegradáveis podem ser produzidas a partir de diversos polímeros, como gelatina, PLA (ácido polilático), quitosana, amido, entre outros. Ainda, podem ser adicionados resíduos industriais na busca por diminuir os custos de produção, com reaproveitamento de materiais que seriam descartados.

Entretanto, há necessidade de melhorar algumas propriedades importantes das embalagens biodegradáveis atualmente produzidas como redução da fragilidade e da absorção de água. Uma alternativa para melhorar tais propriedades é a impermeabilização das embalagens com ceras, como cera de abelha, carnaúba, entre outras (Bergel; da Luz; Santana, 2018; Chaireh; Ngasatool; Kaewtatip, 2020; de Freitas *et al.*, 2019a; Righetti *et al.*, 2019).

Em um estudo anterior foram desenvolvidas embalagens rígidas de farelo de trigo e casca de pitaya, com importantes propriedades que mostram a resistência das bandejas, sendo superior à embalagem largamente utilizada atualmente, o EPS (Poliestireno expandido). Esse novo material permite o acondicionamento seguro dos alimentos, entregando melhores escolhas para o consumidor e também para o planeta, pois possui bons resultados de biodegradabilidade, diminuindo, dessa forma, a poluição ambiental.

Assim, o objetivo do presente estudo foi a incorporação de cera de carnaúba em embalagens biodegradáveis a base de farelo de trigo e casca de

pitaya, com a presença de amido de milho, para diminuir a característica hidrofílica da bandeja, com manutenção das propriedades mecânicas necessárias para o acondicionamento de alimentos. Junto a isso, a bandeja será utilizada e testada quando as suas propriedades mecânicas no armazenamento de brócolis.

4.2.2. MATERIAL E MÉTODOS

4.2.2.1. Material

Foram empregados ingredientes de diversas fontes para produção das bandejas biodegradáveis. O amido de milho, proveniente da Marca Fritz & Frida, caracterizado por 26% de amilose e 12% de umidade, foi adquirido no mercado local. A casca da pitaya foi doada pela empresa Pitaya do Brasil, com sede em Novo Hamburgo, Brasil. A fibra de trigo foi fornecida pela indústria Moinho do Nordeste, situada em Antônio Prado, Brasil. Além disso, foram utilizados glicerol, adquirido da empresa Dinâmica (São Paulo, Brasil), goma-guar, adquirida da marca Êxodo Científica (São Paulo, Brasil), como agente espessante, e estearato de magnésio, marca Êxodo Científica (São Paulo, Brasil), utilizado como desmoldante.

4.2.2.2. Métodos

4.2.2.2.1. Preparo das fibras provenientes dos resíduos agroindustriais

A casca *in natura* de pitaya passou por um processo de limpeza, sendo lavada em água corrente e depois higienizada com hipoclorito de sódio (1,5%). Em seguida, foi cortada em pedaços de aproximadamente 2 cm x 3 cm e submetida à secagem em estufa com circulação de ar a 65°C, (NL-82/100, New Lab, Brasil) durante 24 horas. Posteriormente, as cascas foram moídas em um moinho de facas (SL-31, Solab, Brasil) e padronizadas através de uma peneira de malha com abertura inferior a 60 Mesh. A fibra de trigo foi submetida a um processo de secagem em estufa a 105°C, (B4-AFD, da DeLeo, Brasil) por um período de 12 horas, visando eliminar qualquer resíduo de umidade. Em seguida, a fibra foi peneirada até atingir uma granulometria inferior a 20 Mesh. As fibras processadas foram armazenadas em sacos de nylon ou polietileno,

hermeticamente selados a vácuo, e mantidos em freezer a -18°C até o momento de sua utilização.

4.2.2.2.2. Elaboração da embalagem rígida

A elaboração das embalagens seguiu a metodologia do primeiro artigo, descrita abaixo. Foram elaboradas 2 formulações (Tabela 1) com combinações de resíduo/amido na proporção 50 % de amido de milho e 50 % de fibra (farelo de trigo e farinha de casca de pitaya). Foram fixadas as quantidades de 4,5g de água por grama de farinha de casca de pitaya e 3g de água por grama de fibra de trigo, de acordo com os dados obtidos previamente para a capacidade de absorção de água. As quantidades de glicerol, goma-guar foram fixadas em 10g, e a quantidade de estearato de magnésio foi fixada em 1g.

Tabela 1 - Formulações das bandejas de amido de milho incorporadas com farelo de trigo e farinha de casca de pitaya.

Amostras	Amido (%)	Farinha de casca de pitaya (%)	Farelo de trigo (%)	Estearato de Magnésio (g)	Goma-Guar (g)	Glicerol (g)	Água (mL)
50P	50	50	0	1	10	10	200
50T	50	0	50	1	10	10	275

50P: amostra com 50% de farinha de casca de pitaya, 50T: amostra com 50% de farelo de trigo.

Os ingredientes foram cuidadosamente homogeneizados em duas etapas para garantir uma distribuição uniforme dos constituintes, utilizando um agitador mecânico (713D, da Fisatom, Brasil). Na primeira etapa, a fibra foi misturada durante 5 minutos com estearato de magnésio, goma-guar e água. Em seguida, foram adicionados o amido e o glicerol, e a mistura foi agitada por mais 10 minutos. Após a homogeneização, a mistura foi colocada em um molde de alumínio pré-aquecido a 210°C , com dimensões de 150 x 150 x 30 mm. Cada molde recebeu 150g de material. Os moldes foram fechados e inseridos em uma prensa hidráulica (MA 098/A 3030, Marconi, Brasil) mantida a uma temperatura de 210°C . O tempo de prensagem foi de 9 minutos para as bandejas contendo farinha de casca de pitaya e de 10 minutos para as bandejas de farelo de trigo. Após a completa expansão do material, as bandejas foram retiradas dos moldes e resfriadas até atingirem a temperatura ambiente.

4.2.2.2.3. Cobertura com cera de carnaúba

As embalagens foram imersas, por 2 minutos, em cera de carnaúba previamente derretida em banho-maria (Q215M2, Quimis, Brasil) a 80 °C, sendo o excesso de cera removido com uma espátula.

4.2.2.3. Caracterização das bandejas

4.2.2.3.1. Densidade

As bandejas foram cortadas em tamanho 2 x 2 cm e tiveram sua densidade aparente calculada utilizando a equação 1. A medição foi efetuada em cinco pontos randômicos de cada bandeja e os resultados foram expressos em g/cm³.

$$\text{Equação 1: } D = \frac{m}{v}$$

Onde D , em g/cm³ é a densidade aparente, m é a massa em gramas de cada amostra e v , o volume foi calculado pela multiplicação da medida da largura, comprimento e espessura em centímetros de cada amostra.

4.2.2.3.2. Espessura

A espessura foi medida com um micrômetro de alta precisão (Digimess, IP40, Brasil) em pelo menos cinco pontos de cada bandeja, sendo os resultados foram expressos em mm.

4.2.2.3.3. Análise colorimétrica

As análises de cor das bandejas foram realizadas utilizando um colorímetro (Miniscan XE, Hunter Lab System, EUA). A escala de cor CIELab foi adotada para medir os parâmetros de cor, onde L^* representa a luminosidade variando de 0 (preto) a 100 (branco), a^* controla a variação de cor entre -a (esverdeado) e +a (avermelhado), e b^* estabelece o alcance de cor entre -b (amarelado) e +b (azulado). A diferença total de cor (ΔE) foi calculada utilizando a equação 2.

$$\text{Equação 2: } \Delta E = \sqrt{[(\Delta L^*)^2] + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

Onde $\Delta L^* = L^* - L_0$; $\Delta a^* = a^* - a_0$; $\Delta b^* = b^* - b_0$. Onde L_0 , a_0 e b_0 são os valores da bandeja de EPS e L^* , a^* e b^* da bandeja biodegradável.

4.2.2.3.4. Propriedades mecânicas

Os testes de flexão foram conduzidos em amostras de dimensões 80 mm x 25 mm x 3 mm, seguindo a norma ASTM D790, utilizando um flexurômetro (3382, Instron, EUA). Foi empregada uma célula de carga de 50 N e o método de curvatura de 3 pontos, com um espaçamento de 4,5 cm e velocidade de 1 mm/s. Os testes de tensão foram realizados com uma cruzeta, utilizando uma velocidade de 10 mm/s. A dureza foi medida utilizando um durômetro (HPE II, Bareiss, Alemanha), de acordo com a norma ASTM 2240. A resistência ao impacto foi avaliada conforme a ASTM D256, (CEAST 9050, Instron, EUA) com a utilização de um martelo de 0,5J. Para cada teste mecânico, pelo menos 5 amostras de dimensões 80 mm x 25 mm foram analisadas. Todos os procedimentos seguiram as normas do American Society for Testing and Materials (ASTM).

4.2.2.3.5. Absorção de água

A absorção de água foi avaliada utilizando o método de Cobb (ABNT, 2011). Amostras com dimensões de 4 cm x 2 cm foram inicialmente pesadas e submersas em 100 mL de água destilada por períodos de 5, 10, 15, 20, 25 e 30 minutos. Após cada intervalo de imersão, o excesso de água foi cuidadosamente removido utilizando papel toalha, e as amostras foram novamente pesadas. A quantidade de água absorvida foi determinada pela diferença entre o peso inicial e final de cada amostra, expressa como a massa de água absorvida pela massa original da amostra, conforme a seguinte fórmula. Cada análise foi realizada em triplicata para garantir a precisão dos resultados.

$$\text{Equação 3: } A\% = \frac{m_f - m_0}{m_0} \times 100$$

Onde $A\%$ é o percentual de água absorvida em relação ao peso inicial, m_0 é a massa em gramas inicial de cada amostra e m_f a massa final, também em gramas, em cada tempo.

4.2.2.3.6. Morfologia

As bandejas foram avaliadas em um microscópio eletrônico de varredura (MEV) (Zeiss MA10, EVO, Alemanha), com aceleração de 5kV e magnificação de 50x, para analisar sua morfologia em alta resolução. As amostras levadas para amplificação no microscópio foram revestidas com uma fina camada de ouro e colocadas em uma câmara a vácuo a fim de serem visualizadas pelo monitor.

4.2.2.3.7. Biodegradabilidade

A biodegradabilidade do material foi investigada por meio de um teste qualitativo e quantitativo, adaptando a metodologia descrita por ASSIS et al. (2018). As bandejas foram cortadas em pedaços de 2 x 2 cm, previamente secas em estufa a 40°C por 24 horas, sendo em seguida, pesadas e totalmente enterradas em composto vegetal. O composto foi distribuído em recipientes separados, cada um com um volume de 162,5 cm³ para cada amostra analisada. Durante o experimento, as amostras foram avaliadas semanalmente de forma visual e quanto à perda de peso. O processo foi conduzido em temperatura ambiente, com a umidade mantida constante através da adição de 10 mL de água duas vezes por semana em cada recipiente. A cada semana, ao longo de um período de 7 semanas, as amostras foram desenterradas, delicadamente limpas, submetidas à secagem em estufa e pesadas.

4.2.2.3.8. Aplicabilidade

As bandejas foram testadas quanto a sua aplicabilidade durante 10 dias, com brócolis comprados em um mercado local. A perda de massa dos brócolis e do sistema brócolis + bandeja, o pH e graus Brix dos brócolis e as propriedades mecânicas da bandeja com farelo de trigo foram avaliadas durante os dias 0, 3, 6 e 10. Os brócolis foram pesados, em porções de 250 gramas, colocados na bandeja e o sistema (brócolis + bandeja) pesado novamente e cobertos com filme de PVC (Policloreto de Vinila). As amostras foram armazenadas a 5 °C e 25 °C, utilizando duas câmaras com foto período e alternância (NL-41-01, New Lab, Brasil), a fim de mimetizar as condições de armazenamento em estabelecimentos comerciais. A temperatura e a umidade relativa das câmaras foram monitoradas diariamente.

4.2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.2.3.1. Espessura e Densidade

A espessura das embalagens aumentou significativamente com a imersão da cera de carnaúba, com um aumento de 9,17% para as embalagens de farelo de trigo e 13,41% para as embalagens de farinha de casca de pitaya. REIS et al., (2018) produziram bandejas de amido de mandioca e PLA, cobertas com uma solução de cera de abelha com porcentagens variando entre 1 e 3%. Nesse estudo a embalagem que apresentou maior espessura foi a imersa na solução com 3% de cera de abelha, com um aumento de 39% na espessura da bandeja, de acordo com os autores foi explicado pela alta viscosidade aparente da solução de 3% de cera de abelha. Entretanto, as embalagens apresentaram espessuras menores às encontradas no presente estudo, variando entre 543 e 755 μm . Essa diferença pode ser devido a viscosidade da solução, pois as embalagens do estudo citado foram imersas em soluções contendo cera de abelha, álcool etílico e Tween 80, já no presente estudo foi utilizada a cera de carnaúba pura.

Tabela 2 - Espessuras e densidade do EPS e das amostras de farelo de trigo e farinha de casca de pitaya com suas respectivas amostras imersas em cera de carnaúba.

Amostras	Espessura (mm)	Densidade (g/cm^3)
EPS	$3,24 \pm 0,03^c$	$0,031 \pm 0,01^d$
TC	$3,81 \pm 0,08^a$	$0,81 \pm 0,01^a$
TS	$3,49 \pm 0,02^b$	$0,70 \pm 0,04^b$
PC	$3,72 \pm 0,27^{a,b}$	$0,72 \pm 0,02^b$
PS	$3,28 \pm 0,11^c$	$0,51 \pm 0,03^c$

EPS: Poliestireno expandido, TC: amostra com farelo de trigo imersa em cera de carnaúba, TS; amostra com farelo de trigo não imersa, PC: amostra com farinha de casca de pitaya imersa em cera de carnaúba, PS: amostra com farinha de casca de pitaya não imersa. Letras diferentes entre si em uma mesma coluna mostra resultados com diferença significativa ($p < 0,05$).

A densidade foi maior nas amostras imersas em cera de carnaúba, sendo a amostra com farelo de trigo a que apresentou maior densidade ($0,81 \text{ g}/\text{cm}^3$). O EPS apresentou a menor densidade entre as amostras analisadas, uma vez que esse compósito já é conhecido pela sua baixa densidade entre as espumas poliméricas (CRONIN; OUELLET, 2016). Segundo RODRIGUES et al., (2020) a densidade está relacionada diretamente com a resistência da bandeja. A alta densidade gera impactos no transporte dos produtos (OLIVER-ORTEGA et al., 2021), pelo peso agregado ao produto armazenado, mas também pode apresentar melhor condutividade térmica a embalagem (NUGROHO et al.,

2022). A cera de carnaúba possui uma densidade entre 0,92 e 1 g/cm³, logo as amostras imersa com essa substância possuem um incremento na sua densidade (Freitas *et al.*, 2019b).

4.2.3.2. Análise Colorimétrica

A análise de cor revelou que a aplicação da cera não causou diferença significativa em nenhum dos parâmetros de cor nas amostras de farelo de trigo. Por outro lado, nas amostras desenvolvidas com farinha de casca de pitaya a imersão em cera de carnaúba aumentou significativamente os parâmetros a^* e b^* , revelando uma tonalidade de cor pendendo para o vermelho e amarelo. No ΔE nenhuma das amostras com a incorporação da cera apresentou diferença significativa. Alguns autores já descreveram que a adição de lipídios pode levar a uma intensificação da cor, dependendo da sua concentração, em embalagens biodegradáveis (GALUS; GAUDITZ; KOWALSKA, 2020). O ΔE mostrou que as embalagens com e sem a imersão em cera de carnaúba apresentaram coloração completamente diferente da amostra controle, no caso o EPS, reforçando o apelo biodegradável das embalagens.

