

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ISABELLA CRISTINA SANTOS SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE FILMES EXTRUSADOS A BASE DE FARINHA DE
TRIGO E BAGAÇO DE MALTE**

LONDRINA

2023

ISABELLA CRISTINA SANTOS SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE FILMES EXTRUSADOS A BASE DE FARINHA DE
TRIGO E BAGAÇO DE MALTE**

Development of extruded film based on wheat flour and malt bagasse

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Tecnólogo em Alimentos do Curso Superior em Tecnologia em Alimentos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR campus Londrina.

Orientadora: Profa. Dra. Marianne Ayumi Shirai
Coorientadora: Ma. Geane Cristiane Balan

LONDRINA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

ISABELLA CRISTINA SANTOS SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE FILMES EXTRUSADOS A BASE DE FARINHA DE
TRIGO E BAGAÇO DE MALTE**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Tecnólogo em Alimentos do Curso Superior em
Tecnologia em Alimentos da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná - UTFPR campus Londrina.

Data de aprovação: 13 de junho de 2023

Marianne Ayumi Shirai - Orientadora
Doutorado em Ciência de Alimentos pela Universidade Estadual de Londrina
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Amélia Elena Terrile – Membro avaliador
Doutorado em Química pela Universidade Estadual de Londrina
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Luciana Furlaneto-Maia – Membro avaliador
Doutorado em Biologia Celular e Molecular pela Universidade Federal do Paraná
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LONDRINA

2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Ronaldo Henrique da Silva e Jandira Rodrigues dos Santos e meu irmão Ronaldo Henrique da Silva Filho, por sempre prestarem o suporte necessário e incentivo durante toda a minha vida, me apoiando nos momentos em que mais precisei, sem eles não conseguiria concretizar esta grande conquista. Agradeço a minha avó Maria de Souza (*in memoriam*), que já se foi, mas fez tanto por mim ao longo de sua vida e continua sendo minha maior força.

Agradeço aos meus amigos e familiares que estiveram ao meu lado durante esta longa caminhada, incentivando e mostrando que os sonhos podem ser concretizados.

Agradeço também a todos os meus professores que contribuíram com a minha trajetória acadêmica, em especial o Prof. Dr. Paulo de Tarso Carvalho.

Outra pessoa fundamental para a realização deste trabalho foi minha orientadora, a professora Dra. Marianne, a quem tenho profundos agradecimentos, por toda disponibilidade, paciência, comprometimento e compreensão. Fico muito feliz em ter tido você como orientadora neste trabalho.

Não posso deixar de agradecer ao Prof. Dr. Fabio Yamashita por ceder o equipamento e material para produção e caracterização dos filmes, à Geane Cristiane Balan pela doação e análise da farinha de trigo e todos os professores que fizeram parte da minha jornada, e que prezam pela qualidade de ensino e por serem excelentes professores.

Agradeço ao Laboratório Multiusuário do Campus Londrina da Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelas análises realizadas.

RESUMO

O crescimento populacional tem levado a um aumento na geração de resíduos sólidos e as embalagens plásticas têm contribuído com esse impacto negativo ao meio ambiente. Neste sentido, diversas pesquisas estão sendo direcionadas ao desenvolvimento de materiais biodegradáveis utilizando-se amido, farinhas, proteínas e polímeros biodegradáveis sintéticos como o poli (adipato co-tereftalato de butileno) (PBAT). O bagaço de malte (BM) é um subproduto da indústria cervejeira de baixo valor agregado, mas é rico em fibras e proteínas, sendo um potencial produto a ser incorporado na formulação de filmes. Este trabalho teve como objetivo produzir filmes de farinha de trigo e PBAT adicionados de diferentes concentrações de BM por extrusão sopro. Os filmes produzidos foram caracterizados quanto às propriedades mecânicas, espessura, permeabilidade ao vapor de água (PVA), solubilidade em água e morfologia. Foi possível a produção dos filmes por extrusão sopro em balão em escala piloto. O bagaço de malte apresentou um teor de fibras de 60%, impactando diretamente nas propriedades dos filmes. Com relação à PVA, os filmes não apresentaram diferença significativa, sugerindo que a adição de BM reduziu a hidrofobicidade. Porém, o aumento na concentração de BM interferiu significativamente nas propriedades mecânicas, com redução na elongação na ruptura e resistência à tração e elevação do módulo de Young. A incorporação de BM tornou os filmes opacos, com a superfície heterogênea, rugosa e com coloração amarelada. Dentre as formulações obtidas, o filme com 2,5 % de BM foi o que apresentou propriedades mais próximas do controle, indicando sua potencial aplicação na produção de embalagens secundárias ou para alimentos secos, sendo também uma forma de agregar valor a um subproduto e amenizar o depósito de resíduos sólidos no meio ambiente.

Palavras-chave: embalagem; biopolímeros; subproduto da cerveja; fibras.

ABSTRACT

Population growth has led to an increase in the generation of solid waste and plastic packaging has contributed to this negative impact on the environment. In this sense, several researches are being directed to the development of biodegradable materials using starch, flours, proteins and synthetic biodegradable polymer such as poly (adipate co-butylene terephthalate) (PBAT). Malt bagasse (BM) is a by-product of the brewing industry with low added value, but it is rich in fibers and proteins, being a potential product to be incorporated in the film's formulation. This work aimed to produce films of wheat flour and PBAT added with different concentrations of BM by blow extrusion. The produced films were characterized in terms of mechanical properties, thickness, water vapor permeability (WVP), water solubility and morphology. It was possible to produce the films by blow extrusion on a pilot scale. The BM showed fiber content of 60%, and impacted directly on the properties of the films. With regard to WVP, the films showed no significant difference, suggesting that the addition of BM reduced the hydrophilicity. However, the increase in the BM concentration significantly interfered in the mechanical properties, with a reduction in elongation at break and tensile strength and an increase in Young's modulus. With the incorporation of BM, the films became opaque, with a heterogeneous, rough and yellowish surface. Among the developed formulations, film with 2.5% of BM was the one that presented properties closest to the control, indicating its potential application in the production of secondary packaging or for dry foods, also being a way to add value to a by-product and minimize the deposit of solid waste in the environment.

Keywords: packaging, biopolymers, brewer byproduct, fiber.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Estrutura química do PBAT.....	17
Figura 2 - Imagem ilustrativa da estrutura do grão de trigo.....	19
Figura 3 - Extrusora e a formação do balão dos filmes.....	14
Figura 4 - Peneira e bagaço de malte seco.....	24
Figura 5 - Mistura da formulação do filme controle	25
Figura 6- Microscopia eletrônica de varredura e aspecto visual dos filmes de farinha de trigo, PBAT e bagaço de malte	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição dos filmes.....	25
Tabela 2 - Espessura dos filmes de farinha de trigo, PBAT e bagaço de malte.....	31
Tabela 3 - Cor e opacidade aparente de filmes de farinha de trigo, PBAT e bagaço de malte	31
Tabela 4 - Propriedades mecânicas dos filmes de farinha de trigo, PBAT e bagaço de malte.....	33
Tabela 5 - Permeabilidade ao vapor da água e solubilidade de filmes de farinha de trigo, PBAT e bagaço de malte.....	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CHCl ₃	Clorofórmio
DMSO	Dimetilsulfóxido
DMA	Dimetilacetamida
mm	Milímetro
NMP	Metilpirrolidona
PBAT	Poli(butileno adipato co-tereftalato)
PVA	Permeabilidade ao vapor de água
PVC	Policloreto de vinila
PET	Tereftalato de polietileno
PCL	Policaprolactona
rpm	Rotação por minuto

