

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
CAMPUS GOVERNADOR VALADARES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS APLICADAS À SAÚDE

Thalisson Ronner Stockler Soares Silva

**Estudo da dependência do teor de glicerol sobre propriedades mecânicas de
bioplásticos contendo bagaço de malte em diferentes granulometrias como
carga**

Governador Valadares

2025

Thalisson Ronner Stockler Soares Silva

Estudo da dependência do teor de glicerol sobre propriedades mecânicas de bioplásticos contendo bagaço de malte em diferentes granulometrias como carga

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Aplicadas à Saúde, da Universidade Federal de Juiz de Fora, Campus Governador Valadares, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Aplicadas à Saúde, área de concentração Biociências.

Orientador(a): Prof(a). Dr. Fábio Alessandro Pieri

Governador Valadares

2025

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Silva, Thalisson Ronner Stockler Soares.

Estudo da dependência do teor de glicerol sobre propriedades mecânicas de bioplásticos contendo bagaço de malte em diferentes granulometrias como carga / Thalisson Ronner Stockler Soares Silva. -- 2025.

51 f. : il.

Orientador: Fabio Alessandro Pieri

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Campus Avançado de Governador Valadares, Instituto de Ciências da Vida - ICV. Programa de Pós-Graduação em Ciências Aplicadas à Saúde, 2025.

1. Biological Film. 2. Glicerol. 3. Propriedades físico-mecânicas. 4. Resíduos agroindustriais. 5. Economia Circular. I. Pieri, Fabio Alessandro, orient. II. Título.

Thalisson Ronner Stockler Soares Silva

Estudo da dependência do teor de glicerol sobre propriedades mecânicas de bioplásticos contendo bagaço de malte em diferentes granulometrias como carga

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Aplicadas à Saúde da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Aplicadas à Saúde. Área de concentração: Biociências.

Aprovado em 21 de julho de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Fabio Alessandro Pieri - Orientador

Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Janaina Brandão Seibert

Agrobiológica Sustentabilidade

Prof. Dr. Leonardo Custódio de Lima

Universidade Federal de Juiz de Fora

Juiz de Fora, 03/07/2025.



Documento assinado eletronicamente por **Fabio Alessandro Pieri, Servidor(a)**, em 21/07/2025, às 10:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leonardo Custódio de Lima, Professor(a)**, em 21/07/2025, às 11:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Janaina Brandão Seibert, Usuário Externo**, em 21/07/2025, às 15:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf (www2.ufjf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **2482860** e o código CRC **6CFBC168**.

Dedico este trabalho à minha família,
por todo apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, em todos os momentos da minha vida especialmente durante a realização deste trabalho, em meio aos desafios, fui abençoado inúmeras vezes.

À minha mãe, Maria da Penha Soares, e à minha família, minha eterna gratidão. Essa conquista também e de vocês que acreditaram comigo, sustentaram meus passos mesmo nos dias mais difíceis, este trabalho é fruto de sacrifícios compartilhados e de uma fé que me manteve de pé.

Ao Prof. Dr. Ângelo Márcio Leite Denadai, agradeço pela orientação firme e respeitosa, pela confiança e pela liberdade concedida para que eu crescesse não apenas como pesquisador, mas também como indivíduo.

Ao Prof. Dr. Jeferson Gomes da Silva, minha gratidão profunda, foram muitas as horas compartilhadas em laboratório, muitas delas estendidas até bem tarde da noite. Sua paciência, dedicação e compromisso em ensinar cada detalhe da parte experimental tornaram possível a execução deste projeto. Mais do que orientação técnica e parceria, acreditou desde o início que um resíduo poderia se transformar em algo de valor agregado, esse entusiasmo foi combustível em momentos decisivos, que não deixaram a pesquisa se encerrar, o olhar atento, as provocações científicas e a confiança silenciosa foram fundamentais para o amadurecimento deste trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Fábio Alessandro Pieri, meu sincero agradecimento pelo suporte constante, pelos conselhos, pelas orientações honestas e pela confiança em meu potencial. Sua presença firme fez diferença em cada etapa dessa jornada principalmente nos bastidores quando as dificuldades surgiam.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências Aplicadas à Saúde da Universidade Federal de Juiz de Fora, Campus Governador Valadares, agradeço pelo conhecimento compartilhado, pela excelência no ensino e pelo compromisso com a formação dos alunos, e principalmente com a paciência que tiveram comigo. À própria instituição, por proporcionar um ambiente fértil para o desenvolvimento acadêmico e científico, deixo também minha gratidão.

A todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta pesquisa, meu muito obrigado, cada gesto, cada palavra e cada apoio por menor que tenha parecido foi fundamental para que este trabalho se tornasse realidade.

Aos colegas e amigos que caminharam comigo ao longo desse percurso, minha gratidão por tornarem essa jornada mais leve e significativa, encerrar este ciclo é muito mais do que concluir um trabalho, e olhar para trás com orgulho, reconhecer o esforço e agradecer por cada mão estendida ao longo dessa história.

“Só vive o propósito quem suporta o processo.”
(MARCOS CRUZ SANTOS)

RESUMO

O aumento da produção e descarte inadequado de plásticos derivados do petróleo tem intensificado a busca por materiais alternativos de origem renovável. Neste contexto, os bioplásticos surgem como uma alternativa viável e sustentável, principalmente quando associados à valorização de resíduos agroindustriais. Este trabalho teve como objetivo desenvolver e caracterizar bioplásticos à base de amido, glicerol e bagaço de malte em diferentes granulometrias, avaliando a influência da concentração de glicerol e do tamanho de partícula do resíduo sobre as propriedades físico-mecânicas dos filmes obtidos. O bagaço de malte foi doado por uma cervejaria local, processado por secagem, moagem e peneiramento, resultando em quatro frações distintas. Os bioplásticos foram produzidos por meio da técnica de casting, com formulações variando o teor de glicerol entre 10% e 40% m/m e incorporando as diferentes frações do resíduo vegetal. Os materiais foram submetidos a análises de microscopia óptica, espectroscopia na região do infravermelho (FTIR), análise termogravimétrica (TG), além de determinações de espessura, gramatura, densidade e testes mecânicos de tração. Os resultados mostraram que o teor de glicerol teve influência significativa sobre a maleabilidade e rigidez dos filmes, enquanto a granulometria do bagaço impactou aspectos estruturais e densidade. Concentrações de glicerol iguais ou superiores a 30% conferiram maior flexibilidade aos materiais, enquanto teores inferiores resultaram em filmes mais rígidos. A adição do bagaço de malte, especialmente em frações de partículas maiores, também contribuiu para a redução do módulo de Young. Os dados indicam que a combinação de amido, glicerol e bagaço de malte permite a produção de materiais com propriedades ajustáveis, adequados para aplicações sustentáveis, como embalagens biodegradáveis. Os achados reforçam o potencial do aproveitamento de resíduos agroindustriais e a importância de variáveis como plastificante e granulometria na modulação das propriedades dos bioplásticos, promovendo avanços no desenvolvimento de produtos alinhados à economia circular.

Palavras-chave: Filme biológico. Glicerol. Propriedades físico-mecânicas. Resíduos agroindustriais. Economia Circular.

ABSTRACT

The increase in production and improper disposal of petroleum-based plastics has intensified the search for alternative materials from renewable sources. In this context, bioplastics emerge as a viable and sustainable alternative, especially when associated with the recovery of agro-industrial waste. This study aimed to develop and characterize bioplastics based on starch, glycerol, and malt bagasse in different particle sizes, evaluating the influence of glycerol concentration and residue particle size on the physical and mechanical properties of the films obtained. The malt bagasse was donated by a local brewery, processed by drying, grinding, and sieving, resulting in four distinct fractions. The bioplastics were produced using the casting technique, with formulations varying the glycerol content between 10% and 40% m/m and incorporating the different fractions of the vegetable waste. The materials were subjected to optical microscopy, infrared spectroscopy (FTIR), thermogravimetric analysis (TG), as well as thickness, weight, density, and mechanical tensile tests. The results showed that the glycerol content had a significant influence on the malleability and rigidity of the films, while the particle size of the bagasse impacted structural aspects and density. Glycerol concentrations equal to or greater than 30% gave the materials greater flexibility, while lower contents resulted in more rigid films. The addition of malt bagasse, especially in larger particle fractions, also contributed to the reduction of Young's modulus. The data indicate that the combination of starch, glycerol, and malt bagasse allows the production of materials with adjustable properties, suitable for sustainable applications, such as biodegradable packaging. The findings reinforce the potential of agro-industrial waste utilization and the importance of variables such as plasticizer and particle size in modulating the properties of bioplastics, promoting advances in the development of products aligned with the circular economy.

Keywords: Biological Film. Glycerol. Physical-mechanical properties. Agro-industrial waste. Circular Economy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	-	Imagens de microscopia óptica com aumento de 400x dos bioplásticos obtidos variando o teor de glicerol de 10 a 40% m/m (1-4) e o tipo de fração do bagaço de malte (frações 1 a 4, subdivididas em X.1 a X.4).....	23
Figura 2	-	Destaque dos espectros de ATR-FTIR do amido, glicerol, dos bioplásticos obtidos variando o teor de glicerol de 10 a 40% m/m (1-4) (A) e dos bioplásticos a 20% de glicerol com diferentes granulometrias do bagaço de malte como carga (1.2 a 4.2) (B).....	26
Figura 3	-	Curvas TG dos bioplásticos obtidos variando o teor de glicerol de 10 a 40% m/m (frações 1-4) (A), dos bioplásticos a 10% de glicerol com diferentes frações de bagaço de malte (B) e dos bioplásticos a 30% de glicerol com diferentes frações de bagaço de malte.....	28
Figura 4	-	Comparação entre as tensões de ruptura (T_r , MPa) (A), percentual de alongamento na ruptura ($\epsilon_r\%$) (B) e módulo de Young (Y , MPa) (C) dos bioplásticos obtidos variando o teor de glicerol de 10 a 40% m/m (1-4) e o tipo de fração do bagaço de malte (frações 1 a 4, subdivididas em X.1 a X.4).....	31
Figura 5	-	Dendrograma como os agrupamentos dos bioplásticos obtidos na AHC baseada na avaliação das distâncias euclidianas entre as propriedades físicas e mecânicas desses materiais.....	33
Figura 1S	-	Espectros de ATR-FTIR na faixa de 4000 a 700 cm^{-1} dos bioplásticos obtidos variando o teor de glicerol de 10 a 40% m/m (1-4) e seus precursores (amido e glicerol).....	34
Figura 2S	-	Espectros de ATR-FTIR na faixa de 4000 a 700 cm^{-1} das diferentes amostras de bagaço de malte, a saber: fração 1, bagaço bruto; fração 2, amostra retida na malha da peneira de 35 mesh; fração 3, amostra retida entre as peneiras de 35 e 60 mesh; e fração 4, amostra que atravessou a malha da peneira de 35 mesh.....	38
Figura 3S	-	Espectros de ATR-FTIR na faixa de 4000 a 700 cm^{-1} dos bioplásticos contendo 10% m/m de glicerol sem (1) e com diferentes amostras do bagaço de malte (1.1 a 4.1).....	39
Figura 4S	-	Espectros de ATR-FTIR na faixa de 4000 a 700 cm^{-1} dos bioplásticos contendo 20% m/m de glicerol sem (2) e com diferentes frações de bagaço de malte (1.2 a 4.2).....	40