Tabela 3 – Análise colorimétrica das amostras com e sem a incorporação de cera de carnaúba.

Amostras	L^*	a^*	b^*	ΔE
EPS	87,47 ± 0,43 ^a	0,09 ± 0,02 ^d	-0,67 ± 0,05 ^c	0
TC	40,27 ± 1,84 ^c	9,87 ± 0,24 ^a	19,50 ± 1,33 ^b	52,29 ± 1,38 ^a
TS	40,24 ± 0,73 ^c	9,95 ± 0,42 ^a	19,66 ± 0,92 ^b	52,36 ± 0,62 ^a
PC	44,15 ± 1,37 ^b	6,70 ± 0,61 ^c	20,40 ± 1,09 ^b	48,37 ± 1,75 ^b
OS	46,67 ± 1,18 ^b	8,46 ± 0,69 ^b	24,93 ± 0,70 ^a	48,90 ± 0,84 ^b

EPS: Poliestireno expandido, TC: amostra com farelo de trigo imersa em cera de carnaúba, TS; amostra com farelo de trigo não imersa, PC: amostra com farinha de casca de pitaya imersa em cera de carnaúba, PS: amostra com farinha de casca de pitaya não imersa. Letras diferentes entre si em uma mesma coluna mostra resultados com diferença significativa ($p < 0,05$).

4.2.3.3. Propriedades mecânicas

4.2.3.3.1. Dureza (Shore D)

Não houve diferença significativa entre as amostras de farelo de trigo, sendo essas as quais apresentaram os maiores resultados (34,11 e 36,92). A amostra de farinha de casca de pitaya não imersa, conforme mostrado na tabela 3, em cera apresentou dureza maior do que a amostra com cera, porém nenhuma diferiu significativamente da amostra de EPS. Essa diferença encontrada entre as durezas das bandejas pode ser devido a sua superfície, uma

vez que a superfície da embalagem de farelo de trigo possui uma textura mais áspera, o que pode ter ajudado a fixar a cera com maior aderência, levando a uma embalagem resistente com a presença da camada de cera de carnaúba.

4.2.3.3.2. Impacto

Na análise de impacto, com resultados na tabela 3, a bandeja de farinha de casca de pitaya coberta com cera de carnaúba foi a que apresentou o maior valor ($1,08 \text{ kJ/m}^2$), diferindo significativamente do restante das embalagens biodegradáveis. As embalagens de farelo de trigo e de farinha de casca de pitaya não imersas não apresentaram diferença significativa entre si. Entretanto, todas as bandejas diferiram do EPS, o qual apresentou o menor resultado ($0,54 \text{ kJ/m}^2$). Um estudo que utilizou farinha de casca de ovo e farinha de casca de camarão, ambas com porcentagens entre 5 e 20 %, em uma base de amido de mandioca, apresentou resultados bem inferiores aos relatados no presente estudo. As amostras com 5 % de farinha de casca de camarão e 20 % de farinha de casca de ovo apresentaram os maiores resultados, $0,14$ e $0,17 \text{ kJ/m}^2$, respectivamente (KAEWTATIP; CHIARATHANAKRIT; RIYAJAN, 2018). Essa diferença de valores encontrados entre o referido estudo e este, pode inferir que tanto a farinha de casca de pitaya quanto o farelo de trigo, juntamente com a cera de carnaúba, conferem um efeito de resistência à embalagem avaliada.

4.2.3.3.3. Propriedades de Tração

O *strain at break* é uma medida de deformação e ductilidade, ou seja, as fissuras nos compósitos ocorrem quando a deformação na tensão ultrapassa o valor máximo permitido pela embalagem (NAIK, 2023). A bandeja com farelo de trigo imersa em cera de carnaúba apresentou diferença significativa das demais bandejas, sendo o maior resultado encontrado (4,83 %). Esse fato indica que houve uma boa interação entre a embalagem de farelo de trigo e a cera de carnaúba, proporcionando uma resistência a fissuras superior às demais amostra, pela maior ductilidade.

O *stress at break* é a capacidade de um material resistir a uma força que tende a separá-lo, ele é expresso como a medida da maior força que pode ser aplicada antes do rompimento do compósito (ISMAIL; KHULBE; MATSUURA, 2019). Todas as bandejas analisadas apresentaram resultado significativamente

superior ao EPS para o parâmetro de *stress at break*, sendo a amostra de farelo de trigo com cera de carnaúba e a amostra de farinha de casca de pitaya sem cera de carnaúba, as que apresentaram os maiores valores, 2,49 e 2,25 MPa, respectivamente, sem diferença significativa entre si. Esse fato pode ser explicado pela alta concentração de fibra insolúvel no farelo de trigo. As fibras insolúveis são formadas principalmente por hemicelulose e celulose, sendo essas as principais substâncias fornecedoras de rigidez às plantas, pela formação de ligações de hidrogênio, conhecidas pela força de ligação (Scheller; Ulvskov, 2010; Sztupecki *et al.*, 2023).

Tabela 4 – Propriedades mecânicas do EPS e das amostras de farelo de trigo e farinha de casca de pitaya com suas respectivas amostras imersas em cera de carnaúba.

Amostras	Dureza	Tensão				Flexão		
		Impacto (kJ/m ²)	Strain at break (%)	Stress at break (MPa)	MY (MPa)	Strain at break (%)	Stress at break (MPa)	MY (MPa)
EPS	26,44 ± 2,54 ^{b,c}	0,54 ± 0,03 ^c	3,23 ± 0,4 ^b	0,33 ± 0,03 ^c	16,86 ± 0,85 ^e	12,45 ± 2,18 ^a	1,31 ± 0,22 ^c	53,50 ± 4,42 ^d
TC	34,11 ± 2,04 ^a	0,74 ± 0,05 ^b	4,83 ± 0,16 ^a	2,49 ± 0,1 ^a	146,87 ± 3,51 ^d	6,26 ± 0,72 ^c	4,36 ± 0,36 ^a	419,98 ± 52,83 ^b
TS	36,92 ± 1,14 ^a	0,84 ± 0,06 ^b	4,02 ± 0,29 ^b	1,73 ± 0,19 ^b	166,26 ± 3,6 ^b	7,45 ± 0,62 ^{b,c}	3,42 ± 0,30 ^b	551,06 ± 53,37 ^a
PC	23,58 ± 1,17 ^c	1,08 ± 0,05 ^a	3,68 ± 0,32 ^b	2,09 ± 0,08 ^b	159,83 ± 2,22 ^c	7,16 ± 0,07 ^b	2,86 ± 0,34 ^b	88,43 ± 18,34 ^c
PS	30,33 ± 1,63 ^b	0,78 ± 0,04 ^b	3,79 ± 0,29 ^b	2,25 ± 0,24 ^{a,b}	182,68 ± 7,71 ^a	7,16 ± 0,81 ^{b,c}	3,98 ± 0,22 ^a	78,54 ± 15,99 ^c

EPS: Poliestireno expandido, TC: amostra com farelo de trigo imersa em cera de carnaúba, TS; amostra com farelo de trigo não imersa, PC: amostra com farinha de casca de pitaya imersa em cera de carnaúba, PS: amostra com farinha de casca de pitaya não imersa. Letras diferentes entre si em uma mesma coluna mostra resultados com diferença significativa ($p < 0,05$).

O módulo de Young descreve a rigidez relativa de um material, é a medida da inclinação da reta de um gráfico de *stress* e *strain at break*, quanto menor sua medida maior a comportamento de deformação do compósito (NADER *et al.*, 2023). Nessa análise a bandeja de EPS apresentou o menor resultado, sendo assim uma embalagem mais elástica que as desenvolvidas no presente estudo. Esse resultado era esperado pois as embalagens desenvolvidas são rígidas, conceito que não se aplica ao EPS. As bandejas possuem maior resistência a uma força longitudinal quando comparadas ao EPS, suportando maior força e deformando menos antes da quebra. Segundo o estudo original, a adição tanto do farelo de trigo quanto da casca de pitaya aumentou o *stress at break* das bandejas quando comparadas com o EPS, aumentando consecutivamente o módulo de Young desses materiais.

4.2.3.3.4. Propriedades de Flexão

No *strain at break* o EPS apresentou o maior resultado entre as amostras analisadas, uma vez que possui maior deformação transversal pela sua alta elasticidade, conseguindo manter a forma por um período sem ocorrerem rupturas (ANKESH; JAIKANT; SANJEEV, 2021; TAPIA-BLÁCIDO *et al.*, 2022).

O *stress at break* apresentou variação significativa semelhante ao encontrado na tração, onde a amostra de farelo de trigo imersa em cera de carnaúba, juntamente com a amostra de farinha de casca de pitaya não imersa, apresentaram os maiores resultados, 4,36 e 3,98 MPa, respectivamente. Entretanto, todas as amostras foram significativamente superiores ao EPS. Esse resultado é explicado pela capacidade de dispersão do farelo de trigo e da farinha da casca de pitaya no polímero amido, formando ligações de hidrogênio conhecidas pela sua alta força de adesão entre os compostos ligantes (HERSCHLAG; PINNEY, 2018); e também pela fixação superior da cera de carnaúba na bandeja de farelo de trigo, explicada pela possível superfície áspera da embalagem de farelo de trigo em relação a embalagem de farinha de casca de pitaya.

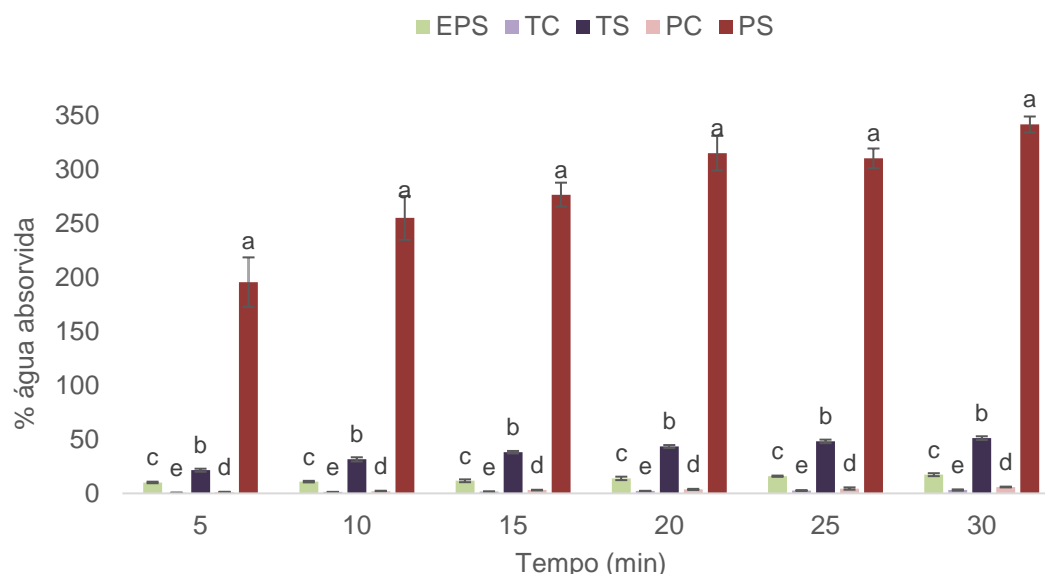
O módulo de Young mostrou resultados condizentes com os demais valores apresentados. Todas as amostras tiveram resultados significativamente superiores ao EPS, sendo a de farelo de trigo não imersa a que apresentou maior

valor (551,06 MPa), seguida pela amostra de farelo de trigo imersa (419,98 MPa). As amostras de farinha de casca de pitaya não apresentaram diferença significativa entre si, porém apresentaram diferença significativa do EPS.

4.2.3.4. Absorção de Água

As bandejas foram imersas em água por 30 minutos para avaliar o potencial impermeabilizante da cera de carnaúba. Foi observado, de acordo com a figura 3, que a cera obteve excelentes resultados em ambas as bandejas, pois ao final dos 30 minutos de análise a bandeja de farelo de trigo coberta de cera de carnaúba absorveu somente 3,1% de água em relação ao seu peso inicial e a bandeja de casca de pitaya coberta com cera absorveu 5,9% de água em relação ao seu peso inicial. Um estudo que desenvolveu embalagens a partir de amido de mandioca e farinha de palha de arroz em uma proporção de 9:1, cobrindo-as com 4 tipos de ceras naturais: cera de abelha, cera de carnaúba, cera de soja e cera de candelila, apresentou resultados compatíveis com os aqui encontrados. Os valores da absorção de água alcançaram entre 1,4 a 4%, para a de carnaúba e para a cera de soja, respectivamente, ao fim de 30 minutos (ALEXANDER; SODRI; MIZUNO, 2023). Embalagens com baixa absorção de água são desejáveis por manterem sua forma e impedir a fixação de microrganismos decompositores. Uma possível explicação para a diferença de absorção de água entre a amostra de farelo de trigo e de farinha de casca de pitaya é a alta adesão entre a cera de carnaúba e a superfície da amostra de farelo de trigo. A diferença entre as células geradas pela expansão térmica, das amostras de farelo de trigo e de farinha de casca de pitaya, é notada por elas serem de maior tamanho e estarem em maior número nessa última fibra, conforme a análise morfológica nas Figuras 1 e 2, sendo assim mais difícil fechar todos os poros desse tipo de bandeja.

Figura 1 – Água absorvida pelas amostras das embalagens de acordo com o tempo analisado.

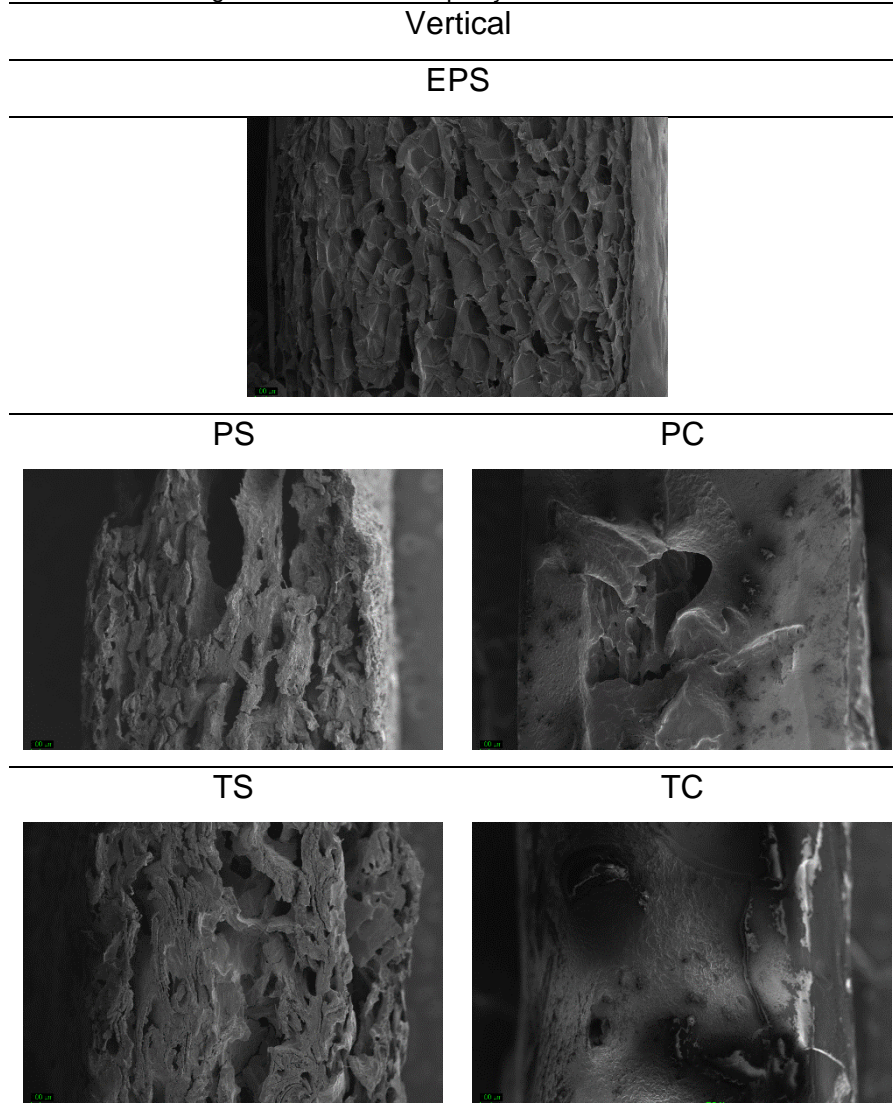


EPS: Poliestireno expandido. TC: amostra de farelo de trigo imersa em cera de carnaúba. TS: amostra de farelo trigo não imersa. PC: amostra com farinha de casca de pitaya imersa em cera de carnaúba. PS: amostra com farinha de casca de pitaya não imersa. Letras diferentes entre si em cada tempo analisado mostra diferença significativa ($p < 0,05$).