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. OBJETIVO GERAL.....	14
2.1 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	14
3. EMBALAGEM PARA ALIMENTOS.....	15
3.1 POLÍMEROS BIODEGRADÁVEIS.....	16
3.2 BAGAÇO DE MALTE.....	17
3.3 FARINHA DE TRIGO.....	18
3.4 ADITIVOS E PLASTIFICANTES NA PRODUÇÃO DE FILME BIODEGRADÁVEL.....	20
3.5 PRODUÇÃO DE FILMES POR EXTRUSÃO.....	21
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
4.1 MATERIAL.....	23
4.2 MÉTODOS.....	23
4.2.1 Coleta e secagem do bagaço de malte.....	23
4.2.2 Determinação do teor de fibra bruta do bagaço de malte.....	24
4.2.3 Produção dos filmes por extrusão sopro em balão.....	24
4.2.4 Caracterização do filme.....	25
4.2.4.1 Microscopia eletrônica de varredura(MEV).....	26
4.2.4.2 Espessura.....	26
4.2.4.2. Cor e Opacidade aparente.....	26
4.2.4.3 Propriedades Mecânicas.....	27
4.2.4.4 Permeabilidade ao vapor de água(PVA).....	27
4.2.4.5 Solubilidade em água.....	28
4.2.5 Análise estatística.....	28
5.RESULTADO E DISCUSSÃO.....	29
5.1 ASPECTO VISUAL E MICROSCÓPIO ELETRÔNICA DE VARREDURA DA SUPERFÍCIE (MV).....	29
5.2 ESPESSURA.....	30
5.3 COR E OPACIDADE.....	31
5.4 PROPRIEDADE MECÂNICA.....	32
5.5 PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA E SOLUBILIDADE.....	34
6. CONCLUSÃO.....	36
REFERÊNCIAS.....	37

1 INTRODUÇÃO

A embalagem desempenha um papel fundamental na indústria alimentícia devido às suas múltiplas funções. Além de conter o conteúdo do produto, a embalagem é de grande importância em termos de proteção, qualidade e segurança, além de ser uma barreira contra fatores que causam deterioração química, física e microbiológica (JORGE, 2013).

Em virtude da sua importância e necessidade de seu uso, o impacto do plástico no meio ambiente e na saúde humana está crescendo consideravelmente nas últimas décadas. Os plásticos, principalmente de origem fóssil, contribuem para as emissões de dióxido de carbono, o que favorece as mudanças climáticas. Mattos (2006) cita que um dos motivos é o consumo descontrolado, que muitas vezes é incentivado por propagandas consumistas e preconiza o uso de produtos não duráveis, resultando na geração de grandes quantidades de resíduos, muitas vezes sintéticos, o que dificulta sua disposição final e, portanto, danos a conservação dos recursos naturais.

Um dos principais responsáveis por esses efeitos no ecossistema do nosso planeta e para a saúde humana é o polietileno, que é um polímero sintético utilizado na produção de embalagens, principalmente na fabricação de sacolas plásticas (TELES, 2020). Durante a pandemia do COVID-19 o mercado brasileiro apresentou alta produção e consumo de embalagens plásticas e flexíveis, atingindo uma produção de 2,088 milhões de toneladas e um consumo per capita de 9,1 kg/habitante. A indústria alimentícia foi a que mais consumiu embalagens, chegando a 826.000 toneladas, sendo 321.000 toneladas para aplicações industriais, 239.000 toneladas para descartáveis e 200.000 toneladas para bebidas (ABIEF, 2021).

Segundo Landim *et al.* (2016) em decorrência dos impactos gerados pela utilização do plástico, os materiais biodegradáveis estão se destacando e tendo um maior desenvolvimento. Neste sentido, materiais à base de amido e farinha de trigo tem-se destacado com uma alternativa interessante pelo baixo custo e facilidade de obtenção. Além disso, subprodutos da indústria de alimentos, como o bagaço de malte, tem-se mostrado como um promissor agente de reforço aos filmes devido à significativa presença de fibras (BALAN *et al.*, 2021; MELLO; MALI, 2014).

Diversos estudos buscam viabilizar a produção de filmes biodegradáveis com extrusoras comumente utilizadas na produção de materiais sintéticos. A extrusão

termoplástica é uma operação versátil e de baixo custo que converte energia mecânica em energia térmica para o processamento de materiais poliméricos (SOTHORNVIT *et al.*, 2007). O processo envolve aquecimento contínuo para misturar, plastificar e gelatinizar o amido, desnaturar o material proteico e criar novas estruturas. Esse notável interesse é devido ao seu potencial de aplicação nos setores alimentício, agrícola e por sua alta biodegradabilidade (MONTEIRO, 2017).

Portanto, este trabalho teve como objetivo produzir e caracterizar filmes biodegradáveis extrusados à base de farinha de trigo e PBAT e adicionados de diferentes concentrações de bagaço de malte, visando proporcionar uma alternativa de utilizar os resíduos gerados pela indústria cervejeira.

2 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um filme biodegradável por extrusão à base de farinha de trigo e bagaço de malte.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Produzir um filme biodegradável por extrusão a base de farinha de trigo, glicerol e PBAT com diferentes concentrações de bagaço de malte;
- Determinar a espessura, propriedades mecânicas, capacidade de absorção de água e a morfologia dos filmes.
- Avaliar as características físico-química do resíduo utilizado por meio da análise de fibras brutas.
- Avaliar o método de extrusão sopro em balão.

3 EMBALAGEM PARA ALIMENTOS

As embalagens são recipientes que contêm produtos e devem garantir o transporte, a distribuição e o manuseio, além de proteger os produtos contra choque, vibração e compressão durante a viagem. A embalagem deve proteger o produto contra adulteração ou perda de integridade, deve manter a qualidade e a segurança do produto, prolongar sua vida útil e minimizar a perda por deterioração, informar ao consumidor a origem do alimento, seu conteúdo, valor, composição, data de fabricação e validade (TELES, 2020).

Para isso, deve controlar fatores como umidade, oxigênio, luz e atuar como barreira aos microrganismos, impedindo que se desenvolvam no produto. A embalagem deve ser produzida com materiais e substâncias que não migrem para o produto em quantidades que possam comprometer a segurança do consumidor (LANDIM *et al.*, 2016).

Segundo Landim *et al.* (2016), as embalagens são categorizadas em três grupos:

- Primárias: estão em contato direto com o produto por exemplo: pouch, pote de geleia;
- Secundárias: têm a função de agrupar, facilitando a manipulação e a apresentação. Proteger a embalagem primária, em seu interior, evitando choques e vibrações excessivas. Exemplo: caixa da lasanha, saco de bala;
- Terciária: agrupamento de embalagens maiores que protege a mercadoria durante o transporte. Exemplo: pallets.

Existem quatro matérias primas principais para produzir embalagens, sendo o polímero que produz, por exemplo, o PVC, polipropileno, polietileno e o PET; O metal produz o alumínio e a folha de flandres; O vidro é utilizado para fabricar garrafas, frascos e potes e por fim o papel que fabrica o papelão (LANDIM *et al.*, 2016).

A indústria de embalagens é uma das grandes responsáveis pela geração de resíduos, principalmente o plástico, que faz parte da vida cotidiana desde sua criação no final do século XIX. Estima-se que mais de 9 bilhões de toneladas de plástico foram produzidas, dois terços dos quais já foram jogados no lixo, enquanto um terço ainda está em uso. Deste total, apenas cerca de 10% é reciclado ou reutilizado para novas funcionalidades ou aplicações (CONCEIÇÃO *et al.*, 2019). Grande parte destes

permanece por centenas ou milhares de anos no ambiente, causando uma crise ambiental e diversos problemas econômicos e sociais (LANDIM *et al.*, 2016).

Devido ao uso extensivo de embalagens petroquímicas, o descarte de resíduos desses materiais tornou-se um problema ambiental. Com isso, é necessário a utilização de materiais que reduzem o impacto negativo, como os polímeros biodegradáveis (SILVA; RABELO; 2017).