Figura 5S	-	Espectros de ATR-FTIR na faixa de 4000 a 700 cm ⁻¹ dos bioplásticos contendo 30% m/m de glicerol sem (3) e com diferentes frações de bagaço de malte (1.3 a 4.3).....	41
Figura 6S	-	Espectros de ATR-FTIR na faixa de 4000 a 700 cm ⁻¹ dos bioplásticos contendo 40% m/m de glicerol sem (3) e com diferentes frações de bagaço de malte (1.4 a 4.4).....	42
Figura 7S	-	. Curvas TG do amido, glicerol e das diferentes amostras do bagaço de malte (frações 1 a 4).....	43
Figura 8S	-	Curvas TG dos bioplásticos a 20% de glicerol sem (2) e com diferentes amostras do bagaço de malte (1.2 a 4.2).....	44
Figura 9S	-	Curvas TG dos bioplásticos a 40% de glicerol sem (4) e com diferentes amostras do bagaço de malte (1.4 a 4.4).....	45
Figura 10S	-	Dendrograma com os agrupamentos das variáveis obtidos por AHC baseado nas distâncias entre as propriedades físicas e mecânicas desses materiais.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	-	Massas de amido, glicerol e bagaço de malte processado utilizados na preparação dos diferentes bioplásticos.....	19
Tabela 2	-	Principais bandas nos espectros de FTIR dos bioplásticos e seus precursores.....	25
Tabela 3	-	Propriedades físicas dos bioplásticos obtidos neste trabalho.....	29
Tabela 1S	-	Matriz de correlação entre as propriedades físicas e mecânicas obtidas para os bioplásticos obtidos variando o teor de glicerol de 10 a 40% m/m (1-4) e o tipo de fração do bagaço de malte (amostras 1 a 4, subdivididas em X.1 a X.4).....	47

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	ARTIGO CIENTÍFICO	15
3	CONCLUSÃO.....	48
	REFERÊNCIAS.....	49
	ANEXO A – COMPROVANTE DE SUBMISSÃO DO ARTIGO.....	51

1 INTRODUÇÃO

Os recursos de origem fóssil são amplamente utilizados no setor industrial para a geração de energia e produção de compostos químicos, devido ao seu custo relativamente baixo e à conveniência de uso. No entanto, essa dependência acarreta sérios impactos à saúde humana e ao meio ambiente. Um exemplo marcante é o dos plásticos, derivados do petróleo, que representam uma das principais fontes de poluição ambiental. Sua difícil reciclagem e persistência no meio reforçam a urgência por soluções sustentáveis e alternativas menos prejudiciais (Mainardis; Buttazoni; Goi, 2020; Atiwesh, 2021; Lauer; Smith, 2020).

Em resposta a essa demanda, surge a economia circular, que ao contrário da economia linear tradicional, busca maximizar a eficiência dos produtos. Nesse modelo, os impactos ambientais são reduzidos significativamente e, em alguns casos, podem até se tornar positivos. A reutilização e a reciclagem de subprodutos reduzem a geração de resíduos e promovem sua transformação em produtos de maior valor agregado, o que melhora o desempenho ambiental e gera ganhos econômicos extras para as empresas (Amienyo; Azapagic, 2016).

Nesse sentido, para sanar a problemática dos plásticos convencionais e ir ao encontro das diretrizes da economia circular surgem os bioplásticos biodegradáveis, fundamentais para reduzir os impactos causados pelos resíduos plásticos e favorecer a adoção de materiais ambientalmente mais sustentáveis (Mohanty; Misra; Hinrichsen, 2000).

Os bioplásticos podem ser fabricados a partir de diversas fontes vegetais, dentre elas se destaca a utilização de resíduos da indústria alimentícia, como das cervejarias. Nas cervejarias os principais subprodutos sólidos são usados principalmente como forragem animal, o que é uma alternativa positiva à incineração ou descarte. No entanto, essa abordagem não reflete as possibilidades tecnológicas e o verdadeiro potencial de valorização de resíduos, como os bioplásticos (Świechowski *et al.*, 2023; Capossio *et al.*, 2022; Jin *et al.*, 2022). 6,7,8

Pensando na fabricação dos bioplásticos, um resíduo sólido que pode ser usado na sua composição é o bagaço de malte (BSG), principal subproduto da indústria cervejeira, constituindo 85% do total do que é gerado no processo de produção da cerveja, estima-se que para cada 100 litros de cerveja produzida se gera cerca de 14kg a 20kg de BSG. Pela sua complexidade o BSG é composto aproximadamente de 15-25% de proteínas, 50-70%

de fibra (hemicelulose, celulose e lignina), 5-10% de gorduras e 2-5% de cinzas (Allegretti *et al.*, 2022).

Nesse contexto, o BSG destaca-se como uma matéria-prima promissora para o desenvolvimento de bioplásticos, não apenas pela sua abundância e composição rica em fibras e proteínas, mas também pelo seu potencial de valorização dentro dos princípios da bioeconomia e sustentabilidade. Ainda que seu uso como forragem animal represente uma alternativa viável, o aproveitamento desse resíduo em formulações poliméricas expande significativamente sua utilidade e agrega valor ao resíduo, contribuindo para uma cadeia produtiva mais limpa e eficiente. A inserção de aditivos como o glicerol, um plastificante comum, pode modificar as propriedades mecânicas dos bioplásticos e viabilizar aplicações mais amplas, desde embalagens até utensílios descartáveis (Ballesteros-Martínez; Pérez-Cervera; Andrade-Pizarro., 2020).

Diante disso, este trabalho propõe investigar a influência da concentração de glicerol nas propriedades mecânicas de bioplásticos formulados com bagaço de malte em diferentes granulometrias. O objetivo é compreender como a variação na proporção de plastificante e o tamanho de partícula do resíduo afetam características como resistência, flexibilidade e integridade estrutural do material final. Espera-se que os resultados obtidos contribuam para o avanço do aproveitamento de resíduos agroindustriais no desenvolvimento de materiais biodegradáveis, alinhando-se às exigências ambientais atuais e às práticas da economia circular.

2 ARTIGO CIENTÍFICO

Artigo científico a submetido ao periódico Revista Química Nova (ANEXO A), Qualis CAPES Interdisciplinar A4. A estruturação do artigo baseou-se nas instruções aos autores preconizadas pelo periódico.

Influência do teor de glicerol nas propriedades mecânicas de bioplásticos de amido contendo bagaço de malte em diferentes granulometrias

Thalisson Ronner Stockler Soares Silva^a, Jeferson Gomes da Silva^b, Ângelo Márcio Leite Denadai^b, Fábio Alessandro Pieri^{a,*}, 

^aDepartamento de Ciências Básicas da Vida, Universidade Federal de Juiz de Fora *Campus* Governador Valadares, 35010-180 Governador Valadares – MG, Brasil.

^bDepartamento de Farmácia, Universidade Federal de Juiz de Fora *Campus* Governador Valadares, 35010-180 Governador Valadares – MG, Brasil.

(x) Manuscrito com material suplementar

() Manuscrito sem material suplementar

*e-mail: fabio.pieri@ufjf.br

ORCID – Fábio Alessandro Pieri: <https://orcid.org/0000-0002-2467-0039>

INFLUENCE OF GLYCEROL CONTENT ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF STARCH-BASED BIOPLASTICS CONTAINING BREWER'S SPENT GRAIN AT DIFFERENT PARTICLE SIZES

Starch-based bioplastics incorporating different amounts of malt bagasse as a plant-based filler and glycerol as a plasticizer were developed and characterized in terms of their physical and mechanical properties. Four bagasse samples, varying in condition and particle size, were used in the preparation of the materials, along with four glycerol concentrations (10, 20, 30, and 40 wt/wt%) per formulation. The bioplastics were produced by solution casting and analyzed using optical microscopy, Fourier-transform infrared spectroscopy, and thermogravimetric analysis, in addition to the evaluation of physical properties (density, thickness, grammage) and mechanical properties (tensile strength, % elongation at break, and Young's modulus). The incorporation of bagasse influenced structural properties, reducing density and Young's modulus in some formulations. Results showed that materials with 30 and 40% glycerol exhibited greater flexibility, while those with 10 and 20% resulted in more rigid bioplastics. This effect was maintained even after the addition of malt bagasse. These findings highlight the potential of brewing industry residues for the production of biodegradable materials, contributing to sustainability and circular economy initiatives.

Keywords: bioplastics; malt bagasse; particle size; glycerol mechanical properties.