4.2.3.5. Análise Morfológica

A análise morfológica mostrou que a imersão em cera de carnaúba conseguiu selar as células geradas no processo de expansão da massa da bandeja formada pelo amido de milho juntamente com as fibras. A análise das amostras na posição vertical revelou, na Figura 1, que a cera cobriu melhor as imperfeições na amostra de farelo de trigo. A superfície, ao corte vertical da bandeja, se mostrou com uma textura mais lisa e uniforme quando comparada a amostra de farinha de casca de pitaya imersa em cera de carnaúba. Esse resultado encontrado vai de encontro com o resultado obtido na análise da absorção de água, onde a amostra desenvolvida com farelo de trigo obteve o melhor percentual de absorção, mostrando um valor de 3% de absorção de água.

Figura 2 – Análise morfológica das amostras na posição transversal com aumento entre 60x e 75x.



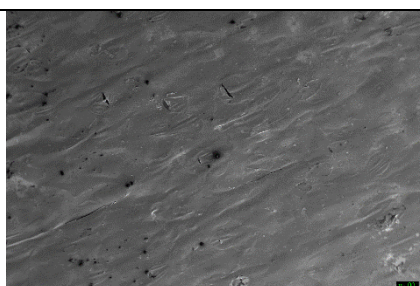
EPS: Poliestireno expandido. PS: amostra com farinha de casca de pitaya não imersa. PC: amostra com farinha de casca de pitaya imersa em cera de carnaúba. TC: amostra com farelo de trigo imersa em cera de carnaúba. TS; amostra com farelo de trigo não imersa.

Na análise morfológica das amostras na posição vertical o resultado visualizado, na Figura 2, foi semelhante. A textura da superfície da embalagem desenvolvida com farelo de trigo se mostrou mais irregular ao microscópio, quando comparada com a amostra com farinha se casca e pitaya.

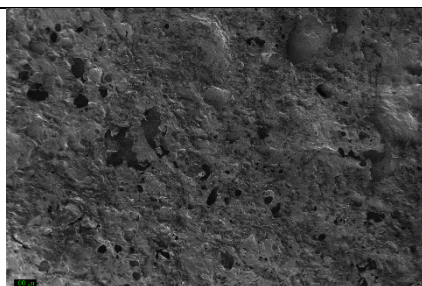
Figura 3 - Análise morfológica da superfície das amostras com aumento entre 50x e 70x.

Horizontal

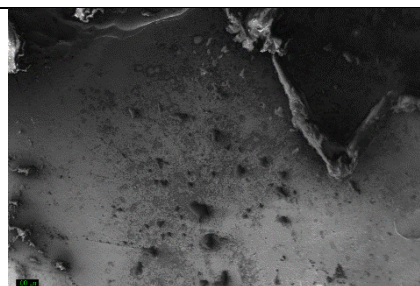
EPS



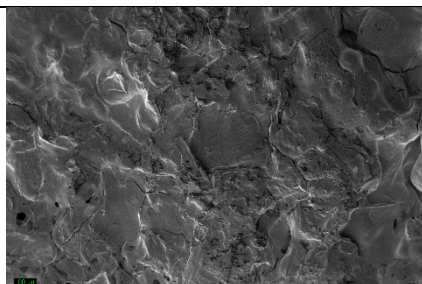
PS



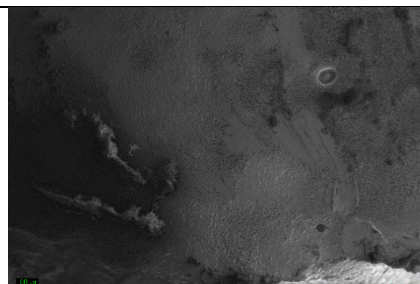
PC



TS



TC



EPS: Poliestireno expandido. PS: amostra com farinha de casca de pitaya não imersa. PC: amostra com farinha de casca de pitaya imersa em cera de carnaúba. TC: amostra com farelo de trigo imersa em cera de carnaúba. TS; amostra com farelo de trigo não imersa.

4.2.3.6. Biodegradabilidade

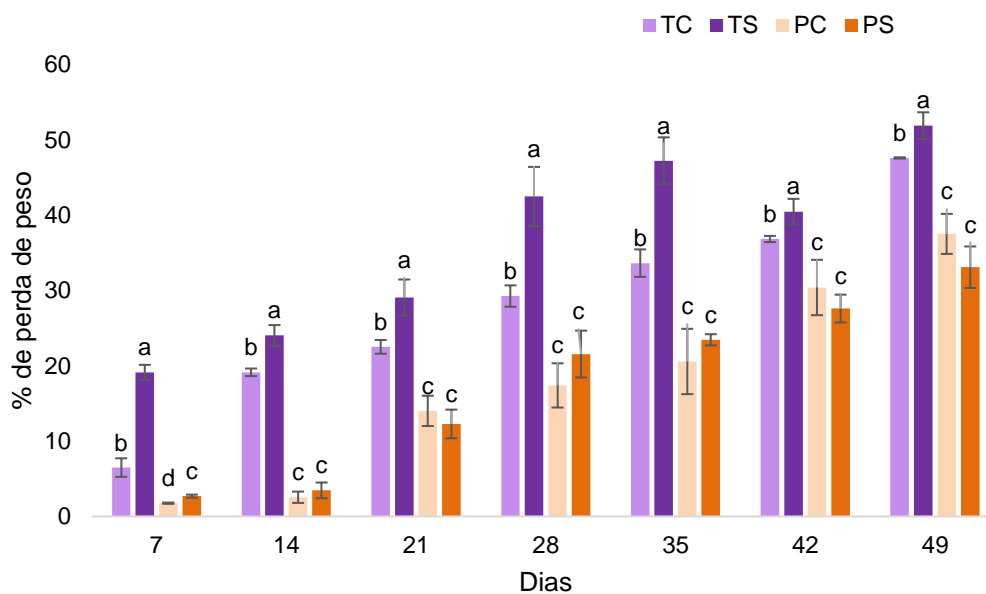
As bandejas foram testadas semanalmente quanto a sua degradação, ao longo de 49 dias. Observou-se que as amostras apresentavam pequenos sinais de degradação desde a primeira semana de análise, porém a perda de espessura das amostras começou a se tornar visual a partir do 28^o dia, o que

favoreceu o aparecimento de fraturas ao abrir o invólucro, devido à alta aderência da amostra no invólucro. As amostras desenvolvidas com farelo de trigo apresentaram maior perda de massa ao longo do estudo, sendo a bandeja sem cobertura de cera de carnaúba, com resultados de 51,91% de perda do seu peso inicial e a bandeja com cobertura, 47,61% de diferença em seu peso. As imagens das amostras ao longo das semanas da análise de biodegradabilidade também corroboram esse resultado, pois com o tempo se tornaram mais frávolas e facilmente passíveis de quebra, conforme a Figura 5. As bandejas desenvolvidas com farinha de casca de pitaya com cobertura de cera e sem cobertura de cera mostraram ao final dos dias avaliados uma perda de 37,52% e 33,10%, respectivamente, também sendo uma perda de massa significativa.

A amostra de farinha de casca de pitaya com a cobertura de cera não apresentou diferença significativa no perfil de degradação, sendo ao longo da análise pode ser observado descolamento da cera da amostra imersa com maior frequência. Por sua vez, nas amostras com farelo de trigo ocorreu diferença significativa de peso desde a primeira semana de análise, fato esse que pode reforçar a compatibilidade da cera com a superfície mais áspera e rugosa da bandeja com farelo de trigo, levando a cera à melhor fixação na embalagem, o que resultou em um tempo maior para ocorrer a degradação dessas amostras.

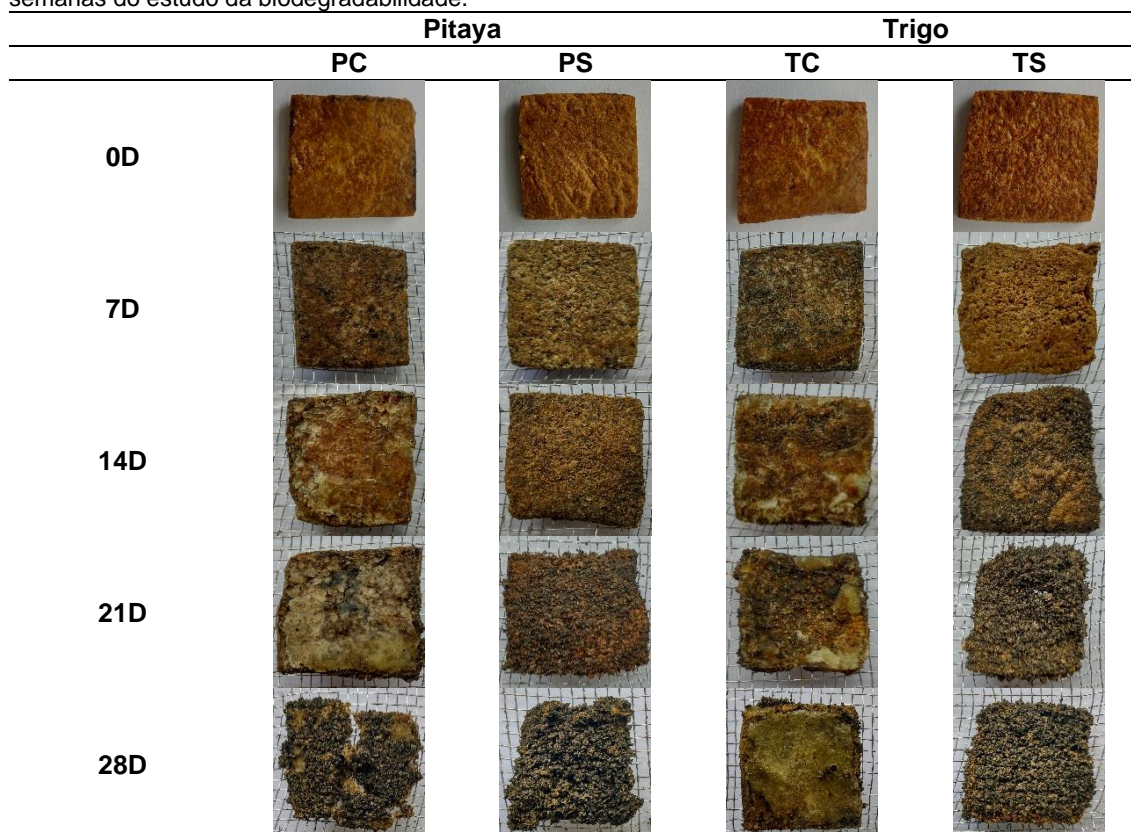
Em relação a degradação da cera, segundo JUNIOR et al., (2022), os componentes estáveis e inertes da cera não reagem de forma a aumentar de forma significativa a degradação, por ser formada por ésteres alifáticos e diésteres de ácido cinâmico. A perda de peso pela degradação das amostras pode ser explicada pela morfologia das bandejas, uma vez que células interiores maiores aumentam a possibilidade da entrada de microrganismos do solo, ocasionando maior degradação. O número de células também apresenta interferência, pois maior quantidade, confere maior superfície de contato amostra-enzima, facilitando a degradação (ENGEL, Juliana B.; AMBROSI; TESSARO, 2019).

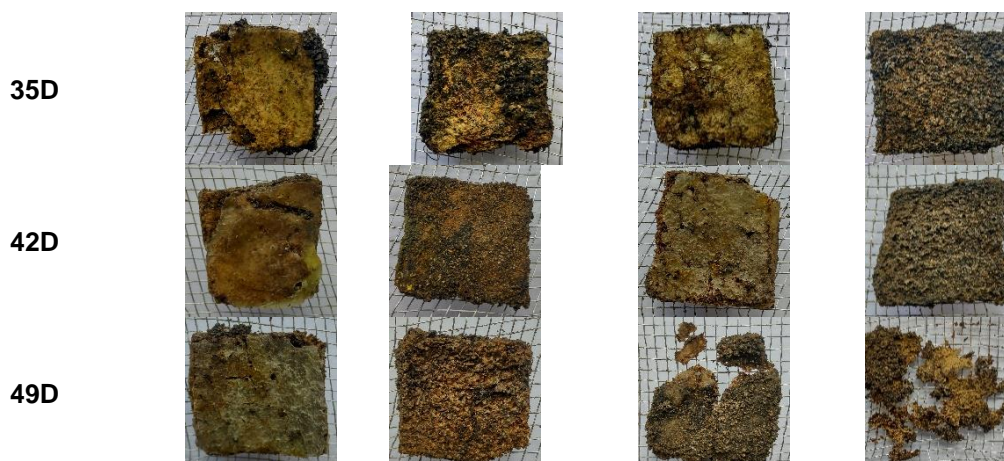
Figura 4 - Perda de peso das diferentes amostras das embalagens ao longo das semanas do estudo da biodegradabilidade.



TC: amostra de farelo de trigo imersa em cera de carnaúba. TS: amostra de farelo trigo não imersa. PC: amostra com farinha de casca de pitaya imersa em cera de carnaúba. PS: amostra com farinha de casca de pitaya não imersa. Letras diferentes entre si em cada tempo analisado mostra diferença significativa ($p < 0,05$).

Figura 5 – Imagens da análise de biodegradabilidade das embalagens, imersas em cera de carnaúba e também não imersas, produzidas a partir da farinha de casca de pitaya e farelo de trigo ao longo das 7 semanas do estudo da biodegradabilidade.





TC: amostra de farelo de trigo imersa em cera de carnaúba. TS: amostra de farelo trigo não imersa. PC: amostra com farinha de casca de pitaya.