3.1 POLÍMEROS BIODEGRADÁVEIS

Os polímeros biodegradáveis podem ser obtidos a partir de recursos naturais renováveis, como milho, celulose, batata e cana-de-açúcar e de origem animal, como quitina, quitosana ou proteínas. Os polímeros produzidos por microrganismos (PHA), por via biotecnológica (PLA) e os provenientes da indústria petroquímica são também categorizados como polímeros biodegradáveis. Os polímeros biodegradáveis derivados do petróleo mais conhecidos são policaprolactona (PCL), poliésteramidas, copoliésteres alifáticos como poli(butileno succinato) (PBS) e copoliésteres aromáticos como o poli(butileno adipato-co-butileno tereftalato) (PBAT) (AVÉROUS; BOQUILLON, 2004; BRITO *et al.*, 2011; NAMPOOTHIRI; NAIR; JOHN, 2010)

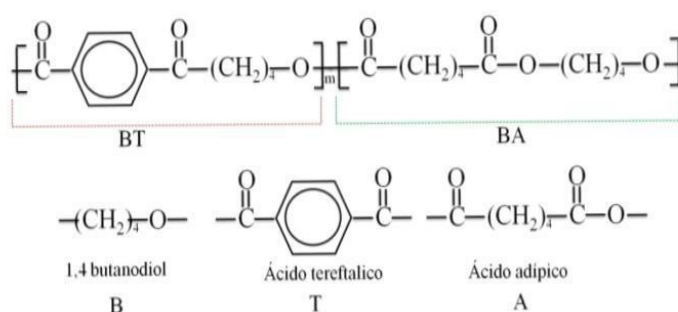
De acordo com *American Standard for Testing and Methods* (ASTM-D-883-22) os polímeros biodegradáveis são materiais sintéticos ou naturais. Sua degradação é causada principalmente pela ação de microrganismos, como fungos, bactérias e algas de ocorrência natural que produzem dióxido de carbono (CO₂), metano, componentes celulares e outros produtos.

O processo de biodegradação de materiais poliméricos ocorre basicamente por meio de dois mecanismos diferentes, dependendo das propriedades do polímero e de seu ambiente: hidrólise e oxidação biológica. Para que ocorra a degradação microbiana, as enzimas necessárias para quebrar as ligações da cadeia polimérica devem ser produzidas no processo, o que é necessário para sustentar o desenvolvimento da colônia microbiana. O tempo de degradação do produto está relacionado com a proliferação da colônia e sua estrutura química. Para acelerar esse processo, catalisadores, aditivos e até misturas são adicionados a alguns polímeros sintéticos para formar blendas com outros polímeros biodegradáveis para acelerar seu processo de biodegradação. O maior grupo de compostos biodegradáveis de alta

massa molar são os poliésteres. São polímeros que contêm grupos funcionais éster em sua estrutura e são facilmente atacados por fungos por hidrólise (SILVA; RABELO; 2017).

O polímero utilizado neste trabalho é o PBAT (Figura 1), um polímero aromático-alifático biodegradável e possui as seguintes propriedades: translúcido, estrutura semicristalina; boa estabilidade térmica até 230°C; facilidade de laminação com outras estruturas; altamente compatível com materiais de origem renovável (amido, papel, casca de arroz, fibras naturais); além de ser um polímero 100% compostável e reciclável. Ainda possui massa molecular média de 66.500 g/mol e ponto de fusão de 110 a 120 °C, é hidrofóbico e solúvel em solventes orgânicos de dimetilsulfóxido (DMSO), dimetilacetamida (DMA), metilpirrolidona (NMP) e clorofórmio (CHCl₃) (SCHIMITBERGER, 2015).

Figura 1- Estrutura química do PBAT



Fonte: Kijchavengkul, Auras e Rubino (2010)

3.2 BAGAÇO DE MALTE

Durante a produção da cerveja, existem certos resíduos inerentes ao processo de fabricação da bebida, como o bagaço de malte, o trub e a levedura. O bagaço de malte é produzido durante a etapa de mosturação e após a exaustão dos grãos de malte moídos, quando todos os compostos solúveis foram extraídos para a composição e clarificação do mosto doce, durante o qual o bagaço desempenha um papel importante como torta de filtro. Este resíduo é o maior resíduo sólido produzido no processo cervejeiro (cerca de 85% do total) e é produzido em grandes quantidades ao longo do ano com baixo ou nenhum custo de aquisição e alto valor nutricional (ALIYU; BALA; 2011). Em geral, cada 100 kg de grão processado rende 125-130 kg

de bagaço úmido com teor de umidade em torno de 80-85%, equivalente a cerca de 14-20 kg de bagaço para 1 litro de cerveja (FILLAUDEAU *et al.*, 2006).

O bagaço de malte contém principalmente fibras (70% do peso seco) e proteínas (15% a 25% do peso seco), bem como lipídios, minerais, vitaminas, aminoácidos e compostos fenólicos (ALIYU; BALA, 2011; ROBERTSON *et al.*, 2010; MUSSATO; DRAGONE; ROBERTO, 2006). O destino usual é a venda para o processamento de ração animal. Segundo Aliyu e Bala (2011), várias aplicações podem ser citadas como: alimentação e nutrição de animais e humanos, produção de energia de biogás por combustão direta ou fermentação anaeróbica; em produção de carvão vegetal, material adsorvente em tratamento químico e cultura microbiana.

Com relação à sua aplicação no desenvolvimento de materiais, o bagaço de malte foi empregado na produção de bandejas à base de amido. Os resultados mostraram que a adição de até 10% (m/m) de bagaço de malte resultou na redução da higroscopicidade do material. Entretanto, os autores ainda sugerem que estas bandejas à base de amido sejam utilizadas para embalar alimentos secos e de baixa umidade (MELLO; MALI, 2014; FERREIRA; MOLINA; PELISSARI, 2020). Em outra pesquisa, o bagaço de malte foi utilizado na produção de filme composto à base de amido de milho pela técnica de casting. As autoras relataram que a granulometria do bagaço interferiu nas propriedades mecânicas e térmicas, sendo que baixas concentrações e tamanho resultaram em compósitos com propriedades mecânicas equilibradas em razão de sua maior relação superfície-volume (CASTANHO; PRADO; PAIVA, 2021).

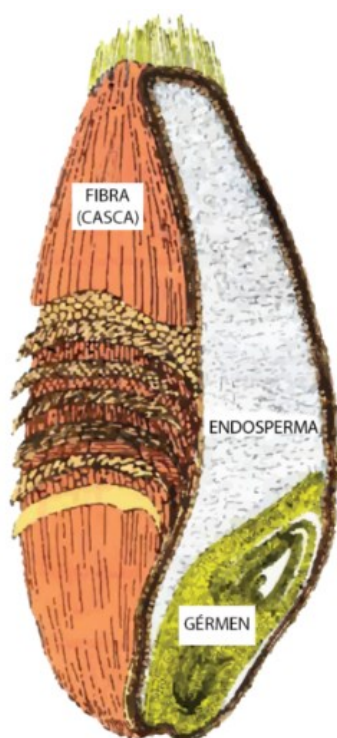
Conforme exposto, poucos trabalhos relatam a produção por extrusão de filmes adicionados de bagaço de malte, mostrando-se assim a importância de pesquisas nesse sentido.

3.3 FARINHA DE TRIGO

Os grãos desempenham um papel importante na nutrição humana, em termos de saúde, como fonte de nutrientes e fibras, e tecnicamente, pelas diversas formas disponíveis para consumo humano. A produção de trigo ocupa o primeiro lugar no mundo, e há uma grande variedade de produtos. O processo de moagem para

obtenção da farinha de trigo branca pode ser definido como a redução do endosperma da farinha, seguida da separação do farelo e do gérmen, com o objetivo de produzir um produto mais palatável (ATWELL, 2001) e de maior qualidade (Figura 2). A farinha de trigo é uma matéria-prima amplamente utilizada na preparação de diversos alimentos como pães, biscoitos, bolos e massas, sendo um produto obtido do trigo mole ou de outras espécies conhecidas do gênero *Triticum* (BRASIL, 2005).

Figura 2 - Figura ilustrativa da estrutura do grão de trigo



Fonte: Garofan (2021)

Em geral, a farinha de trigo consiste principalmente de amido (70-75%), água (12-14%), proteína (8-16%) e outros componentes menores, como lipídios (2%) e cinzas (1%). Assim, o número de composição e outras características de algumas variedades afetam a qualidade da farinha (MORITA *et al.*, 2002). Essas propriedades tornam a farinha de trigo uma potencial matéria-prima para a produção de materiais biodegradáveis, visto que o trigo é muito importante para a economia brasileira e as perdas de uso e processamento de seus derivados são muito importantes.