INTRODUÇÃO

O consumo mundial de plásticos derivados de fontes fósseis ultrapassa 300 milhões de toneladas por ano,¹ configurando-se como um dos principais desafios ambientais da atualidade, devido à lenta degradação desses materiais e à consequente poluição de ecossistemas terrestres e aquáticos.² Diante desse cenário, o desenvolvimento de alternativas sustentáveis para mitigar os impactos socioambientais tornou-se imprescindível, destacando-se a utilização de bioplásticos, capazes de originar diversos materiais, como embalagens, produtos médicos e odontológicos, além de itens comestíveis.³⁻⁵

Os bioplásticos, materiais produzidos com base em biopolímeros naturais, têm se destacado nas últimas décadas nesse contexto.⁶ Entre os polímeros utilizados em sua fabricação, o amido sobressai pela ampla disponibilidade, baixo custo e facilidade de processamento, sendo frequentemente associado ao glicerol.⁷ Nesse tipo de formulação, o glicerol atua como plastificante, reduzindo a rigidez do polímero e conferindo-lhe maior flexibilidade e maleabilidade.^{8,9}

Além da matriz polimérica e do plastificante, é possível incorporar diferentes cargas vegetais à composição dos bioplásticos.¹⁰ Essas cargas influenciam diretamente as propriedades físicas e mecânicas do material, podendo alterar sua resistência e flexibilidade. Tais modificações são determinantes para a viabilidade do produto final e sua adequação para aplicações comerciais.^{11,12}

Paralelamente, a indústria alimentícia é responsável pela geração de grandes volumes de resíduos, que frequentemente são descartados de forma inadequada, contribuindo para a poluição ambiental e para a emissão de gases responsáveis pelo efeito estufa.¹³ Dentre os principais resíduos sólidos oriundos desse setor, destacam-se os bagaços e fibras vegetais, resultantes de processos de fabricação de bebidas e óleos.¹⁴ A necessidade de reintegrar esses materiais ao ciclo produtivo, atribuindo-lhes novas finalidades, cresce diante desse cenário.¹⁵ Tal estratégia está alinhada aos princípios da sustentabilidade e da economia circular, adotados como alternativas para minimizar os impactos ambientais negativos causados pelos resíduos industriais.¹⁶

Dentre os resíduos vegetais, o bagaço de malte, constituído por hemicelulose, celulose, proteínas e lignina, surge como uma alternativa promissora de matéria-prima para a fabricação de bioplásticos.¹⁷⁻²¹ De acordo com estudos recentes, o resíduo gerado após o processo cervejeiro pode chegar a 40 milhões de toneladas,^{22,23} o que poderia ser aproveitado ou incorporado a materiais à base de amido e glicerol, originando filmes com propriedades mecânicas aprimoradas e susceptíveis à decomposição microbiana.²⁴ Os bioplásticos elaborados a partir de bagaço de malte, amido e glicerol apresentam-se especialmente atrativos por sua maleabilidade e capacidade de alongamento, características fundamentais para aplicações em embalagens flexíveis.²⁴ Além disso, a variação da

granulometria do bagaço de malte pode interferir diretamente em propriedades determinantes para a aplicação comercial desses filmes.

Apesar dos avanços obtidos, os estudos abordando a influência da granulometria do bagaço de malte nas propriedades dos bioplásticos ainda são limitados na literatura. Com base nessas informações, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar as propriedades físicas, químicas e mecânicas de bioplásticos à base de amido e glicerol, obtidos a partir de formulações variando a quantidade de glicerol e incorporando diferentes frações granulométricas de bagaço de malte.

PARTE EXPERIMENTAL

Preparação das frações do bagaço de malte

O bagaço de malte, foi doado pela cervejaria Hausmalte (Governador Valadares - MG), armazenado sob refrigeração, descongelado e submetido à secagem em estufa a 105 °C por 6 horas. O processo foi finalizado após confirmação de que o material atingiu massa constante depois do processo de secagem. 30% do material seco (~ 90g) foi separado e denominado amostra bruta (fração 1), enquanto os outros 70% (210 g) restantes foi moído em um micromoinho de discos (Star FT 48) e separadas em três amostras após separação granulométrica utilizando peneiras de malha 35 e malha 60 mesh, a saber: amostra retida na peneira de malha 35 mesh (fração 2); amostra retida na peneira de malha 60 mesh (fração 3); e amostra que passou pela malha 60 mesh (fração 4).

Preparação dos bioplásticos

Os bioplásticos foram preparados variando tanto o teor de glicerol (Merck), o qual foi adicionado em relação à quantidade em amido (Sigma-Aldrich), de 10 a 40% m/m (grupos controle 1-4), quanto o tipo de amostrado bagaço de malte (frações 1 a 4, subdivididas em X.1 a X.4 dependendo do teor de glicerol), sempre com um teor de 15% m/m do bioplástico (soma das massas de fração, com amido e glicerol). Os dados para preparação de cada material estão listados na Tabela 1.

Tabela 1. Massas de amido, glicerol e bagaço de malte processado utilizadas na preparação dos diferentes bioplásticos

Denominação do bioplástico	amido (g)	glicerol (g)	bagaço de malte (g) (amostra)
1	1,8	0,2	-
2	1,6	0,4	-
3	1,4	0,6	-
4	1,2	0,8	-
1.1	1,8	0,2	0,3 (fração 1)
1.2	1,6	0,4	0,3 (fração 1)
1.3	1,4	0,6	0,3 (fração 1)
1.4	1,2	0,8	0,3 (fração 1)
2.1	1,8	0,2	0,3 (fração 2)
2.2	1,6	0,4	0,3 (fração 2)
2.3	1,4	0,6	0,3 (fração 2)
2.4	1,2	0,8	0,3 (fração 2)
3.1	1,8	0,2	0,3 (fração 3)
3.2	1,6	0,4	0,3 (fração 3)
3.3	1,4	0,6	0,3 (fração 3)
3.4	1,2	0,8	0,3 (fração 3)
4.1	1,8	0,2	0,3 (fração 4)
4.2	1,6	0,4	0,3 (fração 4)
4.3	1,4	0,6	0,3 (fração 4)
4.4	1,2	0,8	0,3 (fração 4)

Os bioplásticos foram preparados utilizando o método de *casting*,²¹ com adaptações baseadas em estudos prévios. Os materiais foram preparados a partir da mistura em um béquer de massas necessárias de amido, glicerol e fração de bagaço de malte (ver Tabela 1) em 25 mL de água Milli-Q (tipo 1). A água Milli-Q utilizada na preparação dos materiais e soluções foi obtida a partir de filtração usando um sistema de purificação da Millipore® (Merk Direct-Q UV Smart). A mistura foi mantida sob agitação constante em agitador magnético por 10 minutos à temperatura ambiente. Em seguida, o béquer foi transferido para uma chapa aquecedora a 200 °C e agitado continuamente por mais alguns

minutos. A temperatura foi monitorada até a gelatinização do amido, entre 65 e 75 °C, momento em que a agitação magnética foi substituída por agitação mecânica. Após completar exatos 10 minutos de aquecimento, o material foi vertido em placas de Petri e levado à secagem por 72 horas em estufa de circulação de ar (Thoth), a 50 °C, até completa remoção da umidade. Os bioplásticos obtidos foram caracterizados por meio de análises físicas, químicas e mecânicas.

Análise microscópica dos bioplásticos

As imagens dos materiais foram obtidas por microscopia óptica, utilizando um microscópio Digilab (modelo 163046-DI-6.1), com aumento de 400×. Para cada amostra foram obtidas cinco imagens sob iluminação padronizada com luz branca refletida. As imagens foram adquiridas por um sensor CCD com resolução de 5,0 MPx e tratadas com o programa ImageJ (versão 1.53, National Institutes of Health – NIH, Bethesda, MD, EUA).

Espectros de infravermelho (ATR-FTIR)

Os espectros na região do infravermelho médio (4000 a 700 cm^{-1}) dos materiais foram obtidos utilizando um espectrofotômetro da Perkin Elmer (Spectrum Two) com transformada de Fourier (FTIR), utilizando o módulo de refletância total atenuada (ATR). Amostras dos bioplástico foram prensadas sobre o cristal de ZnSe (seleneto de zinco) e os espectros foram obtidos como a média de 8 varreduras consecutivas e resolução de 2 cm^{-1} . O programa Perkin Elmer Spectrum ES (versão: 10.03.08.0133) foi utilizado para a aquisição dos espectros. Os dados foram exportados para edição no programa Microcal Origin 9.0 (OriginLab, Northampton, MA.).

Análises termogravimétricas

As análises térmicas dos compostos foram realizadas usando equipamento Hitachi STA7200RV. As amostras dos bioplástico (~ 2 mg) foram colocadas em um cadinho de alumina e os experimentos foram realizados com rampa de temperatura de 30 a 900 °C e taxa de aquecimento de 10 °C min^{-1} , sob fluxo de ar comprimido de 300 mL min^{-1} . Os dados foram tratados usando o Microcal Origin 9.0 (OriginLab, Northampton, MA.).

Propriedades físicas dos bioplásticos

Propriedades físicas dos materiais foram determinadas a partir de medidas das dimensões e massa de quadrados ou retângulos de cada bioplástico. A espessura (em mm) foi determinada experimentalmente, enquanto a gramatura (em g cm^{-2}) e densidade (em g cm^{-3}) foram calculadas usando as seguintes equações: gramatura = massa/ (comprimento x largura); e densidade = massa/ (comprimento x largura x espessura). As dimensões (comprimento, largura e espessura) foram medidas utilizando um paquímetro digital (Fowler) com resolução 0,02 milímetros. As massas foram medidas utilizando uma balança analítica (Urano) com precisão de 0,0001 g. Todas as medidas foram realizadas em no mínimo quadruplicatas por material. As propriedades medidas e calculadas têm os seus valores expressos como a média $\pm$ desvio padrão. A análise dos dados foi realizada usando o modelo de análise de variância (ANOVA) com 5% de significância e a comparação das médias pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$), com auxílio do programa GraphPad Prism 6.0 (GraphPad Software, San Diego, CA, USA).²²

Propriedades mecânicas

Análise Dinâmico-Mecânica (DMA)

O efeito da adição de glicerol nas propriedades mecânicas dos filmes foi avaliado por meio de Análises Dinâmico Mecânicas, utilizando-se o reômetro automatizado DHR1 da T.A. Instruments, acoplado ao acessório de DMA de fixação linear, à temperatura de 25 °C. Durante os ensaios de tração, os filmes foram fixados no acessório e submetidos a uma tração com velocidade constante de $30 \mu\text{m s}^{-1}$, até a ruptura. Os experimentos foram realizados em hexaplicata, construindo um gráfico de tensão x gap para cada filme na ausência e na presença dos componentes inorgânicos, para fins de comparação.²⁵

Foram medidas as propriedades tensão de ruptura (T_r / MPa), percentual de alongamento na ruptura ($\epsilon_r\%$) e módulo de Young (Y / MPa). Inicialmente todos os dados foram manipulados usando o programa TRIOS® (T.A. Instruments) e subsequentemente foram exportados para o Microcal Origin 9.0®.