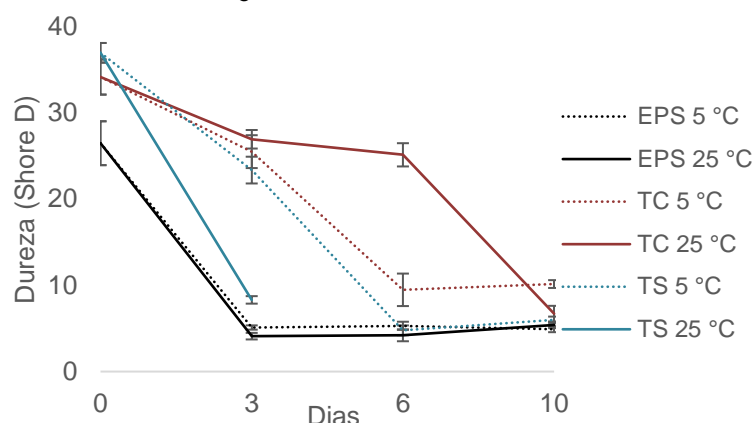
4.2.3.7. Aplicabilidade

Os resultados das propriedades mecânicas e da absorção de água foram analisados previamente e a aplicabilidade em alimentos foi realizada na bandeja produzida com farelo de trigo, por apresentar os melhores resultados nas análises realizadas de dureza, impacto, tensão e flexão. A amostra de farelo de trigo não imersa em cera de carnaúba e acondicionada a 25 °C não pôde ser utilizada para verificar as propriedades mecânicas a partir do dia 3, pois ocorreu grande degradação dos brócolis (Figura 5), com perda de formato pela absorção de umidade dos brócolis e degradação da superfície da bandeja.

A medida da Dureza (Shore D) das bandejas, conforme Figura 7, foi diminuindo ao longo dos 10 dias da aplicabilidade e seu melhor resultado ao final da análise (10,13) foi para a amostra de farelo de trigo com cera de carnaúba armazenada a 5 °C, apresentando diferença significativa diante das outras amostras. Tal embalagem apresentou diferença significativa em relação ao EPS, mostrando a boa capacidade impermeabilizante da cera de carnaúba, sendo uma alternativa melhor, em relação à dureza, ao EPS, mantendo sua rigidez mesmo absorvendo umidade, levando a reforçar a hipótese de alta aderência entre a superfície da bandeja de farelo de trigo e a cera de carnaúba.

A diminuição da dureza em todas as amostras biodegradáveis ao longo dos dias da análise pode ter relação com a umidade absorvida dos brócolis, o que resultou em uma redução da coesão do material e, portanto, uma diminuição na dureza Shore D durante a aplicabilidade.

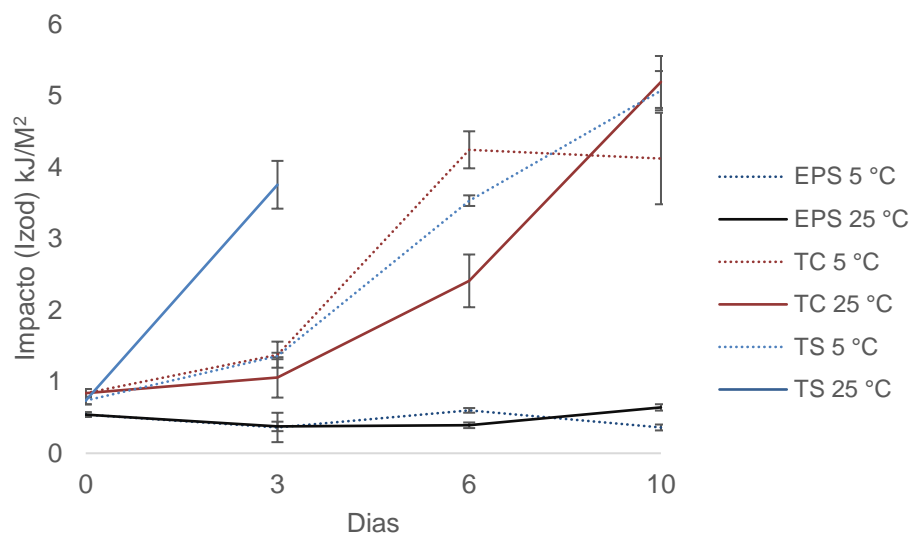
Figura 6 – Gráfico comparativo da Dureza (Shore D) entre o EPS e as bandejas com banho em cera de carnaúba e sem essa cobertura, ao longo dos 10 dias de análise.



EPS: Poliestireno expandido. TC: amostra com farelo de trigo imersa em cera de carnaúba. TS; amostra com farelo de trigo não imersa.

O Impacto (Izod), de acordo com a figura 3, aumentou ao longo da análise da aplicabilidade nas embalagens biodegradáveis, sendo o maior valor (5,19 kJ/M²) alcançado na embalagem de farelo de trigo imersa em cera de carnaúba e armazenada a 25 °C no 10º dia. Uma possível explicação é a exposição da embalagem a condições ambientais de temperatura e umidade controladas, contribuindo para a preservação ou fortalecimento das propriedades de impacto das embalagens biodegradáveis ao longo do tempo. Além disso, no processo de fabricação das embalagens podem ocorrer tensões residuais, como se fossem forças contrárias, nas estruturas de compostos poliméricos que dependem do tamanho, ductilidade e resistência da fibra utilizada, assim uma parte da resistência da embalagem é gasta para superar essas tensões criadas. Ocorre uma dissipação, dessas tensões, ao longo do tempo, o que pode ter levado ao aumento no impacto (TABATABAEIAN *et al.*, 2022). O controle de EPS manteve resultados similares, sem grandes alterações, ao longo dos 10 dias nas duas temperaturas avaliadas, resultado esperado pois o EPS é conhecido por ser um material inerte não reagindo com o produto armazenado (ANKESH; JAIKANT; SANJEEV, 2021).

Figura 7 – Gráfico comparativo do Impacto (Izod) entre o EPS e as bandejas com o banho em cera de carnaúba e sem essa cobertura, ao longo dos 10 dias de análise.



EPS: Poliestireno expandido. TC: amostra com farelo de trigo imersa em cera de carnaúba. TS; amostra com farelo de trigo não imersa.

No dia 0 foram utilizados os dados de flexão das bandejas secas, onde a bandeja de farelo de trigo imersa em cera de carnaúba apresentou melhores valores de *stress at break* e de módulo de Young, 4,36 Mpa e 551,06 Mpa, respectivamente, sendo a amostra que melhor manteve o formato quando submetida a força transversal. Nos dias 3, 6 e 10 a embalagem de farelo de trigo com cobertura em cera de carnaúba armazenadas a 5°C apresentou melhores resultados gerais. No *stress at break* da bandeja imersa em cera ocorreu diminuição entre o dia 0 e o dia 10, fato esperado pela grande perda de umidade pelos brócolis, a qual foi em parte absorvida pela bandeja, porém esta ainda manteve seu formato e possibilidade de utilização até o final da análise.

O *strain at break*, dessa bandeja, aumentou durante os 10 dias da aplicabilidade, corroborando o fato da absorção da umidade por parte da bandeja imersa em cera. Por fim, o seu módulo de Young teve uma abrupta diminuição entre os dias 0 e 3, causada possivelmente pela grande umidade absorvida entre esses dias iniciais, resultando assim no aumento da elasticidade do produto. A temperatura e a condição impermeabilizante da cera tiveram papel fundamental na degradação do sistema bandeja+brócolis. O armazenamento a 5 °C manteve o fresco dos brócolis por maior tempo, mostrado pelas características visuais do produto. Já a impermeabilização na bandeja permitiu que ela fosse avaliada no final do estudo mesmo quando armazenada a 25 °C. Já a bandeja não imersa em cera de carnaúba e armazenada na mesma temperatura não pôde ser

utilizada para obtenção das propriedades mecânicas depois do dia 3, pela excessiva degradação dos brócolis armazenado nessa temperatura de armazenagem. Esse problema de excessiva degradação e multiplicação microbiana não aconteceu na embalagem não imersa e armazenada a 5 °C.

Tabela 5 - Análise de flexão das bandejas de farelo de trigo imersas em cera de carnaúba e não imersas utilizadas na aplicabilidade durante os 10 dias analisados.

Amostras		Stress at Break (Mpa)	Strain at Break (%)	MY (Mpa)
Dia 0	EPS	1,31 ± 0,22 ^c	12,45 ± 2,18 ^a	53,50 ± 4,42 ^c
	TS	3,42 ± 0,30 ^b	7,45 ± 0,62 ^b	419,98 ± 52,83 ^b
	TC	4,36 ± 0,36 ^a	6,26 ± 0,72 ^b	551,06 ± 53,37 ^a
Dia 3	EPS5	0,59 ± 0,02 ^d	11,21 ± 0,98 ^d	31,22 ± 2,74 ^a
	EPS25	1,26 ± 0,19 ^b	15,35 ± 1,10 ^{b,c}	31,24 ± 2,77 ^a
	TS5	4,78 ± 0,11 ^a	19,81 ± 2,62 ^a	29,90 ± 3,30 ^a
	TS25	0,85 ± 0,04 ^c	21,25 ± 2,21 ^a	10,81 ± 1,63 ^b
	TC5	4,77 ± 0,45 ^a	14,27 ± 1,09 ^c	26,30 ± 2,69 ^a
	TC25	1,19 ± 0,24 ^b	18,88 ± 2,85 ^{a,b}	11,32 ± 1,21 ^b
Dia 6	EPS5	1,09 ± 0,04 ^c	8,71 ± 0,86 ^c	49,76 ± 5,62 ^a
	EPS25	0,83 ± 0,06 ^d	8,59 ± 0,58 ^c	48,79 ± 1,90 ^a
	TS5	1,31 ± 0,16 ^b	18,73 ± 0,91 ^a	21,91 ± 2,55 ^c
	TS25	NA	NA	NA
	TC5	2,27 ± 0,51 ^a	18,73 ± 0,81 ^a	34,67 ± 4,59 ^b
	TC25	2,93 ± 0,23 ^a	12,40 ± 0,30 ^b	21,33 ± 1,54 ^c
Dia 10	EPS5	0,94 ± 0,08 ^b	11,73 ± 1,04 ^b	21,19 ± 3,16 ^c
	EPS25	1,03 ± 0,12 ^b	10,74 ± 1,32 ^b	39,92 ± 3,77 ^b
	TS5	1,01 ± 0,01 ^b	17,02 ± 1,39 ^a	19,68 ± 1,64 ^c
	TS25	NA	NA	NA
	TC5	1,68 ± 0,43 ^a	17,94 ± 1,58 ^a	49,17 ± 5,07 ^a
	TC25	1,10 ± 0,18 ^a	6,80 ± 0,61 ^c	13,25 ± 0,92 ^d

EPS: Poliestireno expandido. TC: Amostra com farelo de trigo imersa em cera de carnaúba. TS: Amostra com farelo de trigo não imersa. EPS5: Poliestireno expandido armazenado a 5 °C. EPS25: Poliestireno expandido armazenado a 25 °C. TS5: Amostra com farelo de trigo não imersa armazenada a 5 °C. TS25: Amostra com farelo de trigo não imersa armazenada a 25 °C. TC5: Amostra com farelo de trigo imersa em cera de carnaúba armazenada a 5 °C. TC25: Amostra com farelo de trigo imersa em cera de carnaúba armazenada a 25 °C. MY: Módulo de Young. Letras diferentes entre si em cada coluna no dia analisado mostra diferença significativa ($p < 0,05$).

A análise de tração na Tabela 5, realizada nas bandejas armazenando brócolis durante 10 dias confirmou os resultados já apresentados pela flexão. A bandeja de farelo de trigo imersa em cera de carnaúba mostrou melhor aplicabilidade, demonstrando menor deformação mesmo em condições de temperatura ambiente. A cera de carnaúba é classificada como *gras (generally recognized as safe)* e formada por materiais inertes e estáveis que não reagem com os alimentos de forma a aumentar sua degradação ou estimular a multiplicação microbiana. Ela forma uma camada protetora na superfície da

embalagem ajudando a evitar a penetração de umidade. Essa característica é importante não só para alimentos sensíveis à umidade, mas também para manter as propriedades mecânicas da embalagem, pois um sistema com alta atividade de água aumenta a deterioração e reduz a vida útil dos produtos. (Alexander; Sodri; Mizuno, 2023; de Freitas *et al.*, 2019a; Junior *et al.*, 2022).

Tabela 6 - Análise de tensão das bandejas de farelo de trigo imersas em cera de carnaúba e não imersas utilizadas na aplicabilidade durante os 10 dias analisados.

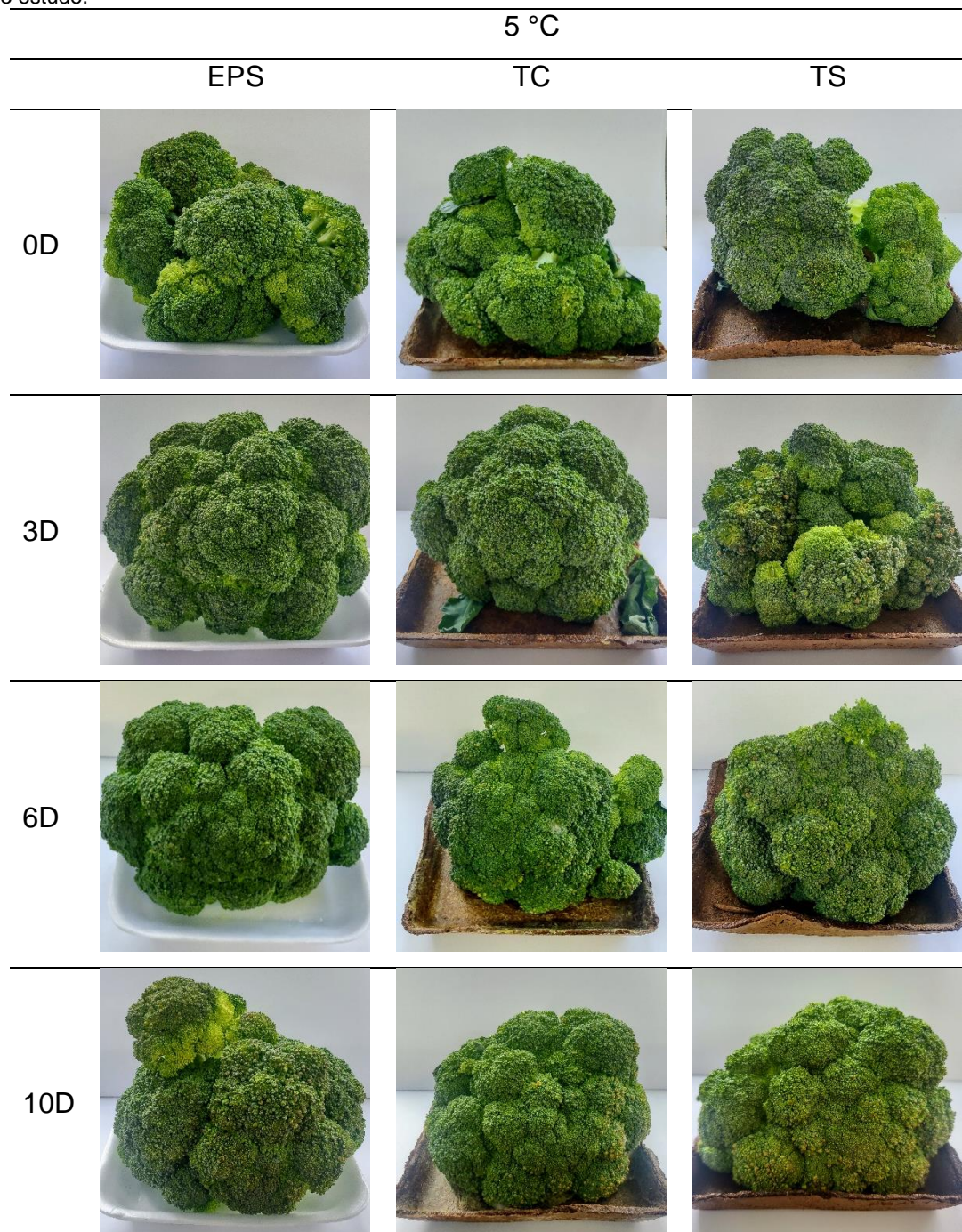
Amostras		Stress at Break (Mpa)	Strain at Break (%)	MY (Mpa)
Dia 0	EPS	0,33 ± 0,03 ^c	3,23 ± 0,4 ^b	16,86 ± 0,85 ^c
	TS	1,73 ± 0,19 ^b	4,02 ± 0,29 ^b	166,26 ± 3,6 ^a
	TC	2,49 ± 0,1 ^a	4,83 ± 0,16 ^a	146,87 ± 3,51 ^b
Dia 3	EPS5	0,27 ± 0,03 ^f	2,62 ± 0,19 ^e	17,04 ± 0,61 ^c
	EPS25	0,52 ± 0,09 ^d	3,06 ± 0,16 ^d	19,94 ± 2,53 ^c
	TS5	0,71 ± 0,02 ^c	11,66 ± 0,83 ^b	42,19 ± 1,2 ^b
	TS25	0,35 ± 0,05 ^e	17,92 ± 2,27 ^a	1,61 ± 0,2 ^d
	TC5	1,88 ± 0,05 ^b	6,54 ± 0,36 ^c	139,22 ± 9,37 ^a
	TC25	2,62 ± 0,39 ^a	12,56 ± 1,23 ^b	145,56 ± 6,23 ^a
Dia 6	EPS5	0,36 ± 0,05 ^d	3,01 ± 0,64 ^d	8,86 ± 0,24 ^c
	EPS25	0,36 ± 0,04 ^d	3,69 ± 0,40 ^d	3,47 ± 0,4 ^d
	TS5	0,64 ± 0,03 ^b	20,02 ± 1,02 ^b	24,85 ± 0,06 ^b
	TS25	NA	NA	NA
	TC5	0,57 ± 0,02 ^c	37,90 ± 3,91 ^a	8,66 ± 0,24 ^c
	TC25	2,19 ± 0,25 ^a	10,24 ± 0,05 ^c	144,58 ± 1,12 ^a
Dia 10	EPS5	0,39 ± 0,04 ^b	2,94 ± 0,38 ^c	21,02 ± 2,00 ^b
	EPS25	0,36 ± 0,04 ^b	3,69 ± 0,40 ^c	4,07 ± 0,78 ^e
	TS5	0,28 ± 0,01 ^c	17,64 ± 0,64 ^b	7,77 ± 0,68 ^d
	TS25	NA	NA	NA
	TC5	0,47 ± 0,03 ^a	16,19 ± 2,17 ^b	24,85 ± 2,46 ^a
	TC25	0,56 ± 0,06 ^a	23,73 ± 1,14 ^a	10,65 ± 0,56 ^c