Benincasa *et al.* (2017) e Puglia, *et al.* (2016) relacionaram os parâmetros alveográficos e o teor de proteína com as propriedades mecânicas de filmes de farinha de trigo extrudados. Em geral, a conclusão dos autores é que a qualidade e a

composição da farinha podem afetar as propriedades mecânicas do filme. Além disso, os autores destacam a importância de considerar também outros fatores, como ano de cultivo, variedade e como o trigo é processado.

Balan *et al.* (2021) produziram filmes de farinha de trigo, PBAT e óleo de orégano microencapsulado e avaliaram as propriedades funcionais e sua aplicação como embalagem ativa na conservação de massa de pastel. Os autores verificaram que as micropartículas interferiram nas propriedades mecânicas dos filmes e proporcionaram significativa atividade antioxidante, além de serem efetivos na inibição do desenvolvimento de fungos e leveduras em massa de pastel.

3.4 ADITIVOS E PLASTIFICANTES NA PRODUÇÃO DE FILME BIODEGRADÁVEL

Os aditivos são substâncias que são misturadas com polímeros em pequenas quantidades para alterar as propriedades dos materiais e proporcionar estabilidade durante o processamento. Deve ser eficaz em ação, estável sob condições de processamento, facilmente dispersáveis, não tóxico e barato. Os ácidos carboxílicos, como o ácido cítrico, ácido adípico, ácido málico e ácido tartárico, estão naturalmente presentes nas frutas e são sintetizados por microrganismos durante a fermentação, por isso vêm chamando a atenção pelo seu uso como compatibilizantes.

O ácido cítrico mostrou-se eficaz em filmes de amido e PBAT produzidos por extrusão por sopro (OLIVATO *et al.*, 2012; GARCIA *et al.*, 2014). Uma explicação para as propriedades funcionais aprimoradas desses materiais é que o ácido cítrico despolimeriza parcialmente o amido, aumentando sua distribuição na matriz do PBAT. Além de servir como compatibilizante, o ácido cítrico atua como um plastificante que promove a processabilidade do amido termoplástico ao acelerar a fragmentação e dissolução dos grânulos de amido (SHI *et al.*, 2007). Pode-se considerar também que o amido é modificado durante o processo de extrusão pela introdução de novos grupos carboxila e éster, que são potenciais pontos de reação cruzada (OLIVATO *et al.*, 2012).

O plastificante mais utilizado na produção de filmes à base de amido e PBAT é o glicerol ou 1,2,3-propanetriol. À temperatura ambiente, o glicerol é um líquido claro, doce, inodoro, ligeiramente mais denso e viscoso que a água.

3.5 PRODUÇÃO DE FILMES POR EXTRUSÃO

A maior parte da produção de filmes em escala industrial é feita por extrusão. Essa tecnologia oferece vantagens associadas aos sistemas de produção contínua, incluindo versatilidade, baixo custo operacional e menor necessidade de espaço por unidade de operação (SOTHORNVIT *et al.*, 2007).

A extrusão é um processo no qual o material é passado sob alta pressão por um trato através de uma rosca, cercado por resistência elétrica para manter a alta temperatura necessária, onde sofre forte cisalhamento e é expelido por um furo ou morre. Durante a extrusão, a rosca é o componente mais importante para transportar, fundir, homogeneizar e plastificar o polímero e, devido ao seu movimento e consequente cisalhamento, produz aproximadamente 80% da energia necessária para converter o polímero para outra textura, enquanto o restante da energia vem de resistores externos. Todo esse processo pode ser observado na Figura 3 (MANRICH, 2005).

Figura 3 - Extrusora e a formação do balão dos filmes



Fonte: Autoria própria (2023)

No processo de extrusão, o ingrediente é introduzido em um cilindro aquecido, e o material amolecido é forçado por um parafuso rotativo a entrar através de uma abertura em uma matriz, para a obtenção de formas contínuas. A extrusora atua como um trocador de calor devido à troca entre as paredes do cilindro, a rosca e o material.

Após a rosca da extrusora existe uma folga, para evitar o atrito e desgaste do parafuso, e em seguida vem o cabeçote que é um conjunto de peças onde fica a matriz, canal responsável pelo perfil do extrudado.

Uma das formas de se obter filmes por extrusão é pela técnica de sopro em balão, onde o polímero fundido, na forma de tubo, passa através de uma matriz anelar, que possui um centro da qual ar é injetado para inflar o tubo até atingir um diâmetro maior. Em seguida, forma-se um balão (Figura 3), cujas paredes são esticadas circunferencialmente (pelo ar injetado) e verticalmente, por rolos de tração, enquanto simultaneamente resfriam, dando ao filme soprado uma orientação bidirecional (MANRICH, 2005).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A produção do filme foi no Laboratório de Tecnologia da UEL e a caracterização foi realizada nos laboratórios do curso de Tecnologia de Alimentos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Londrina.

4.1 MATERIAL

Para produção do filme foi utilizado farinha de trigo (16,5% umidade, 0,65% cinzas, 11,1% proteína, 1,0% lipídios, Vilma Alimentos, Brasil), glicerol (Dinâmica, Brasil), ácido cítrico (Dinâmica, Brasil), PBAT (BASF, Alemanha) e bagaço de malte, que foi coletado em uma cervejaria localizada na cidade de Londrina, Paraná.

4.2 MÉTODOS

A seguir serão descritas as metodologias que foram adotadas para elaboração e caracterização do filme biodegradável por extrusão.

4.2.1 Coleta e secagem do bagaço de malte

O bagaço de malte foi coletado úmido, e o excesso de umidade foi retirado através do peneiramento em um pano de voal. Em seguida, o bagaço foi seco em estufa com circulação de ar (Nova ética, modelo 420-7, Brasil) a 60 °C por 19 horas. Após a secagem, o bagaço foi moído em moinho analítico (IKA, modelo A11, Alemanha), peneirado (3 mm de abertura) (Figura 4) e armazenado em potes com fechamento hermético em temperatura ambiente.

Figura 4 - Peneira e bagaço de malte seco

Fonte: A autoria própria (2023)

4.2.2 Determinação do teor de fibra bruta do bagaço de malte

A análise do teor de fibras brutas foi realizada em equipamento determinador semi-automatizado de fibra (Fibertec 2010, FOSS, Dinamarca). A amostra passou por digestão ácida e básica, em equipamento digestor de fibras com refluxo, sendo o resíduo filtrado sob vácuo em cadinho filtrante e o resultado foi obtido após queima em mufla a 500°C.

4.2.3 Produção dos filmes por extrusão sopro em balão

Todas as formulações do filme foram processadas no Laboratório de Tecnologia da Universidade Estadual de Londrina em uma extrusora monorosca piloto, marca BGM (modelo EL-25, Brasil) composta de rosca de 25 mm de diâmetro ($L/D = 30$). Os filmes foram preparados em duas etapas conforme Balan *et al.* (2021). Na primeira etapa, todos os ingredientes da formulação foram pesados (Tabela 1) e manualmente misturados (Figura 5). Para garantir a homogeneização completa, a mistura deve ser preparada em uma ordem específica usando glicerina, ácido cítrico e PBAT. Após a homogeneização, adicionou-se a farinha de trigo e o bagaço de malte. Essa etapa é importante pois a ordem de adição dos ingredientes interfere na produção e característica do material obtido. Avaliou-se a adição de 0 (controle), 2,5% (BM2,5), 5,0% (BM5,0) e 7,5% (BM7,5) de adição de bagaço de malte.

A mistura foi alimentada na extrusora acoplada a uma matriz com seis orifícios de 2 mm de diâmetro e perfil de temperatura nas 4 zonas de aquecimento foi de

90/120/120/100°C e a velocidade do parafuso foi de 35 rpm. Os perfis cilíndricos foram peletizados e novamente alimentados à extrusora para a produção dos filmes a sopro. Nesta etapa, o perfil de aquecimento foi de 137/128/97/119/121, rotação do parafuso de 40 rpm e foi acoplada uma matriz anelar de 50 mm de diâmetro, com um sistema de sopro interno e externo (diâmetro 150 e 300 mm), sendo que o sopro interno é utilizado para formação do balão e o ar externo para resfriamento.