Análises estatísticas entre as propriedades físicas e mecânicas dos bioplásticos

Para verificar a existência ou não de similaridade entre as amostras, análises de correlação linear de

Pearson e análise hierárquica de cluster (AHC) foram realizadas utilizando os dados de propriedades físicas e mecânicas do material. A matriz de correlação entre as propriedades espessura, gramatura, densidade, tensão de ruptura, percentual de alongamento na ruptura e o módulo de Young, para todas as amostras foi obtida utilizando o programa Microsoft Excel® do pacote Office 2013. A AHC classifica objetos em diferentes grupos por meio da estimativa de similaridade das características que os objetos tem, sendo o resultado apresentado na forma de um dendrograma.²⁶ As distâncias utilizadas na análise de similaridade foram obtidas por meio do método de cluster mais distante com o cálculo de correlação para análise entre as variáveis e distância euclidiana para análise entre os bioplásticos. Os dados foram tratados usando o Microcal Origin 9.0 (OriginLab, Northampton, MA.).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 são apresentadas imagens obtidas por microscopia óptica dos bioplásticos formulados sem (grupos controle 1 a 4) e com adição de bagaço de malte (1.1 a 4.4). Essas imagens permitem uma análise qualitativa da superfície do material e da distribuição do compósito particulado. A partir da análise das imagens, foi observado nos grupos controle (1 a 4) que a aplicação do método de *casting* levou os materiais a apresentarem pequenas rugosidades em sua superfície, o que torna o material translúcido. Foi observado ainda a distribuição nos diferentes tamanhos para o compósito particulado (frações de bagaço de malte) nos materiais. Os bioplásticos derivados da fração 1 apresentam uma distribuição mais heterogênea dos grãos provenientes do bagaço com uma ampla variedade de partículas, incluindo aquelas com dimensões superiores a 500 μm . Os materiais obtidos com as frações do bagaço após a separação granulométrica demonstraram distribuição de partículas mais homogênea, com presença de grãos com no mínimo uma de suas dimensões superior a 500 μm para amostras derivadas da fração 2, entre 500 e 250 μm para aquelas derivadas da fração 3 ou menor que 250 μm para aquelas derivadas da fração 4.

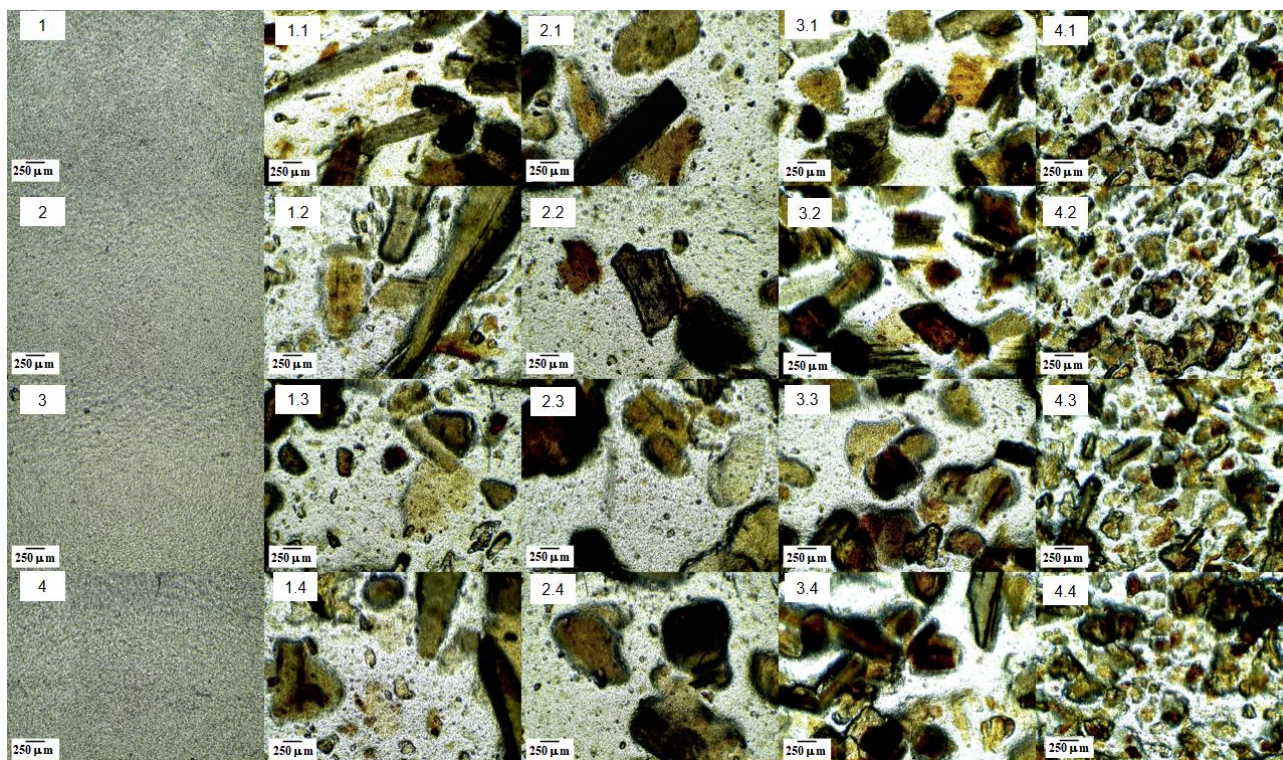


Figura 1. Imagens de microscopia óptica com aumento de 400x dos bioplásticos obtidos variando o teor de glicerol de 10 a 40% m/m (1-4) e o tipo de amostra de bagaço de malte (frações 1 a 4, subdivididas em X.1 a X.4)

Espectros da região do infravermelho

Alterações na posição ou intensidade das bandas de absorção em espectros de infravermelho podem indicar interações intermoleculares entre os componentes da matriz polimérica, como a formação de novas ligações de hidrogênio ou mudanças estruturais no filme após a adição de plastificantes ou cargas vegetais.^{27,28} Nas Figuras 1S a 6S (ver material suplementar) estão apresentados os espectros de infravermelho, na região de 4000 a 700 cm^{-1} , das amostras de amido, glicerol e bioplásticos (1-4) obtidos variando o teor de glicerol de 10 a 40% m/m (Figura S1); diferentes amostras de bagaço de malte, denominadas frações 1-4, retidas em diferentes malhas (Figura S2); bioplásticos contendo 10% m/m de glicerol sem (1) e com diferentes amostras do bagaço de malte (1.1 a 4.1) (Figura S3); bioplásticos contendo 20% m/m de glicerol sem (2) e com diferentes frações de bagaço de malte (1.2 a 4.2) (Figura S4); bioplásticos contendo 30% m/m de glicerol sem (3) e com diferentes frações de bagaço de malte (1.3 a 4.3) (Figura S5); e bioplásticos contendo 40% m/m de glicerol sem (3) e com diferentes frações de bagaço de malte (1.4 a 4.4) (Figura S6). Pelo fato de todos esses materiais serem ou possuírem polióis seus espectros de infravermelho foram bem semelhantes na região varrida. Dentre as absorções observadas para esses compostos estão o estiramento de ligação O-H em torno

de 3300 cm^{-1} ; estiramentos simétrico e assimétrico de ligações CH na região de 2950 a 2850 cm^{-1} , deformação de grupo OH em torno de 1620 cm^{-1} ; e estiramentos da ligação CO e do grupo COC na região de 1200 a 950 cm^{-1} .²⁹ Na Tabela 2 estão listados as principais bandas observados para os materiais.

Na Figura S2, a absorção em torno de 1855 cm^{-1} pode ser atribuída aos estiramentos da ligação CH de grupos alifáticos como metila, a banda em torno de 1742 cm^{-1} ao estiramento da ligação C=O e a banda em torno de 1550 cm^{-1} atribuídas a estiramentos de anéis aromáticos da lignina. Adicionalmente, comparando-se as diferentes granulometrias de bagaço de malte (frações 1-4), podemos observar que a separação granulométrica não promoveu mudanças significativas na posição das bandas nos espectros de infravermelho.

Nos espectros de 1 a 4, a principal alteração observada foi a sobreposição das bandas características dos estiramentos das ligações COH e COC do amido e do glicerol. Outro ponto importante foi que o aumento da concentração de glicerol promoveu intensificação da banda atribuída ao estiramento do grupo C–O em 1100 cm^{-1} , em relação à banda em 980 cm^{-1} , conforme mostrado na Figura 2A. Entretanto, ao comparar os espectros das amostras contendo bagaço de malte (1.1 a 4.4) com os controles (1-4) não foram detectadas alterações significativas nas posições das bandas na região de 1200 a 900 cm^{-1} , como exemplificado pela Figura 2B. Além disso, não foram observadas absorções em 1742 e 1539 cm^{-1} presentes nas amostras de bagaço de malte (Figura 2S e Figura 2B). Essa ausência pode ser justificada pelo fato de que o bagaço se encontra completamente envolto pela matriz do bioplástico, o que impede a interação direta do feixe infravermelho com os grãos do bagaço no modo ATR, resultando em uma grande diminuição em sua intensidade ou mesmo ausência de sinais específicos oriundas dos componentes do bagaço de malte.

Análises termogravimétricas

Na Figura 7S estão apresentadas as curvas termogravimétricas (TG) do amido, glicerol e frações 1-4 de bagaço de malte. Na Figura 3A estão apresentados as curvas TG dos bioplásticos com teores de glicerol de 10 a 40% m/m (sem adição de bagaço); enquanto que nas Figuras 3B e 3C estão apresentadas as curvas TG dos bioplásticos, contendo 10% e 30% de glicerol com as frações 1-4 de bagaço de malte. Demais curvas TG, contendo 20% e 40% de glicerol com as frações 1-4 de bagaço de malte estão demonstrados no material suplementar (Figuras 8S e 9S).