EPS: Poliestireno expandido. TC: Amostra com farelo de trigo imersa em cera de carnaúba. TS: Amostra com farelo de trigo não imersa. EPS5: Poliestireno expandido armazenado a 5 °C. EPS25: Poliestireno expandido armazenado a 25 °C. TS5: Amostra com farelo de trigo não imersa armazenada a 5 °C. TS25: Amostra com farelo de trigo não imersa armazenada a 25 °C. TC5: Amostra com farelo de trigo imersa em cera de carnaúba armazenada a 5 °C. TC25: Amostra com farelo de trigo imersa em cera de carnaúba armazenada a 25 °C. MY: Módulo de Young. Letras diferentes entre si em cada coluna no dia analisado mostra diferença significativa ($p < 0,05$).

As figuras 4 e 5 mostram as imagens do sistema bandeja e brócolis em suas duas temperaturas de armazenamento, 5° e 25 °C. Ocorreu grande diferença visual entre os produtos armazenados. A temperatura de 5 °C conservou o produto por muito mais tempo, mantendo a coloração e textura.

Os brócolis, como outros legumes ou frutas, produzem etileno, um gás com grande papel na qualidade pós-colheita, que em grande concentração pode causar a aceleração do seu amadurecimento e deterioração (LI *et al.*, 2022).

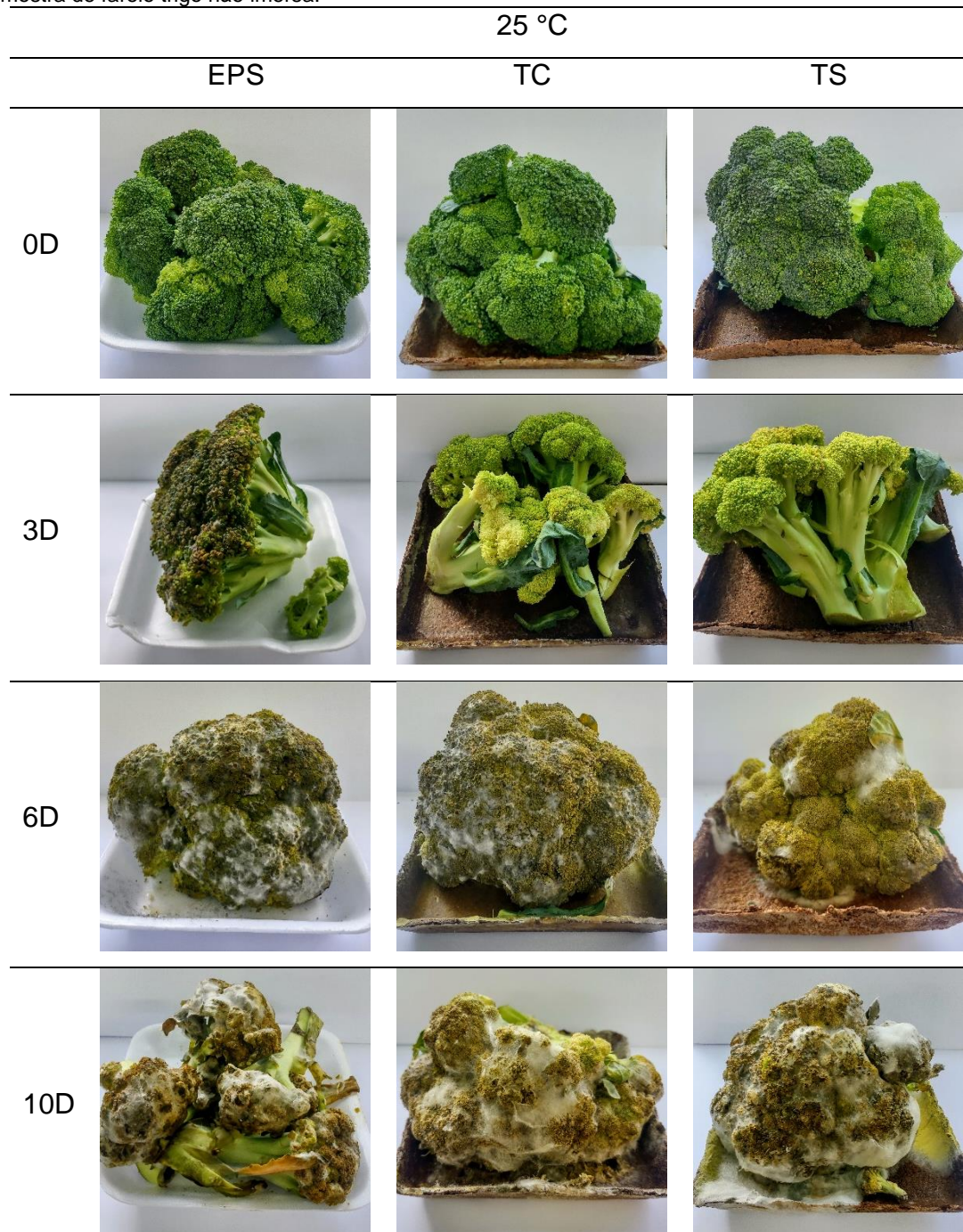
Figura 8 – Imagens da análise de aplicabilidade das embalagens produzidas a partir da farinha de casca de pitaya e farelo de trigo, imersas ou não em cera de carnaúba, com brócolis a 5 °C ao longo dos 10 dias do estudo.



EPS: poliestireno expandido. TC: amostra de farelo de trigo imersa em cera de carnaúba. TS: amostra de farelo trigo não imersa. 0D: dia 0. 3D: dia 3. 6D: dia 6. 10D: dia 10.

Na figura 4 temos as imagens do sistema brócolis + bandeja armazenado a 5 °C. A temperatura foi um parâmetro essencial para manter o frescor do produto por mais tempo. Uma vez armazenado o brócolis continua seu processo respiratório e perde o frescor, o que ocasiona perda de qualidade do produto, mudanças na aparência, sabor, aroma e textura (PELLEGRINO *et al.*, 2019).

Figura 9 - Imagens da análise de aplicabilidade das embalagens produzidas a partir da farinha de casca de pitaya e farelo de trigo, imersas ou não em cera de carnaúba, com brócolis a 25°C ao longo dos 10 dias do estudo. EPS: poliestireno expandido. TC: amostra de farelo de trigo imersa em cera de carnaúba. TS: amostra de farelo trigo não imersa.



EPS: poliestireno expandido. TC: amostra de farelo de trigo imersa em cera de carnaúba. TS: amostra de farelo trigo não imersa. 0D: dia 0. 3D: dia 3. 6D: dia 6. 10D: dia 10.

A senescência dos brócolis acontece de forma diferente, de acordo com o seu armazenamento. O amadurecimento deste produto ocorre de forma mais tardia quando o alimento é mantido em baixa temperatura de forma constante e sem incidência de luz (GHIMIRE *et al.*, 2023). Os brócolis são legumes com alto percentual de umidade, por volta de 82%, sendo sua perda de frescor ocorrida

mediante perda de umidade e alguns outros sinais como mudanças na cor e diferenças na textura (TANGKHAM, 2019). Essa informação está de acordo com a tabela 6, que mostra maior perda de peso, talvez perda de umidade nos produtos armazenado a 25 °C, primeiramente nas bandejas sem cobertura de cera de carnaúba, seguidas pelas bandejas cobertas. Esse resultado pode ser explicado pela falta da característica absorvente do EPS e também pela alta hidrofília do amido de milho que, por ser composto majoritariamente de moléculas polares, pode reduzir a umidade por meio das ligações de hidrogênio.

A cera de carnaúba por agir selando a embalagem e cobrindo os poros da sua superfície pode diminuir a perda de peso dos brócolis para as embalagens. Os brócolis perdem umidade para o ambiente externo e também para a embalagem em si, resultado observado na perda de peso do sistema (brócolis e bandeja). A perda de peso do sistema no dia 3 foi maior nas amostras acondicionadas no EPS a 25 °C com diferença significativa para as amostras de farelo de trigo não imersa e imersa em cera de carnaúba, com valores de 3,74 g, 2,21g e 1,76g, respectivamente. Esse resultado pode ser interpretado pela absorção da umidade pelas embalagens, que agem como absorventes, logo o sistema formado com o EPS, por não apresentar essa característica, perde mais umidade para o ambiente externo.

O °Brix representa uma medida da concentração de sólidos solúveis totais, sendo um indicativo útil, mas não definitivo, da qualidade de vegetais. Ele fornece uma estimativa indireta do conteúdo de açúcares, ácidos, proteínas e outros compostos solúveis presentes no vegetal (JAYWANT; SINGH; ARIF, 2022). Essa característica não apresentou grande variação ao longo da aplicabilidade, mostrando valores próximos a 9,7° Brix, valor esse aceito para consumo das folhas dos brócolis (DOMOKOS-SZABOLCSY *et al.*, 2022).

O pH apresentou maior variação no 10º dia da análise nas amostras armazenadas a 25 °C em relação as amostras armazenadas a 5 °C, apresentando os valores mais altos nas amostras armazenadas no EPS, na bandeja com cobertura de cera de carnaúba, seguida pela bandeja não imersa, sendo 8,63, 8,10 e 7,60 os valores respectivos. Entretanto, só ocorreu diferença significativa entre a amostras de EPS e a amostra não coberta com cera. Segundo MUSTAFA; ANWER; ZRARY, (2023), o crescimento de alguns tipos de

fungos é otimizado pelo armazenamento de hortaliças em alta temperatura e umidade elevada. Certos fungos produzem metabólitos alcalinos, os quais podem ter levado ao aumento do pH no fim dos 10 dias de análise.

Tabela 7 - Percentual de perda de peso dos brócolis, do sistema brócolis e bandeja, variação de Brix e pH ao longo dos 10 dias da aplicabilidade.

		PP Brócolis (g)	PP Sistema (g)	Brix (°Bx)	pH
	Brócolis	0	0	9,83 ± 0,06	6,42 ± 0,18
3D	EPS5	0,80 ± 0,00 ^e	0,79 ± 0,01 ^c	9,63 ± 0,06 ^c	6,44 ± 0,09 ^{a,b}
	EPS25	3,78 ± 0,29 ^c	3,74 ± 0,84 ^a	9,83 ± 0,06 ^a	6,29 ± 0,06 ^b
	TS5	3,57 ± 0,00 ^c	0,67 ± 0,00 ^d	9,70 ± 0,00 ^b	6,45 ± 0,03 ^a
	TS25	10,65 ± 0,33 ^a	2,21 ± 0,67 ^b	9,83 ± 0,06 ^a	6,34 ± 0,06 ^b
	TC5	1,99 ± 0,40 ^d	0,32 ± 0,00 ^e	9,63 ± 0,06 ^c	6,45 ± 0,03 ^a
	TC25	5,20 ± 0,78 ^b	1,76 ± 0,48 ^b	9,87 ± 0,06 ^a	6,37 ± 0,12 ^{a,b}
6D	EPS5	6,06 ± 0,79 ^{c,d}	2,89 ± 0,44 ^c	9,60 ± 0,00 ^b	7,08 ± 0,07 ^a
	EPS25	5,33 ± 0,60 ^d	5,28 ± 0,59 ^a	9,70 ± 0,00 ^a	6,54 ± 0,12 ^b
	TS5	9,54 ± 0,40 ^b	1,50 ± 0,23 ^d	9,70 ± 0,00 ^a	6,99 ± 0,06 ^a
	TS25	16,91 ± 0,63 ^a	5,44 ± 1,11 ^a	9,70 ± 0,00 ^a	6,32 ± 0,13 ^b
	TC5	7,49 ± 0,98 ^c	1,76 ± 0,23 ^d	9,60 ± 0,00 ^b	6,89 ± 0,14 ^a
	TC25	6,68 ± 0,22 ^c	3,79 ± 0,31 ^b	9,70 ± 0,00 ^a	6,46 ± 0,12 ^b
10D	EPS5	3,81 ± 0,27 ^d	3,57 ± 0,00 ^c	9,67 ± 0,06 ^a	6,78 ± 0,06 ^{c,d}
	EPS25	9,17 ± 1,81 ^c	9,06 ± 1,79 ^a	9,63 ± 0,06 ^b	8,63 ± 0,44 ^a
	TS5	12,40 ± 1,70 ^b	2,01 ± 0,01 ^e	9,70 ± 0,00 ^a	6,76 ± 0,01 ^c
	TS25	24,13 ± 2,36 ^a	9,29 ± 0,53 ^a	9,67 ± 0,06 ^a	7,60 ± 0,50 ^b
	TC5	8,63 ± 0,46 ^c	2,55 ± 0,44 ^d	9,70 ± 0,00 ^a	6,73 ± 0,00 ^d
	TC25	15,14 ± 1,13 ^b	6,64 ± 0,39 ^b	9,63 ± 0,06 ^b	8,10 ± 0,26 ^{a,b,c}

EPS: Poliestireno expandido. TC: Amostra com farelo de trigo imersa em cera de carnaúba. TS: Amostra com farelo de trigo não imersa. EPS5: Poliestireno expandido armazenado a 5 °C. EPS25: Poliestireno expandido armazenado a 25 °C. TS5: Amostra com farelo de trigo não imersa armazenada a 5 °C. TS25: Amostra com farelo de trigo não imersa armazenada a 25 °C. TC5: Amostra com farelo de trigo imersa em cera de carnaúba armazenada a 5 °C. TC25: Amostra com farelo de trigo imersa em cera de carnaúba armazenada a 25 °C. PP: Perda de peso. Letras diferentes entre si em cada coluna no dia analisado mostra diferença significativa ($p < 0,05$).