Tabela 1 - Composição dos filmes

Formulação	Farinha de trigo (g)	PBAT(g)	Glicerol (g)	Bagaço de malte (g)	Ácido cítrico (g)
Controle	230	200	70	-	0,1
BM2,5	224,25	195	68,25	12,5	0,1
BM5,0	218,5	190	66,5	25	0,1
BM7,5	112	185	64,7	37,5	0,1

Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 5 - Mistura da formulação do filme controle



Fonte - Autoria própria (2023)

4.2.4 Caracterização dos filmes

Neste tópico serão descritos os métodos relacionados à caracterização física dos filmes produzidos. Antes das análises de caracterização, os filmes foram

aconicionados em temperatura ambiente (25° C) e 53% de umidade relativa (URE) por no mínimo três dias.

4.2.4.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura foi realizada utilizando amostras com dimensões de 2,0 X 2,0 cm. Eles foram secos em um dessecador contendo sílica até o uso. A amostra foi recoberta com ouro e, em seguida, foi observada a superfície dos filmes em microscópio eletrônico de varredura (Tescan, Vega) com uma potência de aceleração de 20 kV.

4.2.4.2 Espessura

A espessura foi medida com um micrômetro digital, marca Mitutoyo (São Paulo), com resolução de 0,001 mm. Foram obtidas 10 medidas de cada filme e o resultado expresso em média \pm desvio padrão.

4.2.4.3 Cor e opacidade aparente

A cor dos filmes foi medida em colorímetro (Konica Minolta, modelo CR-400, Japão), onde L^* variou de 0 (preto) a 100 (branco), a^* variou de verde (-) a vermelho (+), b^* de azul (-) a amarelo (+). Foram realizadas 10 leituras subsequentes para cada amostra. A diferença de cor (ΔE) foi calculada em relação ao controle a partir da Equação 1:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (1)$$

A opacidade aparente dos filmes foi medida usando um espectrofotômetro UV-Vis (Biochrom, Inglaterra). As amostras foram cortadas em triplicata em retângulos (1 cm x 1 cm), aderidos às paredes internas de cubetas de quartzo (10 mm de caminho óptico) e a leitura da transmitância foi tomada a 600 nm. A opacidade foi calculada com a Equação 2:

$$Opacidade = \frac{-\log T_{600}}{x} \quad (2)$$

Em que T_{600} é a transmitância fracional a 600 nm e x é a espessura do filme (mm).

4.2.4.4. Propriedades Mecânicas

Para determinar as propriedades mecânicas foi utilizado uma máquina universal de ensaio (EMIC, modelo DL 2000, Brasil) disponível no laboratório do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos da Universidade Estadual de Londrina. As propriedades de resistência à tração (MPa), alongamento na ruptura (%), módulo de Young (MPa) foram determinadas de acordo com os padrões da American Society for Testing and Materials (ASTM D882-12, 2012). Dez corpos de prova de cada formulação (25 x 100 mm) foram empregadas no ensaio.

4.2.4.5 Permeabilidade ao vapor de água (PVA)

A permeabilidade ao vapor de água foi determinada gravimetricamente de acordo com ASTM E-96-00 (2000) com algumas modificações. O filme foi cortado em círculos de 60 mm de diâmetro, a espessura foi medida em 3 pontos e acondicionada a 53% de umidade relativa por 48 horas. Os filmes foram então presos em uma cápsula, as bordas seladas com graxa de silicone e mantidas hermeticamente com um anel para permitir que a umidade migrasse através do filme. O interior da cápsula foi preenchido com sílica gel (~ 0% UR) e o sistema foi acondicionado em dessecador contendo solução de cloreto de sódio (75% UR) a 25 °C. A pesagem foi realizada continuamente a cada 12 horas durante 5 dias. O ganho de massa (m) foi plotado em função do tempo (t) e o coeficiente angular foi determinado pela equação linear obtida por regressão linear e a taxa de transmissão de vapor de água (TPVA) calculada pela Equação 3 e a permeabilidade ao vapor de água (PVA) a partir da equação 4:

$$TPVA = \frac{m}{t} \times \frac{1}{A} \quad (3)$$

$$PVA = \frac{TPVA \times e}{P_s \times (UR_1 - UR_2)} \quad (4)$$

Onde:

PVA = Permeabilidade ao vapor de água ($\text{g} \cdot \text{dia}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$)

e = Espessura média do corpo-de-prova (m)

P_s = Pressão de saturação e vapor a temperatura do ensaio (Pa)

UR_1 = Umidade relativa dentro do dessecador (%)

UR_2 = Umidade relativa dentro da Cápsula (%)

TPVA = Taxa de permeabilidade ao vapor de água ($\text{g} \cdot \text{dia}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)

m = Ganho de massa de água (g)

t = Tempo (s)

A = Área de permeação do corpo de prova (m^2)

4.2.4.6 Solubilidade em água

Os filmes foram cortados na dimensão de 2,0 x 2,0 cm e secos a 105 °C por 24 h em estufa para obtenção da porcentagem de matéria seca. As amostras foram imersas em 200 mL de água destilada e o sistema foi mantido a 25 °C por 24 horas sob agitação (100 rpm) em um agitador orbital. Após esse período, as amostras foram secas por 24 horas a 105 °C em estufa com circulação de ar e pesadas para determinação da massa seca final da amostra insolúvel. A solubilidade foi realizada em triplicata e calculada com a Equação 5:

$$\text{Solubilidade} = \left(\frac{M_i - M_f}{M_i} \right) \times 100 \quad (5)$$

Onde:

M_i = massa seca inicial do filme (g)

M_f = massa seca final do filme (g)

4.2.5 Análise Estatística

Com os resultados obtidos, foi realizada análise de variância (ANOVA) e as médias comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância no software Biostat.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico serão apresentados os resultados das caracterizações dos filmes e as discussões dos dados com o auxílio da literatura científica.

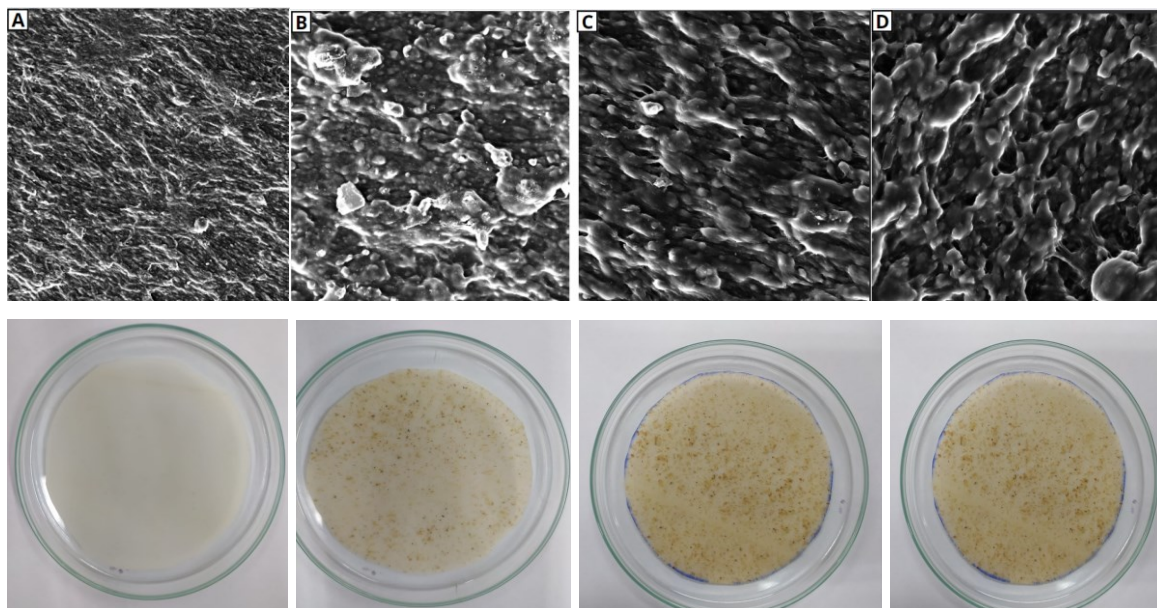
5.1 ASPECTO VISUAL E MICROSCOPIA ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV)

O MEV é geralmente utilizado para o estudo de estruturas superficiais ou subsuperficiais de amostras com dimensões relativamente grandes. As imagens têm uma grande profundidade de foco, o que significa que diferentes relevos na superfície da amostra estão em foco simultaneamente. Com esta técnica é possível avaliar a presença de poros e rugosidade na superfície do filme e a partir da fratura vítrea realizada na presença de líquido criogênico pode-se observar a morfologia interna dos mesmos.