Tabela 2. Principais bandas nos espectros de FTIR dos bioplásticos e seus precursores

	$\nu(\text{OH})$	$\nu(\text{CH})$	$\delta(\text{OH})$	$\nu(\text{COH})$ e (COC)
Amido	3312	2953/ 2879	1641	1012 / 997
Glicerol	3301	2934/ 2868	1656	1031/ 993
fração 1	3289	3920/2854	1635	1026
fração 2	3284	3920/2854	1639	1022
fração 3	3280	3920/2854	1635	1024
fração 4	3280	3920/2854	1634	1021
1	3299	2929/2891	1641	1017/995
1.1	3304	2927/2890	1642	1016/996
2.1	3298	2925/2891	1644	1015/994
3.1	3299	2925/2956	1642	1014/995
4.1	32978	2926/2889	1641	1012/995
2	3298	2928/2892	1648	1018/997
1.2	3295	2926/2887	1645	1014/995
2.2	3296	2920/2885/2849	1645	1014/998
3.2	3280	2925/2889/2855	1645	1015/996
4.2	3280	2924/2885	1648	1017/993
3	3307	2931/2889	1647	1016/998
1.3	3295	2929/2892	1647	1016/997
2.3	3282	2927/2886	1646	1016/996
3.3	3281	2927/2889/2855	1646	1013/997
4.3	3290	2929/2885/2843	1643	1012/999
4	3302	2932/2886	1644	1019/999
1.4	3291	2933/2887	1647	1017/998
2.4	3295	2932/2887	1647	1017/997
3.4	3290	2929/2890/2853	1645	1017/999
4.4	3290	2925/2885/2857	1647	1017/997

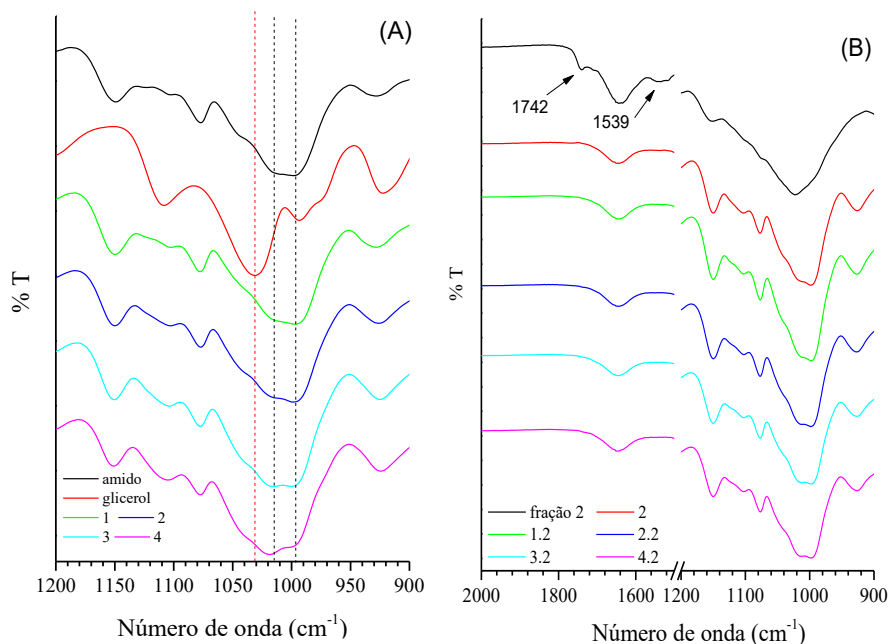


Figura 2. Destaque dos espectros de ATR-FTIR do amido, glicerol, dos bioplásticos obtidos variando o teor de glicerol de 10 a 40% m/m (1-4) (A) e dos bioplásticos a 20% de glicerol com diferentes granulometrias do bagaço de malte como carga (1.2 a 4.2) (B).

Conforme Figura 7S, o glicerol nas condições estudadas apresenta um único evento de perda de massa com temperatura *onset* de 91,7 °C e temperatura *endset* de 222,3 °C. No entanto, deste o início do experimento já se observa perda de massa na glicerol. Esse comportamento é similar ao observado por Castelló & Aranda (2009), sendo a pequena perda de massa observada a partir de 30 °C atribuída à perda de água existente na amostra.³⁰

O amido apresentou três eventos de perda de massa, sendo o evento na região de 30 a 140 °C, atribuído à desidratação; e os eventos de 140 a 357 °C e de 357 a 633 °C atribuídos a duas etapas de decomposição da cadeia polissacarídica, conforme descrito na literatura.³¹ As frações de bagaço de malte apresentaram perfis de decomposição muito parecidos com o amido, sendo as decomposições atribuídas à degradação da hemicelulose e lignina. As similaridades nos perfis de decomposição dessas amostras podem ser justificadas pelo fato desses materiais apresentarem uma composição química semelhante, com esqueleto glicosídico rico em hidroxilas (polióis).

Para os bioplásticos foram preservados os três eventos de perda de massa discutidos anteriormente para o amido e frações de bagaço conforme Figuras 3A, 3B, 8S e 9S. Contudo, a primeira perda observada entre 30 e 200 °C foi associada à dessorção de moléculas de água e também à evaporação parcial do glicerol.³⁰ Salienta-se que mesmo após a secagem dos bioplásticos em estufa por 72 h, foi

observado pelo menos 8% de perda de massa até 150 °C em todos os sistemas (Figura 3A), sugerindo a existência de moléculas de água fortemente ligadas ao amido/glicerol. Quando o glicerol é utilizado como plastificante em outros sistemas poliméricos, é comum observar sua evaporação em temperatura próxima de 190 °C.³² Quanto às demais decomposições, atribui-se os mesmos fenômenos observados para a decomposição das amostras puras de amido e bagaço.^{33,34}

O aumento do teor de glicerol levou a uma diminuição da temperatura *onset* no segundo evento de perda de massa, sendo mais evidente para a amostra 4 (Figura 3A). Tal comportamento foi atribuído a um enfraquecimento de interações intermoleculares com evaporação/decomposição do glicerol. Com a adição de bagaço, nos bioplásticos contendo acima de 10% de glicerol, esse comportamento foi potencializado, levando a uma redução ainda maior na temperatura *onset* de decomposição, conforme demonstrado nas figuras 3C, 8S e 9S. Essa intensa mudança entre 100 e 200 °C é um indício que a adição do bagaço pode criar uma descontinuidade estrutural, enfraquecendo as interações entre amido e glicerol.

Propriedades físicas e mecânicas dos bioplásticos

A análise de propriedades morfológicas (espessura e gramatura) dos bioplásticos e sua densidade fornece informações relevantes sobre a sua natureza. Essas informações estão apresentadas na Tabela 3. A espessura do material é geralmente dependente do tipo de estrutura da composição, massa molecular e interações intermoleculares dentro do material, pois definirá o grau de empacotamento das macromoléculas.³⁵

Conforme observado, a espessura dos bioplásticos obtidos variou de 0,023 a 0,039 mm. Trabalhos envolvendo casca e palha de arroz também reportam espessuras de 0,030–0,045 mm, valores muito semelhantes aos observados neste estudo.³⁶

Entre os bioplásticos sem bagaço (1-4, com teor de glicerol de 10 a 40%) não foram observadas quaisquer alterações significativas nos valores de espessura. Entretanto, quando se compara as amostras contendo bagaço de malte com seus correspondentes controles (1-4), tem-se uma tendência de aumento da espessura, principalmente para as amostras derivadas das frações 1 e 2, sendo inclusive significativa ($p < 0,05$) em alguns casos, conforme Tabela 3. Em tais amostras, tem-se uma maior heterogeneidade de partícula (fração 1) ou maiores tamanhos de partícula (fração 2). Esses fatores podem estar contribuindo para os maiores valores de espessura desse conjunto de amostras, por dificultar o empacotamento durante a secagem.

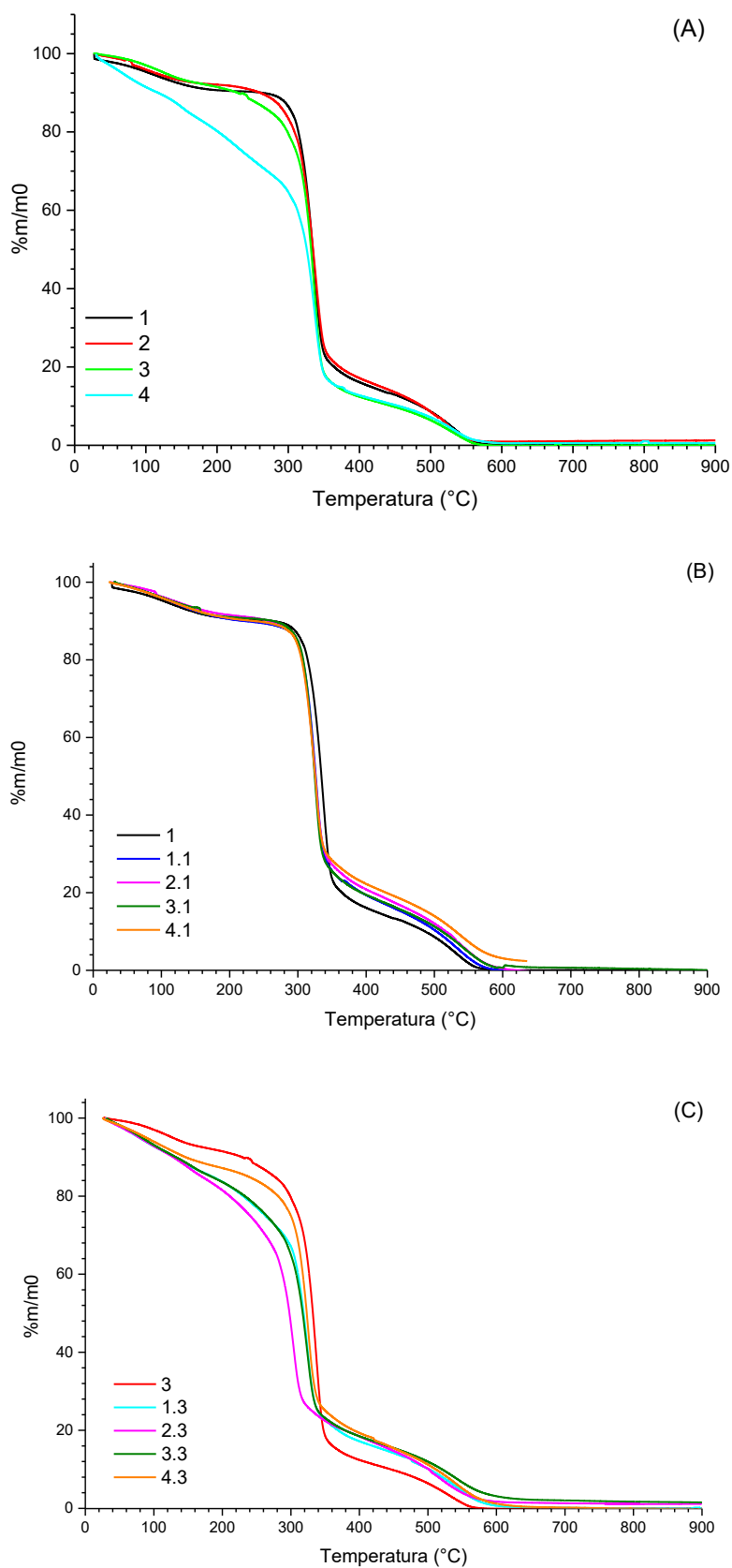


Figura 3. Curvas TG dos bioplásticos obtidos variando o teor de glicerol de 10 a 40% m/m (frações 1-4) (A), dos bioplásticos a 10% de glicerol com diferentes frações de bagaço de malte (B) e dos bioplásticos a 30% de glicerol com diferentes frações de bagaço de malte .