4.2.4. CONCLUSÃO

A introdução da cera de carnaúba nas bandejas resultou em melhorias significativas nas propriedades mecânicas, impermeabilização e biodegradabilidade. As bandejas mostraram resistência à tensão, flexão, impacto e dureza, controlando efetivamente a absorção de água. A bandeja de farelo de trigo se destacou pelo armazenamento de brócolis a 5 °C, mantendo frescor por 10 dias. A cera de carnaúba melhorou as embalagens de farelo de trigo em comparação com EPS, oferecendo alternativa mais sustentável. O uso de resíduos da agroindústria reduz o impacto ambiental e melhora a utilização de recursos, destacando a importância da inovação em embalagens sustentáveis.

4.2.5. REFERÊNCIAS

ALEXANDER, I.; SODRI, A.; MIZUNO, K. The Effect of Different Natural Waxes To Hydrophobic Properties of Starch-Based Biodegradable Foams. **Journal of Environmental Science and Sustainable Development**, v. 6, n. 1, p. 86–101, 2023.

ANKESH, S.; JAIKANT, K.; SANJEEV, G. PROPERTIES OF EXPANDED POLYSTYRENE (EPS) AND ITS ENVIRONMENTAL EFFECTS. **Advances and Applications in Mathematical Sciences**, v. 20, n. 10, p. 2151–2162, 2021.

BERGEL, B. F.; DA LUZ, L. M.; SANTANA, R. M. C. Effect of poly(lactic acid) coating on mechanical and physical properties of thermoplastic starch foams from potato starch. **Progress in Organic Coatings**, v. 118, n. January, p. 91–96, 2018.

CHAIREH, S.; NGASATOOL, P.; KAEWTATIP, K. Novel composite foam made from starch and water hyacinth with beeswax coating for food packaging applications. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 165, p. 1382–1391, 2020.

CRONIN, D. S.; OUELLET, S. Low density polyethylene, expanded polystyrene and expanded polypropylene: Strain rate and size effects on mechanical properties. **Polymer Testing**, v. 53, p. 40–50, 2016.

DE FREITAS, C. A. S. et al. Carnauba wax uses in food – A review. **Food Chemistry**, v. 291, n. December 2018, p. 38–48, 2019a.

DE FREITAS, C. A. S. et al. Carnauba wax uses in food – A review. **Food Chemistry**, v. 291, n. December 2018, p. 38–48, 2019b.

DOMOKOS-SZABOLCSY, É. et al. Comparison of Wet Fractionation Methods for Processing Broccoli Agricultural Wastes and Evaluation of the Nutri-Chemical Values of Obtained Products. **Foods**, v. 11, n. 16, 2022.

ENGEL, J. B.; AMBROSI, A.; TESSARO, I. C. Development of biodegradable starch-based foams incorporated with grape stalks for food packaging. **Carbohydrate Polymers**, v. 225, n. August, p. 115234, 2019.

GHIMIRE, U. et al. Identifying genes regulated during natural, on-plant senescence in broccoli (*Brassica oleracea*) in contrast to postharvest senescence. **Postharvest Biology and Technology**, v. 206, n. April, p. 112535, 2023.

HERSCHLAG, D.; PINNEY, M. M. Hydrogen Bonds: Simple after All? **Biochemistry**, v. 57, n. 24, p. 3338–3352, 2018.

ISMAIL, A. F.; KHULBE, K. C.; MATSUURA, T. **Residual Stress in Engineering Materials: A Review**. [s.l.] Elsevier, 2019.

JAYWANT, S. A.; SINGH, H.; ARIF, K. M. Sensors and Instruments for Brix Measurement: A Review. **Sensors**, v. 22, n. 6, 2022.

JUNIOR, E. J. M. R. et al. Chemistry, Biological Activities, and Uses of Carnauba Wax. **Reference Series in Phytochemistry**, n. January, p. 871–893, 2022.

KAEWATIP, K.; CHIARATHANAKRIT, C.; RIYAJAN, S. A. The effects of egg shell and shrimp shell on the properties of baked starch foam. **Powder Technology**, v. 335, p. 354–359, 2018.

LI, X. et al. Maintaining the quality of postharvest broccoli by inhibiting ethylene accumulation using diacetyl. **Frontiers in Nutrition**, v. 9, n. November, p. 1–12, 2022.

MUSTAFA, H. K.; ANWER, S. S.; ZRARY, T. J. Influence of pH, agitation speed, and temperature on growth of fungi isolated from Koya, Iraq. **Kuwait Journal of Science**, v. 50, n. 4, p. 657–664, 2023.

NADER, J. et al. Innovative Method for Determining Young's Modulus of Elasticity in Products with Irregular Shapes: Application on Peanuts. **Processes**, v. 11, n. 9, 2023.

NAIK, N. K. Ballistic impact behaviour of composites: Analytical formulation. **Dynamic Deformation, Damage and Fracture in Composite Materials and Structures, Second Edition**, p. 391–439, 1 jan. 2023.

NCUBE, L. K. et al. An overview of plasticwaste generation and management in food packaging industries. **Recycling**, v. 6, n. 1, p. 1–25, 2021.

NUGROHO, A. et al. Enhanced mechanical and physical properties of starch foam from the combination of water hyacinth fiber (*Eichhornia crassipes*) and polyvinyl alcohol. **Industrial Crops and Products**, v. 183, n. April, 2022.

OLIVER-ORTEGA, H. et al. Nanocomposites materials of pla reinforced with nanoclays using a masterbatch technology: A study of the mechanical performance and its sustainability. **Polymers**, v. 13, n. 13, 2021.

PELLEGRINO, R. et al. Storage time and temperature on the sensory properties broccoli. **Foods**, v. 8, n. 5, 2019.

REIS, M. O. et al. Characterization of coated biodegradable trays by spectroscopic techniques. **Industrial Crops and Products**, v. 112, n. January, p. 511–514, 2018.

RIGHETTI, M. C. et al. Thermal and Mechanical Properties of Biocomposites Made of Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) and Potato Pulp Powder. **Polymers 2019, Vol. 11, Page 308**, v. 11, n. 2, p. 308, 12 fev. 2019.

RODRIGUES, N. H. P. et al. Starch-based foam packaging developed from a by-product of potato industrialization (*Solanum tuberosum* L.). **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 10, n. 7, 2020.

SHELLER, H. V.; ULVSKOV, P. Hemicelluloses. **Annual Review of Plant Biology**, v. 61, p. 263–289, 2010.

SZTUPECKI, W. et al. **Functional and Nutritional Characteristics of Natural or Modified Wheat Bran Non-Starch Polysaccharides: A Literature Review.**

[s.l: s.n.]. v. 12

TABATABAEIAN, A. et al. **Residual Stress in Engineering Materials: A Review**. [s.l: s.n.]. v. 24

TANGKHAM, W. Effects of Cooking Methods on Sensory, Chemical, and Microbial Characteristics of Broccoli (*Brassica Oleracea*). **Journal of Food Industry**, v. 3, n. 1, p. 63, 2019.

CAPÍTULO 5 DISCUSSÃO GERAL

A dissertação apresentada traz avanços significativos na produção de embalagens sustentáveis, destacando o potencial de utilização de subprodutos agroindustriais para este fim. A comparação entre bandejas biodegradáveis contendo farinha de farelo de trigo e aquelas com farinha de casca de pitaya revelou importantes descobertas sobre as propriedades mecânicas e de biodegradabilidade das fibras e dos produtos desenvolvidos. É notável que ambas as embalagens demonstraram bom desempenho quando comparadas ao poliestireno expandido (EPS), uma vez que exibiram maior resistência ao impacto, maior dureza, maior força de tensão e de flexão. Esse resultado indica que as embalagens desenvolvidas com materiais orgânicos têm o potencial de superar alternativas convencionais em termos de robustez e durabilidade, sem comprometer sua capacidade de decomposição natural.

As fibras mostraram diferenças quanto a sua composição, o que explica as diferenças observadas nas análises mecânicas, de absorção de água e biodegradabilidade. A variação da composição gerou um impacto significativo nas propriedades das embalagens biodegradáveis produzidas a partir desses materiais. A concentração de fibra solúvel mais elevada na farinha de casca de pitaya contribuiu para uma maior capacidade de absorção de água, o que resultou na obtenção de uma embalagem menos resistente à umidade. Por outro lado, a maior quantidade de fibras insolúveis no farelo de trigo influenciou na resistência e rigidez das embalagens, fornecendo uma estrutura mais sólida. Além disso, os valores de hemicelulose, celulose e lignina encontrados sugeriram que suas propriedades estruturais são adequadas para a produção de embalagens biodegradáveis. A presença desses componentes, especialmente a celulose e a lignina, contribui para a resistência mecânica das embalagens, garantindo uma maior durabilidade durante o uso. Portanto, as diferenças na composição das fibras entre a farinha de casca de pitaya e o farelo de trigo não apenas influenciam as propriedades individuais desses materiais, mas também tiveram implicações importantes na formulação e no desempenho das embalagens biodegradáveis produzidas a partir delas. Essa compreensão detalhada da composição das fibras permitiu o desenvolvimento de embalagens

mais eficazes e adequadas para diferentes aplicações, contribuindo para uma maior chance de acerto entre produto/embalagem.

A concentração de fibras na produção das embalagens biodegradáveis, com ênfase na embalagem que utilizou 50% de farelo de trigo, aponta para uma nova direção na pesquisa de materiais sustentáveis. Essa abordagem não apenas reduz a dependência de recursos não renováveis, mas também cria um caminho para o problema do descarte de resíduos agroindustriais, transformando-os em produtos de maior valor agregado. Além disso, a rápida biodegradabilidade das bandejas, chegando a perder 50% de seu peso em apenas 49 dias, representa uma vantagem singular frente ao EPS em termos de impacto ambiental. Essa característica é crucial, especialmente em um cenário onde a preocupação com a redução do desperdício e a preservação dos recursos naturais está cada vez mais presente. Ainda é possível reverter parte do ônus da fabricação da embalagem através da geração de nutrientes que serão depositados no solo, vindo a fechar um ciclo produtivo pela geração de matéria orgânica, a qual será aproveitada por outros organismos posteriormente. Fato esse que não ocorre em embalagens fabricadas a partir de derivados do petróleo.

A introdução da cera de carnaúba nas bandejas de farelo de trigo e de farinha de casca de pitaya resultou em melhorias adicionais em suas propriedades mecânicas, impermeabilização e biodegradabilidade. Essa estratégia não apenas reforça a resistência das embalagens, mas também controla efetivamente a absorção de água, tornando-as adequadas para o armazenamento de alimentos frescos. A análise das embalagens de farelo de trigo para o armazenamento de brócolis em diferentes temperaturas ressaltou o resultado expressivo do poder impermeabilizante da cera de carnaúba permitindo o armazenamento de alimentos frescos nas bandejas, sem que essas sofram deformação, rasgos ou danos que inviabilizem sua utilização. A temperatura de armazenamento dos produtos também foi um parâmetro fundamental na preservação da qualidade dos alimentos, pois a refrigeração dos produtos pode ter inibido o crescimento de microrganismos de acordo com a análise visual. Esses resultados sugerem que as embalagens biodegradáveis não apenas oferecem uma alternativa sustentável para o armazenamento de

alimentos, mas também podem acondicionar os produtos armazenados de forma semelhante ao EPS.

Em suma, os resultados apresentados nesta pesquisa destacam a viabilidade e o potencial das embalagens biodegradáveis formuladas a partir de resíduos alimentares e cobertas com cera de carnaúba. Essas embalagens não apenas atendem às demandas por sustentabilidade e eficiência, mas também abrem caminho para uma abordagem mais abrangente na gestão de resíduos e na preservação do meio ambiente. Além disso, as perspectivas comerciais são igualmente animadoras, com potencial para a adoção em larga escala por parte da indústria de alimentos e embalagens. Quando mais empresas buscarem soluções sustentáveis para incrementar sua pegada ambiental e atender às demandas dos consumidores por produtos ecologicamente corretos, as embalagens biodegradáveis podem se tornar uma escolha cada vez mais popular e viável. Isso pode abrir novos mercados e oportunidades de negócios para empresas e profissionais que buscam liderar o caminho em direção a práticas mais sustentáveis. Por fim, as perspectivas sociais e ambientais são de grande importância, já que uma possível adoção generalizada dessas embalagens biodegradáveis implicaria um impacto significativo na redução da poluição plástica e na preservação dos recursos naturais.

CAPÍTULO 6 CONCLUSÃO

Na conclusão geral deste estudo, é essencial destacar o significativo avanço representado pela produção de embalagens biodegradáveis a partir de resíduos alimentares e cobertura de cera de carnaúba. Esta abordagem inovadora não apenas busca uma possível solução frente à crescente preocupação ambiental, mas também um caminho prático e sustentável para a problemática dos resíduos plásticos. Ao explorar materiais orgânicos disponíveis em abundância, como a casca de pitaya ou o farelo de trigo, e combiná-los com uma cobertura impermeabilizante de cera de carnaúba, demonstrou-se a viabilidade da utilização dessas embalagens. Além disso, as bandejas biodegradáveis são uma alternativa ecologicamente correta, que contém as propriedades necessárias para garantir a qualidade dos produtos embalados. Através de testes de resistência, permeabilidade a umidade, degradação e aplicação verificou-se que essas embalagens biodegradáveis atendem aos padrões exigidos para diferentes tipos de alimentos, podendo armazenar alimentos secos ou úmidos por tempo hábil até a chegada ao consumidor final. A bandeja que mais se destacou diante dos testes realizados foi a bandeja produzida com 50% de farelo de trigo e cobertura em cera de carnaúba, pois manteve seu formato até o final da análise de aplicabilidade em brócolis, apresentou propriedades mecânicas com valores maiores que o EPS e degradou-se em até 49 dias. Por fim, as embalagens biodegradáveis desenvolvidas neste estudo representam não apenas uma inovação tecnológica, mas também um passo importante em direção a um futuro mais sustentável para a indústria de embalagens. Ao incentivar a adoção dessas soluções e promover a conscientização sobre a importância da redução do uso de plásticos convencionais, espera-se contribuir para a preservação do meio ambiente e a promoção de práticas mais responsáveis no setor alimentício e de embalagens.