As imagens de microscopia da superfície dos filmes (Figura 6) demonstraram que o filme controle apresentou uma característica contínua, lisa e homogênea, sem poros, rachaduras ou irregularidades. Com o aumento da concentração de BM, a superfície do filme tornou-se mais heterogênea e observou-se aumento na rugosidade, sugerindo que a adição de maiores concentrações de extrato de BM pode alterar a regularidade da matriz polimérica e afetar sua homogeneidade, conservando a ausência de rachaduras. A rugosidade do filme com BM pode ser explicada pelas fracas interações entre as fibras e os componentes da matriz polimérica, as quais também resultam em filmes com maior espessura.

Outra propriedade importante a ser avaliada é o aspecto visual dos materiais desenvolvidos, que considerando suas diversas aplicações é interessante possuir boa aparência, uma vez que é crucial para uma boa aceitação do produto comercialmente. Com base nas imagens dos filmes (Figura 6), pode-se perceber que o filme controle apresentou características homogêneas e coloração esbranquiçada, sem partícula visível a olho nu. Nos filmes que tiveram a adição do BM verificou-se claramente a presença de partículas, que apresentaram coloração amarelada, característica das fibras do BM, sendo que a cor se intensificou com o aumento da concentração. Esta característica pode afetar a aceitação do consumidor ao produto pois apresenta aspecto distintos do usual.

Figura 6 - Microscopia eletrônica de varredura e aspecto visual dos filmes de farinha de trigo, PBAT e bagaço de malte



Fonte: Autoria própria (2023)

5.2 ESPESSURA

A espessura pode afetar as propriedades mecânicas, a permeabilidade ao vapor de água e a solubilidade em água dos filmes. Em outras palavras, quanto maior o valor da espessura, menor a permeabilidade ao vapor de água e a solubilidade em água. A migração de água em materiais hidrofílicos tem sido relatada por diversos autores que observaram diferentes comportamentos da estrutura do filme em relação à ligação da água em decorrência da espessura (SARANTÓPOULOS *et al.*, 2002).

Na Tabela 2 encontram-se os resultados de espessura dos filmes, sendo de 170 a 343 μm e apresentou diferença significativa ($p < 0,05$). Observou-se que a espessura dos filmes aumentou conforme elevou-se a concentração de BM, sugerindo que o bagaço dificulta o estiramento do filme no sentido horizontal durante a extrusão. Resultados próximos de espessura foram observados em filmes de farinha de trigo, PBAT e micropartículas de óleo de orégano (BALAN *et al.*, 2021) e em filmes de amido e PBAT (PAULO *et al.*, 2022) produzidos por extrusão sopro em balão.

Tabela 2 - Espessura dos filmes de farinha de trigo, PBAT e bagaço de malte

Amostras	Espessura (μm)
Controle	170 \pm 50 ^a
BM2,5	264 \pm 54 ^b
BM5,0	281 \pm 52 ^b
BM7,5	343 \pm 58 ^c

^{a, b, c}Filmes que apresentam letras minúsculas iguais na coluna não apresentam diferença significativa ($p>0,05$) pelo teste de Tukey.

Fonte: Autoria própria (2023)

5.3 COR E OPACIDADE

Os resultados de cor dos filmes com diferentes concentrações de BM estão descritos na Tabela 3. De forma geral, os filmes apresentaram diferença significativa em todos os parâmetros ($p<0,05$). Com o aumento do teor de BM, o parâmetro de luminosidade (tendência branca) diminuiu significativamente, variando de 64,36 \pm 1,1 a 56,72 \pm 1,9, e indicou que o filme ficou mais escuro. O parâmetro a^* apresentou um aumento acentuado de -1,1 \pm 0,3 para 2,2 \pm 1,1 indicando que quanto maior o teor de BM, mais vermelho tende ser o filme. O parâmetro b^* variou de 1,0 \pm 0,8 a 14,96 \pm 2,4, indicando que as amostras tendem ao amarelo conforme aumenta-se a quantidade de BM.

Tabela 3 - Cor e opacidade aparente de filmes de farinha de trigo, PBAT e bagaço de malte

Filme	Cor			ΔE	Opacidade(%)
	L^*	a^*	b^*		
Controle	64,36 \pm 1,1 ^a	-1,1 \pm 0,3 ^a	1,0 \pm 0,8 ^a	-	7,0 \pm 1,5 ^a
BM2,5	62,48 \pm 1,1 ^a	-0,4 \pm 0,3 ^b	5,5 \pm 1,3 ^b	5,20 \pm 1,00 ^a	5,2 \pm 0,1 ^b
BM5,0	59,32 \pm 0,5 ^b	0,4 \pm 0,5 ^b	10,20 \pm 2,1 ^c	10,70 \pm 2,11 ^b	4,8 \pm 0,5 ^c
BM7,5	56,72 \pm 1,9 ^c	2,2 \pm 1,1 ^c	14,96 \pm 2,4 ^d	16,37 \pm 3,08 ^c	4,1 \pm 0,4 ^c

^{a, b, c, d}Filmes que apresentam letras minúsculas iguais na coluna não apresentam diferença significativa ($p>0,05$) pelo teste de Tukey.

Fonte: Autoria própria (2023)

A cor mais escura e amarelada dos filmes deste trabalho evidencia a ocorrência de reação de Maillard entre as proteínas e açúcares presentes na farinha de trigo e o uso de uma temperatura de extrusão elevada (130° C) (BALAN *et al.*, 2021).

Ao calcular ΔE verificou-se que todos os filmes contendo BM diferiram do filme controle e houve uma relação direta com a concentração de BM, ou seja, quanto maior a quantidade de BM, maior o valor de ΔE .

Outro parâmetro avaliado é a opacidade, que refere à quantidade de luz transmitida pela amostra, sendo influenciada pela coloração dos filmes e quantidade de compostos dispersos na matriz polimérica (ROSAS, 2019). A opacidade aparente também pode ser afetada pelas condições do processo, pela espessura e os componentes utilizados para a fabricação dos filmes. Nos resultados pode-se observar que a opacidade aparente apresentou um comportamento linear e decrescente com o aumento da concentração de BM, e esta característica pode influenciar amplamente em uma embalagem na sua forma de aplicação e na aceitação pelo consumidor.

Conforme os resultados apresentados, a opacidade aparente foi influenciada pela presença de BM e aumento na espessura dos filmes. É possível que o aumento de BM dificulte a passagem de luz, tornando o filme mais opaco. Os filmes opacos podem ser empregados na produção de embalagens para produtos fotossensíveis.