A determinação da gramatura é relevante, pois o aumento no seu valor reflete em uma maior resistência mecânica e maior capacidade do material de suportar deformações.^{32,33} As amostras analisadas apresentaram gramaturas variando de 0,029 a 0,041 g cm⁻², sem diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$) em função do aumento do teor de glicerol ou da adição das diferentes frações de bagaço. Esses resultados indicam a eficiência do método de *casting* na obtenção dos bioplásticos. Com a análise das informações da densidade dos biofilmes foi possível observar no grupo controle (1-4) uma tendência no aumento desta propriedade com o aumento do teor de glicerol, demonstrando a sua eficiência como agente aglutinante. Contudo, com a adição do bagaço, na maioria dos casos, foi observado uma diminuição da densidade frente ao seu respectivo controle. Esse comportamento demonstra que a inserção do bagaço de malte tem efeito sobre o empacotamento do bioplástico.

Tabela 3. Propriedades físicas dos bioplásticos obtidos neste trabalho

amostra	espessura (mm)	gramatura (g cm ⁻²)	densidade (g cm ⁻³)
1	0,25 ± 0,03	0,031 ± 0,001	1,26 ± 0,18
1.1	0,31 ± 0,04	0,035 ± 0,001	1,15 ± 0,26
2.1	0,33 ± 0,04	0,036 ± 0,003	1,10 ± 0,05
3.1	0,30 ± 0,07	0,035 ± 0,007	1,22 ± 0,46
4.1	0,29 ± 0,06	0,030 ± 0,003	1,04 ± 0,15
2	0,22 ± 0,01	0,031 ± 0,001	1,41 ± 0,10
1.2	0,31 ± 0,04	0,030 ± 0,004	0,98 ± 0,09
2.2	0,40 ± 0,03***	0,032 ± 0,002	0,79 ± 0,11***
3.2	0,33 ± 0,03*	0,033 ± 0,003	0,99 ± 0,08
4.2	0,29 ± 0,04	0,038 ± 0,006	1,32 ± 0,22
3	0,22 ± 0,02	0,029 ± 0,003	1,49 ± 0,09
1.3	0,35 ± 0,04**	0,035 ± 0,001	1,03 ± 0,09
2.3	0,29 ± 0,07	0,032 ± 0,004	1,17 ± 0,22
3.3	0,31 ± 0,03	0,038 ± 0,003	1,23 ± 0,17
4.3	0,30 ± 0,01	0,038 ± 0,004	1,26 ± 0,11
4	0,23 ± 0,02	0,034 ± 0,003	1,51 ± 0,17
1.4	0,36 ± 0,01***	0,041 ± 0,005	1,13 ± 0,14
2.4	0,23 ± 0,03	0,029 ± 0,005	1,26 ± 0,12
3.4	0,29 ± 0,03	0,040 ± 0,004	1,40 ± 0,18
4.4	0,25 ± 0,03	0,032 ± 0,004	1,36 ± 0,18

Valores apresentados como a média $\pm$ desvio padrão (n=4). Teste de Tukey: *p < 0,05 em relação ao bioplástico correspondente sem o bagaço de malte; **p < 0,001 em relação ao bioplástico correspondente sem o bagaço de malte; e *** p < 0,0001 em relação ao bioplástico correspondente sem o bagaço de malte.

As propriedades mecânicas de filmes biodegradáveis são fundamentais para avaliar sua viabilidade em aplicações práticas, como embalagens ou substituição de plásticos convencionais. A tensão de ruptura (Tr / Pa), percentual de alongamento na ruptura ($\epsilon\%$) e módulo de Young (Y / MPa) são diretamente influenciadas pela composição e estrutura do material, sendo, portanto, cruciais para a caracterização do bioplástico desenvolvido.

A Figura 4A mostra os dados de tensão de ruptura para todas as amostras, sendo este parâmetro, uma medida da resistência do material à tração. Como pode ser observado, apesar do aumento que ocorre em Tr entre as amostras com 10 e 20 % de glicerol (1 e 2), a adição de glicerol tem uma tendência de reduzir os valores de Tr, das amostras 2-4. Isso demonstra que o glicerol tem um efeito significativo sobre a resistência mecânica do material, tornando-os menos resistentes por reduzir as interações amido-amido.

Na presença de bagaço de malte, com exceção da amostras contendo 40% de glicerol (derivadas da fração 4), observa-se que a adição do bagaço também promove uma redução significativa na tensão de ruptura em relação aos respectivos controles (1-3), sendo este efeito atribuído à descontinuidade imposta pelas partículas de bagaço na amostra. Neste caso, pode-se dizer que para Tr, tanto a adição de glicerol quanto a adição das frações de bagaço atuam sinergicamente para reduzir os valores deste parâmetro.

Na Figura 4B, estão apresentados os dados de percentual de alongamento na ruptura ($\epsilon\%$). Esta grandeza mede o grau de plasticidade do material, ou seja, o quanto o material é capaz de se deformar irreversivelmente mediante tração. Conforme observado, o aumento do teor de glicerol levou a um aumento significativo de $\epsilon_r\%$ para os grupos de bioplásticos com teor de glicerol de 30 e 40% (3, 1.3 a 4.3, 4 e 1.4 a 4.4), quando comparado com os grupos de bioplásticos com teor de glicerol de 10 e 20%. Esse comportamento é atribuído à ação plastificante do glicerol, que reduz as interações intermoleculares entre as cadeias de amido, tornando a estrutura menos rígida, facilitando um deslizamento das cadeias.³⁷ Entretanto, dentro dos grupos 3 e 4, quando se compara o efeito da adição do bagaço com os controles (3 e 4), observa-se que o bagaço tem um efeito de reduzir a plasticidade dos materiais, demonstrando que, para o parâmetro $\epsilon_r\%$, a adição de bagaço tem efeito oposto à adição de glicerol. Esses resultados evidenciam que tanto o teor de plastificante quanto o tamanho e a distribuição das partículas incorporadas influenciam diretamente o comportamento mecânico dos

materiais.³⁸

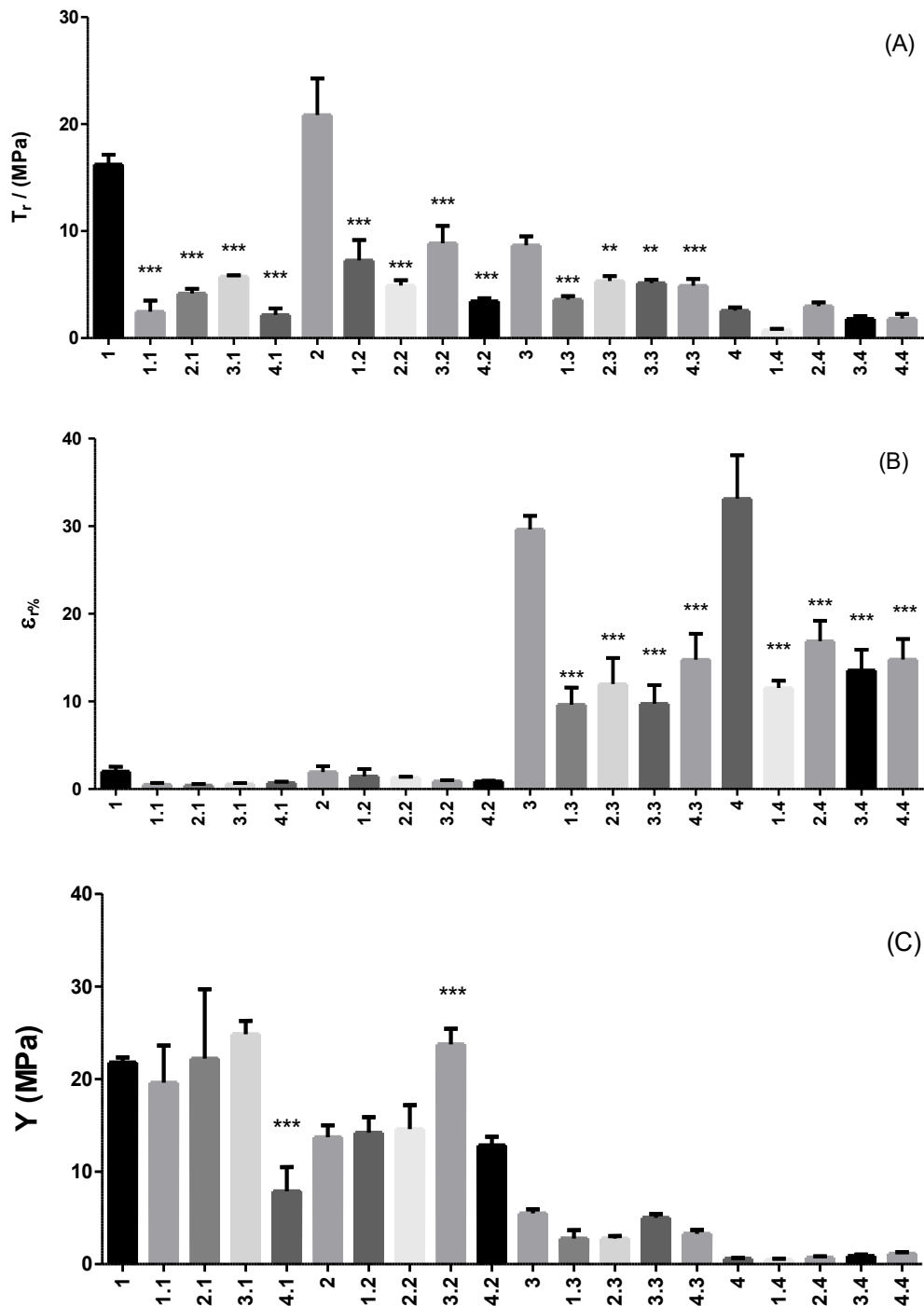


Figura 4. Comparação entre as tensões de ruptura (T_r , MPa) (A), percentual de alongamento na ruptura (ϵ_r %) (B) e módulo de Young (Y , MPa) (C) dos bioplásticos obtidos variando o teor de glicerol de 10 a 40% m/m (1-4) e o tipo de fração do bagaço de malte (frações 1 a 4, subdivididas em X.1 a X.4). Teste de Tukey: * $p < 0,05$ em relação ao bioplástico correspondente sem o bagaço de malte; ** = $p < 0,001$ em relação ao bioplástico correspondente sem o bagaço de malte; *** = $p < 0,0001$ em relação ao bioplástico correspondente sem o bagaço de malte.

Na Figura 4C estão demonstrados os valores de Módulo de Young, os quais são obtidos pelo coeficiente angular na região elástica (linear) das curvas de tensão-deformação. Este parâmetro, por sua vez, é uma medida da rigidez do material, ou seja, mede a capacidade de resistir à deformação sob tensão de tração.