CAPÍTULO 7 PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

- Caracterização de outros possíveis resíduos para avaliação do uso na fabricação de embalagens biodegradáveis;
- Fabricação de embalagens com outros tipos de resíduos da agroindústria;
- Produção de outros moldes, para a fabricação não só de bandejas, mas de outros utensílios como copos, talheres ou outros artefatos;
- Incorporação de sementes na massa de fabricação das bandejas para que essas, caso sejam descartadas erroneamente, possam servir de pequenos possíveis pontos de reflorestamento;

CAPÍTULO 8 REFERÊNCIAS

- ABU HASSAN, N. A. *et al.* Cells analyses, mechanical and thermal stability of extruded polylactic acid/kenaf bio-composite foams. **Construction and Building Materials**, v. 240, p. 117884, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117884>
- AGÜERO, Á. *et al.* Valorization of linen processing by-products for the development of injection-molded green composite pieces of polylactide with improved performance. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 2, 2020. Available at: <https://doi.org/10.3390/su12020652>
- ALDAS, M. *et al.* Pine resin derivatives as sustainable additives to improve the mechanical and thermal properties of injected moulded thermoplastic starch. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 10, n. 7, 2020. Available at: <https://doi.org/10.3390/app10072561>
- ALEXANDER, I.; SODRI, A.; MIZUNO, K. The Effect of Different Natural Waxes To Hydrophobic Properties of Starch-Based Biodegradable Foams. **Journal of Environmental Science and Sustainable Development**, v. 6, n. 1, p. 86–101, 2023. Available at: <https://doi.org/10.7454/jessd.v6i1.1199>
- AMARAWEEERA, S. M. *et al.* Preparation and Characterization of Dual-Modified Cassava Starch-Based Biodegradable Foams for Sustainable Packaging Applications, 2022. Available at: <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c01292>
- ANGELINI, L. G. *et al.* Ramie fibers in a comparison between chemical and microbiological retting proposed for application in biocomposites. **Industrial Crops and Products**, v. 75, p. 178–184, 2015. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2015.05.004>
- ANKESH, S.; JAIKANT, K.; SANJEEV, G. PROPERTIES OF EXPANDED POLYSTYRENE (EPS) AND ITS ENVIRONMENTAL EFFECTS. **Advances and Applications in Mathematical Sciences**, v. 20, n. 10, p. 2151–2162, 2021.
- ASSIS, R. Q. *et al.* Synthesis of biodegradable films based on cassava starch containing free and nanoencapsulated β -carotene. **Packaging Technology and Science**, v. 31, n. 3, p. 157–166, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1002/pts.2364>
- BARRERA CASTRO, G. *et al.* Production and characterization of the mechanical and thermal properties of expanded polystyrene with recycled material // Producción y caracterización de las propiedades mecánicas y térmicas de poliestireno expandido con material reciclado. **Univ**, v. 21, n. 2, p. 177–194, 2017a. Available at: <https://doi.org/10.11144/Javeriana.iyu21-2.mtpe>
- BARRERA CASTRO, G. *et al.* Production and characterization of the mechanical and thermal properties of expanded polystyrene with recycled material // Producción y caracterización de las propiedades mecánicas y térmicas de poliestireno expandido con material reciclado. **Univ**, v. 21, n. 2, p. 177–194, 2017b. Available at: <https://doi.org/10.11144/Javeriana.iyu21-2.mtpe>
- BEHERA, A. K. *et al.* Assessment of Soil and Fungal Degradability of Thermoplastic Starch Reinforced Natural Fiber Composite. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 29, n. 4, p. 1031–1039, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01944-z>
- BEHERA, A. K.; MANNA, S.; DAS, N. Effect of Soy Waste/Cellulose on Mechanical, Water Sorption, and Biodegradation Properties of Thermoplastic Starch Composites. **Starch/Staerke**, v. 74, n. 1–2, p. 1–7, 2022. Available at: <https://doi.org/10.1002/star.202100123>

- BERGEL, B. F.; ARAUJO, L. L.; SANTANA, R. M. C. Effects of the addition of cotton fibers and cotton microfibers on the structure and mechanical properties of starch foams made from potato starch. **Carbohydrate Polymer Technologies and Applications**, v. 2, p. 100167, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100167>
- BERGEL, B. F.; DA LUZ, L. M.; SANTANA, R. M. C. Effect of poly(lactic acid) coating on mechanical and physical properties of thermoplastic starch foams from potato starch. **Progress in Organic Coatings**, v. 118, n. January, p. 91–96, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.01.029>
- BERGSTRAND, K. J. Organic fertilizers in greenhouse production systems – a review. **Scientia Horticulturae**, v. 295, n. December 2021, p. 110855, 2022. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110855>
- BHOWMIK, P. *et al.* Influence of natural crosslinker and fibre weightage on waste kibisu fibre reinforced wheatgluten biocomposite. **Journal of Polymer Research** v. 28, n. 4, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10965-021-02470-9>
- BRASIL. **PORTARIA Nº 177, DE 04 DE MARÇO DE 1999**. 1999.
- BRASIL. **Resolução – Rdc Nº 123, De 19 De Junho De 2001**. 2001.
- BRIONES, R. *et al.* Liquefaction of corn husks and properties of biodegradable biopolyol blends. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, [s. l.], v. 95, n. 11, p. 2973–2982, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1002/jctb.6458>
- BUENO, J. N. N. *et al.* Films based on mixtures of zein, chitosan, and PVA: Development with perspectives for food packaging application. **Polymer Testing**, v. 101, p. 107279, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107279>
- CABANILLAS, A. *et al.* Pineapple shell fiber as reinforcement in cassava starch foam trays. **Polymers and Polymer Composites**, v. 27, n. 8, p. 496–506, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1177/0967391119848187>
- CHAIREH, S.; NGASATOOL, P.; KAEWTATIP, K. Novel composite foam made from starch and water hyacinth with beeswax coating for food packaging applications. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 165, p. 1382–1391, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.10.007>
- CHEN, Z. *et al.* Wheat bran layers: composition, structure, fractionation, and potential uses in foods. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 0, n. 0, p. 1–24, 2023. Available at: <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2171962>
- CHENG, H. *et al.* Starch-based biodegradable packaging materials: A review of their preparation, characterization and diverse applications in the food industry. **Trends in Food Science & Technology**, v. 114, p. 70–82, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2021.05.017>
- CHIARATHANAKRIT, C.; RIYAJAN, S. A.; KAEWTATIP, K. Transforming fish scale waste into an efficient filler for starch foam. **Carbohydrate Polymers**, v. 188, n. January, p. 48–53, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.01.101>
- CHOTIPRAYON, P.; CHAISAWAD, B.; YOKSAN, R. Thermoplastic cassava starch/poly(lactic acid) blend reinforced with coir fibres. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 156, p. 960–968, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.04.121>
- CINELLI, P. *et al.* Biocomposites based on polyhydroxyalkanoates and natural fibres from renewable byproducts. **Applied Food Biotechnology**, v. 6, n. 1, p. 35–43, 2019. Available at: <https://doi.org/10.22037/afb.v6i1.22039>

- COELHO, C. C. S. *et al.* Effect of moderate electric fields in the properties of starch and chitosan films reinforced with microcrystalline cellulose. **Carbohydrate Polymers**, v. 174, p. 1181–1191, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2017.07.007>
- COELHO, P. M. *et al.* Resources , Conservation & Recycling : X Sustainability of reusable packaging – Current situation and trends. **Resources, Conservation & Recycling: X**, v. 6, n. April, p. 100037, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rcrx.2020.100037>
- COLTELLI, M.-B. *et al.* Compatibilization of Poly(Lactic Acid) (PLA)/Plasticized Cellulose Acetate Extruded Blends through the Addition of Reactively Extruded Comb Copolymers. **Molecules 2021, Vol. 26, Page 2006**, v. 26, n. 7, p. 2006, 2021. Available at: <https://doi.org/10.3390/MOLECULES26072006>. Acesso em: 20 set. 2021.
- CRONIN, D. S.; OUELLET, S. Low density polyethylene, expanded polystyrene and expanded polypropylene: Strain rate and size effects on mechanical properties. **Polymer Testing**, v. 53, p. 40–50, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.04.018>
- CRUZ-TIRADO, J. P. *et al.* Biodegradable foam tray based on starches isolated from different Peruvian species. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 125, p. 800–807, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.111>
- CRUZ-TIRADO, Jam Pier *et al.* The addition of sugarcane bagasse and asparagus peel enhances the properties of sweet potato starch foams. **Packaging Technology and Science**, v. 32, n. 5, p. 227–237, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1002/pts.2429>
- CURLING, S. F. *et al.* Feasibility of using straw in a strong, thin, pulp moulded packaging material. **Industrial Crops and Products**, v. 97, p. 395–400, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.12.042>
- DE FREITAS, C. A. S. *et al.* Carnauba wax uses in food – A review. **Food Chemistry**, v. 291, n. December 2018, p. 38–48, 2019a. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.133>
- DE FREITAS, C. A. S. *et al.* Carnauba wax uses in food – A review. **Food Chemistry** v. 291, n. December 2018, p. 38–48, 2019b. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.133>
- DE MACEDO, J. R. N.; DOS SANTOS, D. J.; DOS SANTOS ROSA, D. Poly(lactic acid)–thermoplastic starch–cotton composites: Starch-compatibilizing effects and composite biodegradability. **Journal of Applied Polymer Science**, [s. l.], v. 136, n. 21, p. 1–10, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1002/app.47490>
- DE SOUZA, G. B. *et al.* Método alternativo de fibra em detergente neutro e detergente ácido. **Embrapa Pecuária Sudeste. Boletim de Pesquisa**, [s. l.], p. 21, 1999. Available at: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/46109/4/PROCI_GBS199900154.pdf
- DEFRATES, K. *et al.* Protein Polymer-Based Nanoparticles: Fabrication and Medical Applications. **International Journal of Molecular Sciences 2018, Vol. 19, Page 1717**, v. 19, n. 1717, p. 1–20, 2018. Available at: <https://doi.org/10.3390/IJMS19061717>. Acesso em: 28 set. 2021.
- DOMOKOS-SZABOLCSY, É. *et al.* Comparison of Wet Fractionation Methods for Processing Broccoli Agricultural Wastes and Evaluation of the Nutri-Chemical Values of Obtained Products. **Foods**, v. 11, n. 16, 2022. Available at:

<https://doi.org/10.3390/foods11162418>

DONATI, N.; SPADA, J. C.; TESSARO, I. C. Recycling rice husk ash as a filler on biodegradable cassava starch-based foams. **Polymer Bulletin**, v. 80, n. 9, p. 10231–10248, 2023. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04557-9>

ECHEGARAY, N. *et al.* A critical review on protein-based smart packaging systems: Understanding the development, characteristics, innovations, and potential applications. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 0, n. 0, p. 1–16, 2023. Available at: <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2202256>

ELSAWY, M. A. *et al.* Hydrolytic degradation of polylactic acid (PLA) and its composites. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 79, p. 1346–1352, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.05.143>

ENGEL, Juliana B.; AMBROSI, A.; TESSARO, I. C. Development of biodegradable starch-based foams incorporated with grape stalks for food packaging. **Carbohydrate Polymers**, v. 225, n. August, p. 115234, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115234>

ENGEL, Juliana Both *et al.* Reuse of Different Agroindustrial Wastes: Pinhão and Pecan Nutshells Incorporated into Biocomposites Using Thermocompression. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 28, n. 5, p. 1431–1440, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01696-w>

ENGEL, Juliana Both; LUCHESE, C. L.; TESSARO, I. C. Making the reuse of agro-industrial wastes a reality for starch-based packaging sector: A storage case study of carrot cake and cherry tomatoes. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 206, n. March, p. 740–749, 2022. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.03.074>

FERREIRA, A. *et al.* Biosourced Disposable Trays Made of Brewer's Spent. **Polymers**, v. 11, n. 5, p. 1–14, 2019.

FERREIRA, V. C. *et al.* An updated review of recent applications and future perspectives on the sustainable valorization of pitaya (*Hylocereus* spp.) by-products. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 33, n. March, p. 101070, 2023. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101070>

FROLLINI, E. *et al.* Biocomposites based on poly(butylene succinate) and curaua: Mechanical and morphological properties. **Polymer Testing**, v. 45, p. 168–173, 2015. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.POLYMERTESTING.2015.06.009>

GALUS, S.; GAUDITZ, M.; KOWALSKA, H. Effects of Candelilla and Carnauba Wax Incorporation on the Functional Properties of Edible Sodium Caseinate Films. 2020.

GARCÍA-CRUZ, L. *et al.* Cultivation, quality attributes, postharvest behavior, bioactive compounds, and uses of *Stenocereus*: A review. **Scientia Horticulturae**, v. 304, n. July, 2022. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111336>

GHIMIRE, U. *et al.* Identifying genes regulated during natural, on-plant senescence in broccoli (*Brassica oleracea*) in contrast to postharvest senescence. **Postharvest Biology and Technology**, v. 206, n. April, p. 112535, 2023. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112535>

GIL-JASSO, N. D. *et al.* A methodology for recycling waste expanded polystyrene using flower essential oils. **Fuel**, v. 307, n. April 2021, 2022. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121835>

GROH, K. J. *et al.* Science of the Total Environment Overview of known plastic packaging-associated chemicals and their hazards. v. 651, p. 3253–3268, 2019.

Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.015>

HERSCHLAG, D.; PINNEY, M. M. Hydrogen Bonds: Simple after All? **Biochemistry**, v. 57, n. 24, p. 3338–3352, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1021/acs.biochem.8b00217>

HUANG, C.; ZHANG, X.; LIU, Z. Effects of Porosity on the Static Compression of Foam Buffer Materials of Plant Fiber and Their Numerical Model. **Shock and Vibration**, v. 2021, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1155/2021/5568653>

ISMAIL, A. F.; KHULBE, K. C.; MATSUURA, T. **Residual Stress in Engineering Materials: A Review**: Elsevier, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811468-1.00003-7>

IVANKOVIĆ, A. *et al.* BIODEGRADABLE PACKAGING IN THE FOOD INDUSTRY. **Journal of Food Safety and Food Quality**, v. 68, n. 2, p. 23–52, 2017. Available at: <https://doi.org/10.2376/0003-925X-68-26>. Acesso em: 27 set. 2021.

JAYWANT, S. A.; SINGH, H.; ARIF, K. M. Sensors and Instruments for Brix Measurement: A Review. **Sensors**, v. 22, n. 6, 2022. Available at: <https://doi.org/10.3390/s22062290>

JIANG, T. *et al.* Starch-based biodegradable materials: Challenges and opportunities. **Advanced Industrial and Engineering Polymer Research**, v. 3, n. 1, p. 8–18, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.AIEPR.2019.11.003>

JIMENEZ-PULIDO, I. J. *et al.* Impact of Protein Content on the Antioxidants, Anti-Inflammatory Properties and Glycemic Index of Wheat and Wheat Bran. **Foods**, v. 11, n. 14, 2022. Available at: <https://doi.org/10.3390/foods11142049>

JULLANUN, P.; YOKSAN, R. Morphological characteristics and properties of TPS/PLA/cassava pulp biocomposites. **Polymer Testing**, v. 88, n. November 2019, p. 106522, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106522>

JUNIOR, E. J. M. R. *et al.* Chemistry, Biological Activities, and Uses of Carnauba Wax. **Reference Series in Phytochemistry**, n. January, p. 871–893, 2022. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-91378-6_37

KAEWATIP, K.; CHIARATHANAKRIT, C.; RIYAJAN, S. A. The effects of egg shell and shrimp shell on the properties of baked starch foam. **Powder Technology**, v. 335, p. 354–359, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.05.030>

KASEMSIRI, P. *et al.* Optimization of Biodegradable Foam Composites from Cassava Starch, Oil Palm Fiber, Chitosan and Palm Oil Using Taguchi Method and Grey Relational Analysis. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 25, n. 2, p. 378–390, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10924-016-0818-z>

KHOO, H. E. *et al.* Betacyanins and Anthocyanins in Pulp and Peel of Red Pitaya (*Hylocereus polyrhizus* cv. Jindu), Inhibition of Oxidative Stress, Lipid Reducing, and Cytotoxic Effects. **Frontiers in Nutrition**, v. 9, n. June, p. 1–11, 2022. Available at: <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.894438>

KIM, S.; PARK, J.-B.; HWANG, I.-K. Quality Attributes of Various Varieties of Korean Red Pepper Powders (*Capsicum annuum* L.) and Color Stability During Sunlight Exposure. **Food Chemistry and Toxicology Quality**, v. 67, n. 8, p. 2957–2961, 2002.

LAI, S. *et al.* Micronization Effects on Structural, Functional, and Antioxidant Properties of Wheat Bran. **Foods**, [s. l.], v. 12, n. 98, p. 20 pages, 2023.