5.4 PROPRIEDADE MECÂNICAS

As propriedades mecânicas dos filmes são características indispensáveis a serem analisadas, uma vez que elas indicam se o material está adequado para o uso como embalagem. Desta forma, se os filmes forem aplicados na confecção de embalagens flexíveis, precisam ter alto alongamento e também serem resistentes à ruptura e abrasão. Estas propriedades podem ser analisadas por meio de testes de tração, que expressam a resistência do material à deformação por alongamento do material em relação ao seu comprimento original e a tensão máxima que o mesmo suporta até que ocorra o seu rompimento. O ensaio de tração também pode indicar o módulo de elasticidade, o qual se refere à rigidez do filme. Estes dados dependem do tipo de material, da espessura, dimensões do corpo de prova, velocidade do ensaio e distância entre as garras (SARANTÓPOULOS *et al.*, 2002). Os resultados das

propriedades mecânicas de filmes de farinha de trigo, bagaço de malte e PBAT estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas dos filmes de farinha de trigo, PBAT e bagaço de malte

Filmes	ϵ (%)	T(MPa)	MY (MPa)
Controle	393,87±59,34 ^a	4,8±0,7 ^c	19,17±0,7 ^a
BM2,5	149,75±29,60 ^b	3,6±0,4 ^b	24,46±0,4 ^b
BM5,0	57,78±17,03 ^c	2,6±0,2 ^a	27,78±0,2 ^b
BM7,5	26,16±9,18 ^d	2,8±0,4 ^a	42,16±0,4 ^c

^{a, b, c, d} Filmes que apresentam letras minúsculas iguais na coluna não apresentam diferença significativa ($p>0,05$) pelo teste de Tukey. Resistência à tração (T); alongação na ruptura (ϵ); módulo de Young (MY).

Fonte: Autoria própria (2023)

O filme controle, sem incorporação de BM, apresentou T de 4,8±0,7 MPa, ϵ de 393,87±59,34 % e MY de 19,17±0,7. A mesma formulação produzida por Balan *et al.* (2021) apresentou valor de T igual a 3,68 ± 0,32 MPa, ϵ de 296,67±46,50 % e MY de 19,16±1,13 MPa, sendo diferente ao obtido neste trabalho. A diferença nos valores obtidos pode estar associada à diferença de lote da farinha de trigo e PBAT e ao equipamento utilizado no ensaio de tração. Embora na literatura poucos trabalhos relatam a produção de filmes de farinha de trigo e PBAT, os filmes obtidos neste trabalho apresentaram propriedades mecânicas superiores aos filmes extrusados produzidos somente com farinha de trigo de Benincasa *et al.* (2027), que apresentou T de 0,72 a 1,75 MPa e ϵ de 38,33 a 115, 82%, de Puglia *et al.* (2016), que teve valores de T de 0,7 a 1,4 MPa e ϵ de 36 a 72%, e de Castanho *et al.* (2021), que produziu filmes de amido de milho com BM e obteve valores médio de T de 0,8 MPa e de ϵ de 24%.

De forma geral, verificou-se que a adição de BM interferiu significativamente nas propriedades mecânicas, sendo que conforme aumentou-se a concentração de BM, menores foram os valores ϵ e T e maiores foram os valores de MY. É possível que o BM tenha atuado como um ponto de concentração de tensão que diminuiu e interferiu nas propriedades mecânicas, conforme também observado por Paulo *et al.* (2022) em filmes de amido, PBAT e micropartículas de óleo de orégano. Além disso,

há de se considerar que a presença de BM influenciou nas interações polímero-polímero formando uma estrutura menos coesa.

Entre os filmes, o filme BM2,5 foi o que apresentou menor interferência nas propriedades mecânicas em relação às demais formulações com BM, mostrando-se com potencial aplicação na produção de filmes por extrusão.

5.5 PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA (PVA) E SOLUBILIDADE

A propriedade de barreira mais comumente discutida é a permeabilidade ao vapor de água (PVA). Para filmes hidrofílicos, isso é afetado pelas propriedades intrínsecas do material, pelo teor de plastificante e pelas condições ambientais de umidade relativa e temperatura a que estão expostos. A norma ASTM E96-00 define a permeabilidade como a permeabilidade ao vapor de água por unidade de área de material de folha em uma determinada espessura causada pela diferença de pressão de vapor entre duas áreas de superfície específicas sob condições de temperatura definidas (ASTM E96-95, 1995). Os resultados da PVA e da solubilidade em água são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 - Permeabilidade ao vapor da água e solubilidade de filmes de farinha de trigo, PBAT e bagaço de malte

Filmes	PVA x 10 ⁷ (g m ⁻¹ h ⁻¹ Pa ⁻¹)	Solubilidade (%)
Controle	1,43±0,34 ^a	7,07±3,4 ^a
BM2,5	2,32±0,39 ^b	3,53±0,0 ^b
BM5,0	2,31±0,09 ^b	4,55±0,5 ^c
BM7,5	3,33±0,68 ^c	5,43±1,1 ^d

^{a, b, c, d} Filmes que apresentam letras minúsculas iguais na coluna não apresentam diferença.

Fonte: Autoria própria (2023)

Observa-se que não houve influência do BM nos resultados de PVA dos filmes. De acordo com Chen (1995), a PVA é intimamente relacionada com as condições de condução do experimento, no qual, em umidades relativas acima de 35% ao redor do filme, a PVA aumenta devido ao aumento de difusividade causada pelo efeito plastificante da água no interior do filme. No presente estudo não houve interferência, pois a quantidade de plastificante usada foi constante em todas as amostras.

Os resultados de PVA são próximos aos reportados por Balan *et al.* (2021) ($1,92 \times 10^{-7}$ e $2,18 \times 10^{-7} \text{ g m}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$) em filmes de farinha de trigo, PBAT e micropartículas de óleo essencial de orégano produzidos por extrusão sopro. Os menores valores de PVA comparados aos filmes de amido podem ser justificados pela presença das proteínas e lipídeos na farinha de trigo e das fibras do BM que conferem certa redução no caráter hidrofílico dos filmes.

Em alguns trabalhos é possível perceber que o aumento dos valores de PVA provavelmente estão relacionados com irregularidades na estrutura do filme, facilitando a difusão das moléculas de água através dos filmes. No presente trabalho isto não ocorreu, pois o BM pode ter se distribuído na matriz polimérica, criando caminhos tortuosos que podem ter impedido o fluxo de vapor de água através do filme. Isso pode justificar os valores significativamente iguais para todas formulações de filme.

A solubilidade é coordenada pelo potencial de interação das cadeias poliméricas formadoras dos filmes com a água. Embora a área superficial de todos os filmes fosse semelhante, a solubilidade seguiu um comportamento decrescente, ou seja, quanto maior o teor de BM, menor foi a solubilidade. O filme BM7,5, que possuiu a maior concentração de BM, possivelmente apresentou menor valor de solubilidade porque o BM reduziu a hidroflicidade do filme, ou seja, o BM possui baixa solubilidade em água.

Segundo Knapp (2017) a solubilidade está relacionada com a hidroflicidade do material. Esse mesmo autor realizou um trabalho sobre o desenvolvimento e caracterização de filme biodegradável ativo, à base de extrato de resíduos do processamento industrial de laranja, e percebeu que a solubilidade em água do filme é elevada devido às características hidroflicas do glicerol, facilitando o transporte e interação das moléculas de água na matriz polimérica. Quando Knapp (2017) adicionou farinha nos filmes mudaram-se as interações da água com os grupos hidroflicos da farinha, alterando a solubilidade dos materiais.

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi possível produzir filmes biodegradáveis a partir de farinha de trigo, PBAT, glicerol e diferentes concentrações de BM pela técnica de extrusão sopro em balão. Os filmes apresentaram boa maleabilidade, estrutura rugosa e coloração amarelada em razão da presença de BM, além de apresentarem alta opacidade.

A utilização de BM nos filmes biodegradáveis influenciou significativamente em seu desempenho mecânico, quando comparados à formulação controle (sem BM). Em relação às características microestruturais, o filme controle apresentou uma superfície homogênea e sem rugosidades e, com a adição de BM, os filmes ficaram com a superfície rugosa e mais heterogênea, possivelmente pelo tamanho das partículas de BM. Os valores de PVA iguais e solubilidade em água menor em filmes com BM pode estar associado com a baixa interação de BM com a água.

Os filmes com adição de BM obtidos nesta pesquisa mostram-se promissores e com potencial na produção de embalagens. Porém, estudos adicionais como a sua aplicação no envase de alimentos e avaliação das propriedades térmicas ainda são necessários para viabilizar o seu uso na produção de embalagens.