Como pode ser observado, o aumento do teor de glicerol levou a um aumento significativo de Y para os grupos de bioplásticos com teor de glicerol de 10 e 20%, quando comparado com os grupos de bioplásticos com teor de glicerol de 30 e 40%. Essa maior rigidez para os grupos de amostras contendo 10 e 20% de glicerol foi atribuído à baixa concentração de glicerol no meio, não sendo efetivo em se criar efeito plastificante nestas concentrações, coincidindo com os dados de $\varepsilon_r\%$. Entretanto, dentro dos grupos 1 e 2, quando se compara as amostras contendo bagaço com seus respectivos controles, não se observa nenhuma tendência para este parâmetro.

Com o estudo da correlação entre as propriedades morfológicas e mecânicas para todos os bioplásticos (Tabela 1S) foi possível observar uma correlação negativa entre a densidade e espessura dos materiais ($r = -0,876$) e entre o módulo de Young e a % alongação ($r = -0,663$), além de correlações positivas entre percentual de alongamento na ruptura e tensão de ruptura ($r = 0,672$) e entre % alongação e densidade dos bioplásticos ($r = 0,671$). Apesar de ser esperado que existisse correspondência entre os pares de propriedades a densidade e espessura, módulo de Young e a % alongação de ruptura, e percentual de alongamento na ruptura e tensão de ruptura, foi observado que a correlação foi bastante enfraquecida, r de Pearson bem distante de 1 em módulo. O interessante foi o aparecimento da correlação entre a densidade e % alongação que demonstra que quanto mais denso o bioplástico maior a capacidade do material se alongar. Resultados semelhantes já foram observados em estudos anteriores.³⁹

A partir da AHC, foi possível verificar entre as propriedades estudadas a formação de três grupos entre os pares espessura e gramatura, tensão de ruptura e módulo de Young, e percentual de alongamento na ruptura e densidade (Figura 10S). Esse resultado foi semelhante ao observado durante a análise da correlação linear. Além disso, ao ser estudado o comportamento dos vários materiais frente às suas propriedades (Figura 5), foi possível observar a formação de 4 grupos. O grupo formado pelas amostras 1 e 2 foi aquele que apresentou elevada tensão de ruptura e baixa percentual de alongamento na ruptura, resultando em materiais mais rígidos entre as amostras do controle. Enquanto que o grupo formado pelas amostras 3 e 4 foi o que apresentou baixa tensão de ruptura e alta taxa de alongação, resultando em materiais mais flexíveis. Além disso, um terceiro grupo foi formado pelas amostras 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 3.1, 3.2, 4.1 e 4.2 com propriedades distintas do grupo formado entre as amostras formadas do grupo 1 e 2, contudo mais semelhantes a esses materiais. O último grupo foi formado pelas amostras 1.3, 1.4, 2.3, 2.4, 3.3, 3.4, 4.3 e 4.4 com propriedades mais semelhantes entre

as do grupo formado por 3 e 4. Os dados obtidos neste estudo demonstram que o teor do glicerol usado na preparação dos bioplásticos apresenta um maior efeito sobre as características físicas e mecânicas do material do que as alterações promovidas pela variação da granulometria.

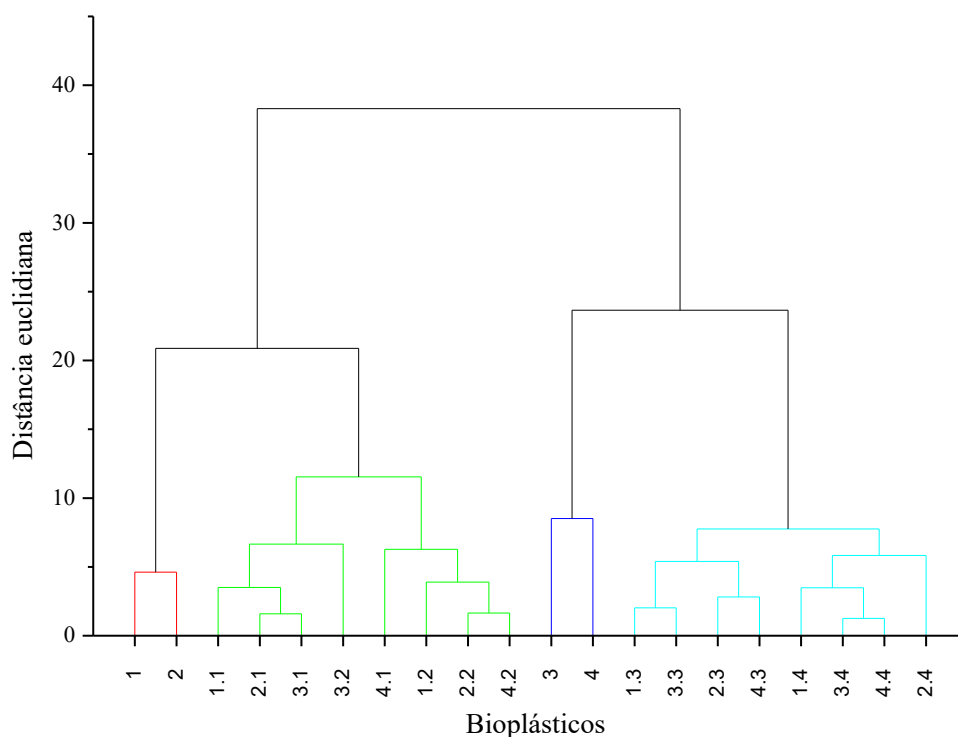


Figura 5. Dendrograma como os agrupamentos dos bioplásticos obtidos na AHC baseada na avaliação das distâncias euclidianas entre as propriedades físicas e mecânicas desses materiais

CONCLUSÕES

Os filmes obtidos mostraram significativas variações em suas propriedades físicas e mecânicas tanto com alteração do teor de glicerol, quanto pelo tamanho das partículas do bagaço. A partir desse estudo foi possível caracterizar dois tipos de comportamentos diferentes para os materiais em função do teor de glicerol, sendo que quando menor ou igual a 20% os materiais foram mais rígidos e enquanto que maior ou igual a 30% os materiais foram mais flexíveis.

Os resultados demonstram o potencial para utilização de resíduos para produção de bioplástico bem como o potencial da modulação de suas propriedades mecânicas, o que abre caminho para eventual aplicação destes materiais na confecção de produtos da indústria. Além disso, considerando a composição dos filmes e os testes realizados há potencial para uso na indústria alimentícia, contudo há necessidade de que sejam realizados novos experimentos para avaliar a capacidade de absorver umidade por esses materiais. O aproveitamento de um resíduo industrial como o bagaço de malte

reforça a proposta de sustentabilidade e o compromisso com práticas alinhadas à economia circular.

DECLARAÇÃO DE DISPONIBILIDADE DE DADOS

Todos os dados estão disponíveis no texto.

AGRADECIMENTOS

Este estudo contou com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG APQ-02506-22, APQ-02762-25), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq: 302574/2025-5), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo incentivo à formação científica, bem como à Universidade Federal de Juiz de Fora – Campus Governador Valadares (UFJF-GV). Agradecimentos especiais à cervejaria Hausmalte pela doação do bagaço de malte.

REFERÊNCIAS

1. Eriksen, M. K.; Pivnenko, K.; Faraca, G.; Boldrin, A.; Astrup, T. F.; Environ. Sci. Technol. 2020, 54, 16166. [[10.1021/acs.est.0c03435](https://doi.org/10.1021/acs.est.0c03435)]
2. Lambert, S.; Wagner, M.; Chem. Soc. Rev. **2017**, 46, 6855. [<https://doi.org/10.1039/c7cs00149e>]
3. Bishop, G.; Styles, D.; Lens, P. N. L.; Resour. Conserv. Recycl. **2021**, 168, 105451. [<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105451>]
4. Ei, L. H. I.; *Bioplásticos: biodegradáveis & biobased – definições, fontes e aplicações*, Editora da Unicamp: Campinas, 2016.
5. Silva, S.; Sena, M.; Ghesti, G. F.; Rev. Virtual Quím. 2024, 16, 6. [<https://doi.org/10.21577/1984-6835.20240040>]
6. Iles, A.; Martin, A. N.; J. Clean. Prod. 2013, 45, 38. [<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.008>]
7. Chariguamán, J. A.: Caracterización de bioplástico de almidón elaborado por el método de casting reforzado con albedo de maracuyá (*Passiflora edulis* spp.); Tesis de Grado, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras, 2015. [<https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/06a5dc04-9bc7-4253-a0ad-30c4c6c160be/content>] acessado em junho 2025.

8. Silva, M. L. T.; Brinques, G. B.; Gurak, P. D.; Braz. J. Food Technol. **2020**, 23, e2018326. [<https://doi.org/10.1590/1981-6723.32618>]
9. Begnini, M. L.; et al.; Braz. J. Dev. **2019**, 5, 28405. [<https://doi.org/10.34117/bjdv5n12-024>]
10. Mussatto, S. I.; Roberto, I. C.; J. Chem. Technol. Biotechnol. **2006**, 81, 268. [<https://doi.org/10.1002/jctb.1374>]
11. Moreira, C.; Schneider, B. S.; Kunst, S.; Morisso, F. D. P.; Res., Soc. Dev. **2022**, 11, e451111335676. [<http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i13.35676>]
12. Debiagi, F.; Mali, S.; Grossmann, M. V. E.; Yamashita, F.; Ciênc. agrotec. **2010**, 34, 6, 1522. [<https://doi.org/10.1590/S1413-70542010000600024>]
13. Leite, B. Z.; Pawlowsky, U.; Eng. Sanit. Ambient. **2005**, 10, 96. [<https://doi.org/10.1590/S1413-41522005000200002>]
14. Reinold, M. R.; Manual Prático de Cervejaria, 1ª ed.; Aden: São Paulo, 1997.
15. Cristofoli, N. L.; Lima, A. R.; Tchoukouang, R. D. N.; Quintino, A. C.; Vieira, M. C.; Sustainability **2023**, 15, 6153. [<https://doi.org/10.3390/su15076153>]
16. Cimpan, C.; et al.; Waste Manag. **2023**, 166, 115. [<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.04.049>]
17. Herrmann, G.; Souza, C. F. V.; Braz. J. Food Technol. **2021**, 24, e2020217. [<https://doi.org/10.1590/1981-6723.21720>]
18. Aliyu, S.; Bala, M.; Afr. J. Biotechnol. **2011**, 10, 324. [<https://www.ajol.info/index.php/ajb/article/view/92219>]
19. Correia, L. F.; et al.; Res., Soc. Dev. **2020**, 9, e730997781. [<http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i9.7781>]
20. Massardi, M. M.; Massini, R. M. M.; De Jesus Silva, D.; J. Eng. Exact Sci. **2020**, 6, 83. [<https://doi.org/10.18540/jcecvl6iss1pp0083-0091>]
21. Lynch, K. M.; Steffen, E. J.; Arendt, E. K.; J. Inst. Brew. **2016**, 122. Lounis, F. M.; Benhacine, F.; Hadj-Hamou, A. S. Int. J. Biol. Macromol. **2024**, 224, 137823. [<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.137823>]
22. Schmidt, A. R.; Dresch, A. P.; Alves Junior, S. L.; Bender, J. P.; Treichel, H.; Catalysts **2023**, 13, 755. [<https://doi.org/10.3390/catal13040755>]
23. Jantason, N.; Supphantharika, M.; Wipatanawin, A.; Chansong, S.; Payongsri, P.; Foods **2024**, 13, 440. [<https://doi.org/10.3390/foods13030440>]
24. Arantes, G. C. A.; et al.; Quím. Nova **2024**, 47, e-20240023. [<https://doi.org/10.21577/0100-4042.20240023>]
25. Pelissari, F. M.; Andrade-Mahecha, M. M.; Sobral, P. J. A.; Menegalli, F. C.; Food