LI, X. *et al.* Maintaining the quality of postharvest broccoli by inhibiting ethylene

- accumulation using diacetyl. **Frontiers in Nutrition**, v. 9, n. November, p. 1–12, 2022. Available at: <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1055651>
- LIMA, E. M. B. *et al.* Biocomposites of PLA and Mango Seed Waste: Potential Material for Food Packaging and a Technological Alternative to Reduce Environmental Impact. **Starch - Stärke**, v. 73, n. 5–6, p. 2000118, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1002/STAR.202000118>. Acesso em: 20 set. 2021.
- MACHADO, C. M.; BENELLI, P.; TESSARO, I. C. Sesame cake incorporation on cassava starch foams for packaging use. **Industrial Crops and Products**, v. 102, p. 115–121, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.03.007>
- MACHADO, C. M.; BENELLI, P.; TESSARO, I. C. Study of interactions between cassava starch and peanut skin on biodegradable foams. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 147, p. 1343–1353, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.10.098>
- MEKONNEN, T. *et al.* Progress in bio-based plastics and plasticizing modifications. **Journal of Materials Chemistry A**, v. 1, n. 43, p. 13379–13398, 2013. Available at: <https://doi.org/10.1039/c3ta12555f>. Acesso em: 4 nov. 2021.
- MOHAMED, S. A. A.; EL-SAKHAWY, M.; EL-SAKHAWY, M. A. M. Polysaccharides, Protein and Lipid -Based Natural Edible Films in Food Packaging: A Review. **Carbohydrate Polymers**, v. 238, p. 116178, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2020.116178>
- MOO-TUN, N. M.; IÑIGUEZ-COVARRUBIAS, G.; VALADEZ-GONZALEZ, A. Assessing the effect of PLA, cellulose microfibers and CaCO₃ on the properties of starch-based foams using a factorial design. **Polymer Testing**, v. 86, n. December 2019, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106482>
- NADER, J. *et al.* Innovative Method for Determining Young's Modulus of Elasticity in Products with Irregular Shapes: Application on Peanuts. **Processes**, v. 11, n. 9, 2023. Available at: <https://doi.org/10.3390/pr11092532>
- NAIK, N. K. Ballistic impact behaviour of composites: Analytical formulation. **Dynamic Deformation, Damage and Fracture in Composite Materials and Structures, Second Edition**, p. 391–439, 2023. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823979-7.00015-6>
- NCUBE, L. K. *et al.* An overview of plasticwaste generation and management in food packaging industries. **Recycling**, v. 6, n. 1, p. 1–25, 2021. Available at: <https://doi.org/10.3390/recycling6010012>
- NCUBE, L. K. *et al.* Environmental impact of food packaging materials: A review of contemporary development from conventional plastics to polylactic acid based materials. **Materials**, v. 13, n. 21, p. 1–24, 2020. Available at: <https://doi.org/10.3390/ma13214994>
- NIDA, S.; MOSES, J. A.; ANANDHARAMAKRISHNAN, C. 3D Extrusion Printability of Sugarcane Bagasse Blended with Banana Peel for Prospective Food Packaging Applications. **Sugar Tech**, v. 24, n. 3, p. 764–778, 2022. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12355-021-01095-y>
- NUGROHO, A. *et al.* Enhanced mechanical and physical properties of starch foam from the combination of water hyacinth fiber (*Eichhornia crassipes*) and polyvinyl alcohol. **Industrial Crops and Products**, v. 183, n. April, 2022. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114936>
- OLIVER-ORTEGA, H. *et al.* Nanocomposites materials of pla reinforced with nanoclays using a masterbatch technology: A study of the mechanical

performance and its sustainability. **Polymers**, v. 13, n. 13, 2021. Available at: <https://doi.org/10.3390/polym13132133>

ORTIZ-BARAJAS, D. L. *et al.* Torrefaction of Coffee Husk Flour for the Development of Injection-Molded Green Composite Pieces of Polylactide with High Sustainability. **Applied Sciences** 2020, Vol. 10, Page 6468, v. 10, n. 18, p. 6468, 2020. Available at: <https://doi.org/10.3390/APP10186468>. Acesso em: 20 set. 2021.

PALMA-RODRÍGUEZ, H. M. *et al.* Efecto de las condiciones de almacenamiento en las propiedades mecánicas y microestructura en espumas biodegradables de almidón cocido. **CYTA - Journal of Food**, v. 14, n. 3, p. 415–422, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1080/19476337.2015.1117142>

PELLEGRINO, R. *et al.* Storage time and temperature on the sensory properties broccoli. **Foods**, v. 8, n. 5, 2019. Available at: <https://doi.org/10.3390/foods8050162>

PEREIRA DA SILVA, J. S. *et al.* Fully biodegradable composites based on poly(butylene adipate-co-terephthalate)/peach palm trees fiber. **Composites Part B: Engineering**, v. 129, p. 117–123, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.07.088>

QUILES-CARRILLO, L. *et al.* Enhancement of the mechanical and thermal properties of injection-molded polylactide parts by the addition of acrylated epoxidized soybean oil. **Materials & Design**, v. 140, p. 54–63, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2017.11.031>

RÂPĂ, M. *et al.* Influence of chitosan on mechanical, thermal, barrier and antimicrobial properties of PLA-biocomposites for food packaging. **Composites Part B: Engineering**, v. 102, p. 112–121, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2016.07.016>

RAZA, Z. A.; ABID, S.; BANAT, I. M. Polyhydroxyalkanoates: Characteristics, production, recent developments and applications. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 126, p. 45–56, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.IBIOD.2017.10.001>

REIS, M. O. *et al.* Characterization of coated biodegradable trays by spectroscopic techniques. **Industrial Crops and Products**, v. 112, n. January, p. 511–514, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.12.041>

REN, Q. *et al.* Cellulose nanofiber reinforced poly (lactic acid) with enhanced rheology, crystallization and foaming ability. **Carbohydrate Polymers**, v. 286, n. March, p. 119320, 2022a. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119320>

REN, Q. *et al.* Cellulose nanofiber reinforced poly (lactic acid) with enhanced rheology, crystallization and foaming ability. **Carbohydrate Polymers**, v. 286, n. March, p. 119320, 2022b. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119320>

RIGHETTI, M. C. *et al.* Thermal, mechanical, and rheological properties of biocomposites made of poly(Lactic acid) and potato pulp powder. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 20, n. 3, p. 1–17, 2019a. Available at: <https://doi.org/10.3390/ijms20030675>

RIGHETTI, M. C. *et al.* Thermal and Mechanical Properties of Biocomposites Made of Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) and Potato Pulp Powder. **Polymers** 2019, Vol. 11, Page 308, v. 11, n. 2, p. 308, 2019b. Available at: <https://doi.org/10.3390/POLYM11020308>. Acesso em: 20 set. 2021.

ROBERTS, A.; HAIGHTON, L. A. A hard look at FDA's review of GRAS notices.

- Regulatory Toxicology and Pharmacology**, v. 79, p. S124–S128, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.YRTPH.2016.06.011>
- RODRIGUES, N. H. P. *et al.* Starch-based foam packaging developed from a by-product of potato industrialization (*Solanum tuberosum* L.). **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 10, n. 7, 2020. Available at: <https://doi.org/10.3390/app10072235>
- ROMAN-BRITO, J. A. *et al.* Physicomechanical Properties and Biodegradation Rate of Composites Made from Plantain and Chayotextle Starch/Fiber. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 28, n. 10, p. 2710–2719, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01805-9>
- ROMÁN-MORENO, J. L. *et al.* Effect of size and amount of sugarcane fibers on the properties of baked foams based on plantain flour. **Heliyon**, v. 6, n. 9, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04927>
- SAENGHIRUNWATTANA, P.; NOOMHORM, A.; RUNGSARDTHONG, V. Mechanical properties of soy protein based “green” composites reinforced with surface modified cornhusk fiber. **Industrial Crops & Products**, v. 60, p. 144–150, 2014a. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.06.010>
- SAENGHIRUNWATTANA, P.; NOOMHORM, A.; RUNGSARDTHONG, V. Mechanical properties of soy protein based “green” composites reinforced with surface modified cornhusk fiber. **Industrial Crops and Products**, v. 60, p. 144–150, 2014b. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2014.06.010>
- SAHRAEE, S. *et al.* Protection of foods against oxidative deterioration using edible films and coatings: A review. **Food Bioscience**, v. 32, p. 100451, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.FBIO.2019.100451>
- SALGADO, P. R. *et al.* Recent Developments in Smart Food Packaging Focused on Biobased and Biodegradable Polymers. v. 5, n. April, p. 1–30, 2021. Available at: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.630393>
- SÁNCHEZ, D. *et al.* Physicochemical Characterization and Evaluation of Pecan Nutshell as Biofiller in a Matrix of Poly (lactic acid). **Journal of Polymers and the Environment**, v. 27, n. 3, p. 521–532, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01374-6>
- SANTOS, T. A. dos *et al.* Properties of chitosan–papain biopolymers reinforced with cellulose nanofibers. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 45, n. 9, p. e15740, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1111/JFPP.15740>. Acesso em: 20 set. 2021.
- SHELLER, H. V.; ULVSKOV, P. Hemicelluloses. **Annual Review of Plant Biology**, v. 61, p. 263–289, 2010. Available at: <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042809-112315>
- SHAH, K. *et al.* Pitaya Nutrition, Biology, and Biotechnology: A Review. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 24, n. 18, p. 1–28, 2023. Available at: <https://doi.org/10.3390/ijms241813986>
- SHEWRY, P. R. Wheat. **Journal of Experimental Botany**, v. 60, n. 6, p. 1537–1553, 2009. Available at: <https://doi.org/10.1093/jxb/erp058>
- SIDDEEG, S. M.; TAHOON, M. A.; BEN REBAH, F. Agro-industrial waste materials and wastewater as growth media for microbial biofloculants production: A review. **Materials Research Express**, v. 7, n. 1, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab5980>
- SINGH, R.; SHITIZ, K.; SINGH, A. Chitin and chitosan: biopolymers for wound management. **International Wound Journal**, v. 14, n. 6, p. 1276–1289, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1111/IWJ.12797>

- SKENDI, A. *et al.* Advances on the Valorisation and Functionalization of By-Products and Wastes from Cereal-Based Processing Industry. **Foods**, , v. 9, n. 1243, p. 28, 2020.
- 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**, v. 24, p. 111–119, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.FBIO.2018.06.006>
- SUN, K. Q. *et al.* CaCO₃ blowing agent mixing method for biomass composites improved buffer packaging performance. **RSC Advances**, v. 11, n. 4, p. 2501–2511, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1039/d0ra06477g>
- SZTUPECKI, W. *et al.* **Functional and Nutritional Characteristics of Natural or Modified Wheat Bran Non-Starch Polysaccharides: A Literature Review**. 2023. ISSN 23048158.v. 12 Available at: <https://doi.org/10.3390/foods12142693>
- TABATABAEIAN, A. *et al.* **Residual Stress in Engineering Materials: A Review**. 2022. ISSN 15272648.v. 24 Available at: <https://doi.org/10.1002/adem.202100786>
- TAGHIAN DINANI, S.; VAN DER GOOT, A. J. Challenges and solutions of extracting value-added ingredients from fruit and vegetable by-products: a review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 63, n. 25, p. 7749–7771, 2022. Available at: <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2049692>
- TAGLIAPIETRA, B. L. *et al.* Non-conventional starch sources. **Current Opinion in Food Science**, v. 39, p. 93–102, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.COFS.2020.11.011>
- TAHARUDDIN, N. H. *et al.* Characterization of Potential Cellulose from *Hylocereus Polyrhizus* (Dragon Fruit) peel: A Study on Physicochemical and Thermal Properties. **Journal of Renewable Materials**, v. 11, n. 1, p. 131–145, 2023. Available at: <https://doi.org/10.32604/jrm.2022.021528>
- TANGKHAM, W. Effects of Cooking Methods on Sensory, Chemical, and Microbial Characteristics of Broccoli (*Brassica Oleracea*). **Journal of Food Industry**, v. 3, n. 1, p. 63, 2019. Available at: <https://doi.org/10.5296/jfi.v3i1.16039>
- TAPIA-BLÁCIDO, D. R. *et al.* Trends and challenges of starch-based foams for use as food packaging and food container. **Trends in Food Science and Technology**, v. 119, n. January 2021, p. 257–271, 2022. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.12.005>
- TAWAKKAL, I. S. M. A.; CRAN, M. J.; BIGGER, S. W. LWT - Food Science and Technology Release of thymol from poly (lactic acid) -based antimicrobial fi lms containing kenaf fi bres as natural fi ller. [*s. l.*], v. 66, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.11.011>
- TAWAKKAL, I. S. M. A.; CRAN, M. J.; BIGGER, S. W. The influence of chemically treated natural fibers in poly(lactic acid) composites containing thymol. **Polymer Composites**, v. 39, n. 4, p. 1261–1272, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1002/pc.24062>
- THOMAS, S. K. *et al.* A comprehensive review on cellulose, chitin, and starch as fillers in natural rubber biocomposites. **Carbohydrate Polymer Technologies and Applications**, v. 2, p. 100095, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.CARPTA.2021.100095>
- TURNER, A. Foamed Polystyrene in the Marine Environment: Sources, Additives, Transport, Behavior, and Impacts. **Environmental Science and Technolog**, v. 54, n. 17, p. 10411–10420, 2020. Available at:

<https://doi.org/10.1021/acs.est.0c03221>

UTPOTT, M. *et al.* Characterization and application of red pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) peel powder as a fat replacer in ice cream. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 44, n. 5, p. 1–10, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1111/jfpp.14420>

VARGAS-TORRES, A. *et al.* Biodegradable baked foam made with chayotextle starch mixed with plantain flour and wood fiber. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 134, n. 48, p. 1–8, 2017a. Available at: <https://doi.org/10.1002/app.45565>

VARGAS-TORRES, A. *et al.* Biodegradable baked foam made with chayotextle starch mixed with plantain flour and wood fiber, v. 45565, p. 1–8, 2017b. Available at: <https://doi.org/10.1002/app.45565>

VERSINO, F.; LÓPEZ, O. V.; GARCÍA, M. A. Sunflower Oil Industry By-product as Natural Filler of Biocomposite Foams for Packaging Applications. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 29, n. 6, p. 1869–1879, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01981-8>

VIEYRA, H. *et al.* Engineering, Recyclable, and Biodegradable Plastics in the Automotive Industry: A Review. **Polymers**, v. 14, n. 16, 2022. Available at: <https://doi.org/10.3390/polym14163412>

WEI, Y. C. *et al.* The crosslinking of chitosan fibers. **Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry**, v. 30, n. 10, p. 2187–2193, 1992. Available at: <https://doi.org/10.1002/POLA.1992.080301013>

YANG, W. *et al.* Preparation of biodegradable foam from walnut shells treated by subcritical water. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 90, n. 1, p. 44–49, 2015. Available at: <https://doi.org/10.1002/jctb.4451>

YAP, S. Y. *et al.* Characterization and Biodegradability of Rice Husk-Filled Polymer Composites. **Polymers**, v. 13, n. 1, p. 104, 2020. Available at: <https://doi.org/10.3390/polym13010104>

ZHANG, C. *et al.* A new biodegradable composite with open cell by combining modified starch and plant fibers. **Materials and Design**, v. 120, p. 222–229, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.02.027>

ZHAO, X. *et al.* Value-added use of invasive plant-derived fibers as PHBV fillers for biocomposite development. **Polymers**, v. 13, n. 12, 2021. Available at: <https://doi.org/10.3390/polym13121975>