REFERÊNCIAS

- ABIEF (Associação Brasileira da Indústria de Embalagens) **Indústria Brasileira de Transformação de material plástico**. Disponível em: <<http://www.abiplast.org.br/site/estatisticas>>. Acesso em: 20 mai. 2023.
- ALIYU, S.; BALA, M. Brewer's spent grain: A review of its potentials and applications. **African Journal of Biotechnology**, v. 103, n. 3, p. 324-331, 2011.
- ATWELL, W. A. **Wheat Flour**. Eagen press handbook series. St. Paul: AACC, 2001.
- AVEROUS, L.; BOQUILLON, N. Biocomposites based on plasticized starch: thermal and mechanical behaviors. **Carbohydrate Polymers**, v. 56, p. 111-122, 2004.
- ASTM - American Society for Testing and Materials. **ASTM D883-22**: Terminology relating to plastics. West Conshohocken: ASTM, 2022.
- ASTM – American Society Standard Testing and Materials. **ASTM E96-00**: Standard test method for water vapor transmission of materials. Philadelphia: ASTM, 2000.
- ASTM – American Society Standard Testing and Materials. **ASTM D882-12**: Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting. Philadelphia: ASTM, 2012.
- BALAN, G. C.; *et al.* Production of Wheat Flour/PBAT active films incorporated with oregano oil microparticles and its application in fresh pastry conservation. **Food and Bioprocess Technology**, v. 14, p. 1587-1599, 2021.
- BENINCASA, P.; *et al.* Relationships between wheat flour baking properties and tensile characteristics of derived thermoplastic films. **Industrial Crops and Products**, v. 100, p. 138–145, 2017.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa Nº 8 de 2 de Junho de 2005. Aprova o Regulamento Técnico de Identidade e Qualidade da Farinha de Trigo, conforme o anexo desta Instrução Normativa. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2 de junho de 2005. Disponível em: <https://sistemasweb.agricultura.gov.br/sislegis/action/detalhaAto.do?method=visualizarAtoPortalMapa&chave=803790937> Acesso em: 20 dez. 2022
- BRITO, G. F; *et al.* Biopolímeros, polímeros biodegradáveis e polímeros verdes. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 6, n. 2, p. 127-139, 2011.
- CASTANHO, M. N.; PRADO, K. S.; PAIVA, J. M. F. Developing thermoplastic corn starch composites filled with brewer's spent grain for applications in biodegradable films. **Polymer Composites**, v. 43, n. 2, p. 811-826, 2022.

CONCEIÇÃO, M. M.; *et al.* O plástico como vilão do meio ambiente. **Revista Geociências-UNG-Ser**, v. 18, n. 1, p. 50-53, 2019.

CHEN, H. Functional properties and applications of edible films made of milk proteins. **Journal of Dairy Science**, v. 78, n. 11, p. 2563-2583, 1995.

FERREIRA, D. C. M.; MOLINA, G.; PELISSARI, F. M. Biodegradable trays based on cassava starch blended with agroindustrial residues. **Composites Part B**, v. 183, p. 107682, 2020.

FILLAUDEAU, Luc; BLANPAIN-AVET, Pascal; DAUFIN, Georges. Water, wastewater and waste management in brewing industries. **Journal of cleaner production**, v. 14, n. 5, p. 463-471, 2006.

GARAFON, Carolina. Série Ingredientes: Farinha de trigo. Outubro de 2021. Disponível em: <https://caramelodrama.com/2021/10/05/serie-ingredientes-farinha-de-trigo/> Acesso em: 14/03/2023.

GARCIA, P. S.; *et al.* Improving action of citric acid as compatibiliser in starch/polyester blown films. **Industrial Crops and Products**, v. 52, p. 305-312, 2014.

JORGE, Neuza. **Embalagens para alimentos**. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2013.

KIJCHAVENGKUL, T.; AURAS, R.; RUBINO, M. Measuring gel content of aromatic polyesters using FTIR spectrophotometry and DSC. **Polymer Testing**, v. 27, n. 1, p. 55-60, 2008.

KNAPP, M. A. Caracterização de filmes biodegradáveis de amido com extrato de erva mate. 2017. Monografia (Graduação em Engenharia de Alimentos), Universidade Federal da Fronteira Sul, Laranjeiras do Sul, 2017.

TELES, J. J. S. **Sustentabilidade e Economia Circular: O desafio do plástico**. 2020. Dissertação (Mestrado em Administração Público-Privada) – Faculdade de Direito, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2020.

LANDIM, A. P. M.; *et al.* Sustentabilidade quanto às embalagens de alimentos no Brasil. **Polímeros**, v. 26, p. 82-92, 2016.

MATTOS, J. C. P. **Poluição ambiental por resíduos sólidos em ecossistemas urbanos: estudo de caso do aterro controlado de Rio Branco-AC**. 2006. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Manejo de Recursos Naturais) - Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Manejo de Recursos Naturais– Universidade Federal do Acre, Rio Branco, 2006.

MANRICH, S. **Processamento de termoplásticos: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes**. São Paulo: Artliber, 2005.

MELLO, L. R. P. F.; MALI, S. Use of malt bagasse to produce biodegradable baked foams made from cassava starch. **Industrial Crops and Products**, v. 55, p. 187-193, 2014.

MUSSATO, S. I.; DRAGONE, G.; ROBERTO, I. C. Brewers' spent grain: generation, characteristics and potential applications. **Journal of Cereal Science**, v. 43, n. 1, p. 1-14, 2006.

MONTEIRO, M. K. S. **Obtenção e caracterização de bionanocompósitos de fécula de mandioca e argila bentonita organofilizada por mistura de tensoativos**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

MORITA, N.; *et al.* Dough and baking properties of highamylose and waxy wheat flours. **Cereal Chemistry**, v. 79, p. 491-495, 2002.

NAMPOOTHIRI, K. M.; NAIR, N. R.; JOHN, R. P. An overview on the recent developments in polylactide (PLA) research. **Bioresource Technology**, v. 101, p. 8493-8501, 2010.

OLIVATO, J. B.; *et al.* Effect of organic acids as additives on the performance of thermoplastic starch/polyester blown films. **Carbohydrate Polymers**, v. 90, p. 159–164, 2012.

PAULO, A. F. S.; *et al.* Influence of free and microencapsulated oregano oil on starch and poly(butylene co-terephthalate adipate) active film properties. **Polymer Bulletin**, v. 79, p. 4859–4877, 2022.

PUGLIA, D.; *et al.* Tensile behavior of thermoplastic films from wheat flours as function of raw material baking properties. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 24, p. 37-47, 2016.

ROSAS, M. R. **Desenvolvimento de filmes biodegradáveis contendo compostos bioativos das cascas de *Euphorbia umbellata* (Pax) Bruyns (janaúba)**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências Farmacêuticas) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2019.

ROBERTSON, J.; *et al.* Profiling brewers' spent grain for composition and microbial ecology at the site of production. **LWT-Food Science and Technology**, v. 43, n. 6, p. 890-896, 2010.

SARANTÓPOULOS, C. I. G. L.; *et al.* **Embalagens plásticas flexíveis**: principais polímeros e avaliação de propriedades. Campinas: CETEA/ITAL, 2002.

SCHIMITBERGER, T. **Desenvolvimento de filmes dosimétricos fotoluminescentes à base do PBAT e do MEH-PPV para aplicação em dosimetria de altas doses de radiação gama**. 2015. Tese. (Doutorado em Ciências e Técnicas Nucleares) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

SHI, R.; *et al.* Characterization of citric acid/glycerol co-plasticized thermoplastic starch prepared by melt blending. **Carbohydrate Polymers**, v. 69, p. 748-755, 2007.

SILVA, F. A.; RABELO, D. O uso sustentável de polímeros. **Revista Processos Químicos**, v. 11, n. 21, p. 9-16, 2017.

SOTHORNVIT, R.; PITAK, N. Oxygen permeability and mechanical properties of banana films. **Food Research International**, v. 40, n. 3, p. 365-370, 2007.