- Hydrocolloids **2013**, 30, 681. [<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.08.007>]
26. Sanyang, M. L.; Sapuan, S. M.; Islam, M. S.; Jawaid, M.; Jahan, S. A.; Polymers **2015**, 7, 1106. [<https://doi.org/10.3390/polym7061106>]
 27. Van Soest, J. J. G.; Tournois, H.; De Wit, D.; Vliegthart, J. F. G.; Carbohydr. Res. **1995**, 279, 201. [[https://doi.org/10.1016/0008-6215\(95\)00270-7](https://doi.org/10.1016/0008-6215(95)00270-7)]
 28. Zavareze, E. D. R.; Dias, A. R. G.; Carbohydr. Polym. **2011**, 83, 317. [<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.08.064>]
 29. Ma, C.; Tao, H.; Tan, C.; Gao, S.; Wu, Z.; Guo, L.; Cui, B.; Yuan, F.; Zou, F.; Liu, P.; Lu, L.; Carbohydr. Polym. **2023**, 321, 121297. [<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121297>]
 30. Castelló, M. L.; Dweck, J.; Aranda, D. A. G. *J. Therm. Anal. Calorim.* **2009**, 97, 627. [<https://doi.org/10.1007/s10973-009-0070-z>]
 31. Resck, I. S.; Sales, M. J. A.; Schlemmer, D. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, **2010**, 20 (1), 6. [<https://doi.org/10.1590/S0104-14282010005000002>]
 32. Alarcon, R. T.; Gaglieri, C.; Bannach, G. *J. Therm. Anal. Calorim.* **2018**, 132 (3), 1579. [<https://doi.org/10.1007/s10973-018-7055-8>]
 33. Da Silva, P. J.; Carvalho, F. A.; da Silva, S. C.; Yamashita, F.; Mendes, A. L. D.; Goto, C. A.; Gonçalves, F.; Balan, G. C.; Shirai, M. A.; Ind. Crops Prod. **2024**, 220, 119274. [<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119274>]
 34. Guezuguan, S. M.; de Freitas, C. P. M.; Monteiro, K. A.; dos Santos Renato, N.; Moreira, R. P. L.; J. Anal. Appl. Pyrolysis **2024**, 183, 106707. [<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106707>]
 35. Sobral, P. J.; Amaral, D. O.; Pesq. Agropec. Bras. **2000**, 35, 1251. [<https://doi.org/10.1590/S0100-204X2000000600022>]
 36. Pormsila, W.; Udomphoch, P.; Processes **2025**, 13, 1387. [<https://doi.org/10.3390/pr13051387>]
 37. Almeida, E. L.; Grossmann, M. V. E.; Yamashita, F.; Mali, S.; Food Hydrocolloids **2013**, 30, 110. [<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.05.009>]
 38. Henrique, C. M.; Teófilo, R. F.; Sabino, L.; Ferreira, C. L. L. F.; Silva, M. A. P.; Food Hydrocolloids **2008**, 22, 1002. [<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2007.05.014>]
 39. Abdel Hamid, E. M.; Mohamed, A. E.; Mohamed, A. A.; Galal, A. A.; Mekhemr, A. A.; Saleh, E. S.; Hassan, M. I.; Elgendy, S. K.; Clean Technol. Environ. Policy **2025**, 27, 2327. [<https://doi.org/10.1007/s10098-025-03135-7>]

MATERIAL SUPLEMENTAR

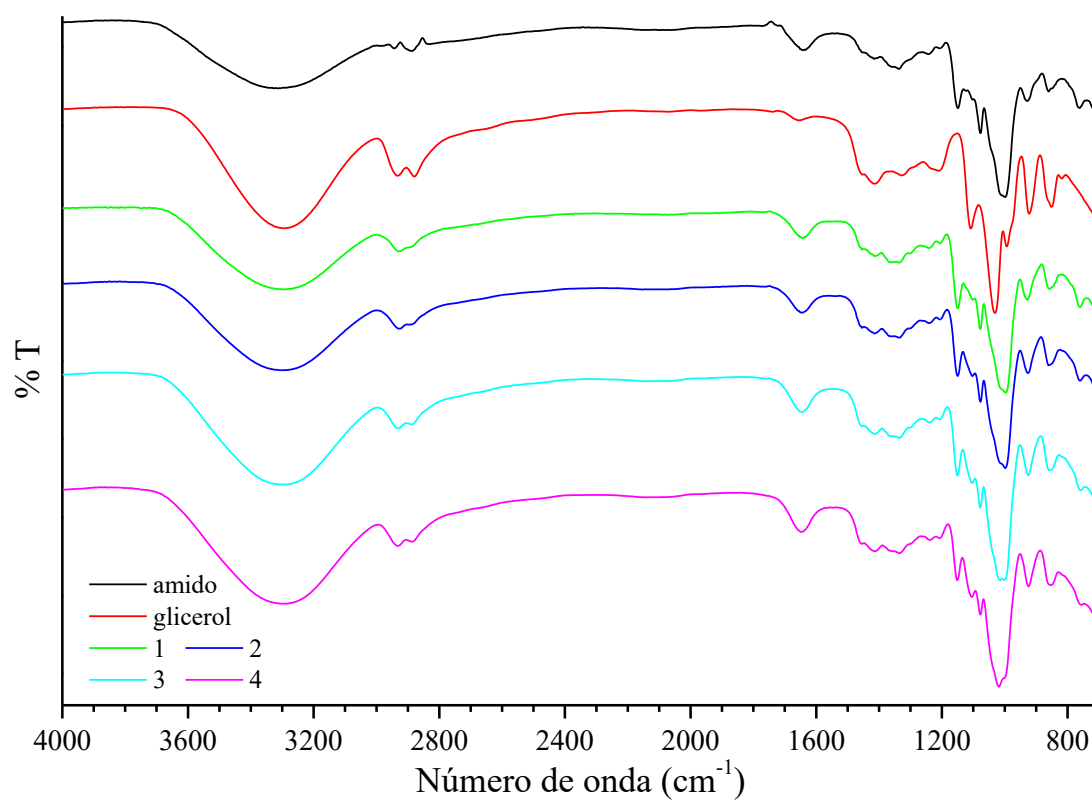


Figura 1S. Espectros de ATR-FTIR na faixa de 4000 a 700 cm^{-1} dos bioplásticos obtidos variando o teor de glicerol de 10 a 40% m/m (1-4) e seus precursores (amido e glicerol).

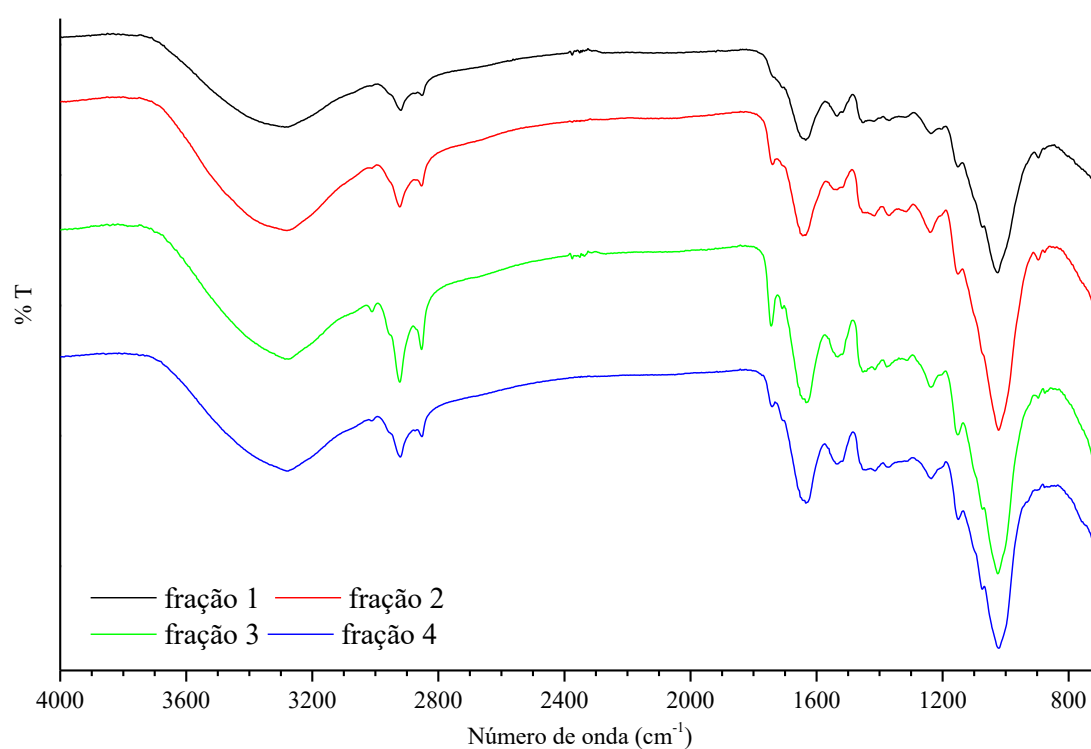


Figura 2S. Espectros de ATR-FTIR na faixa de 4000 a 700 cm^{-1} das diferentes amostras de bagaço de malte, a saber: fração 1, bagaço bruto; fração 2, amostra retida na malha da peneira de 35 mesh; fração 3, amostra retida entre as peneiras de 35 e 60 mesh; e fração 4, amostra que atravessou a malha da peneira de 35 mesh.

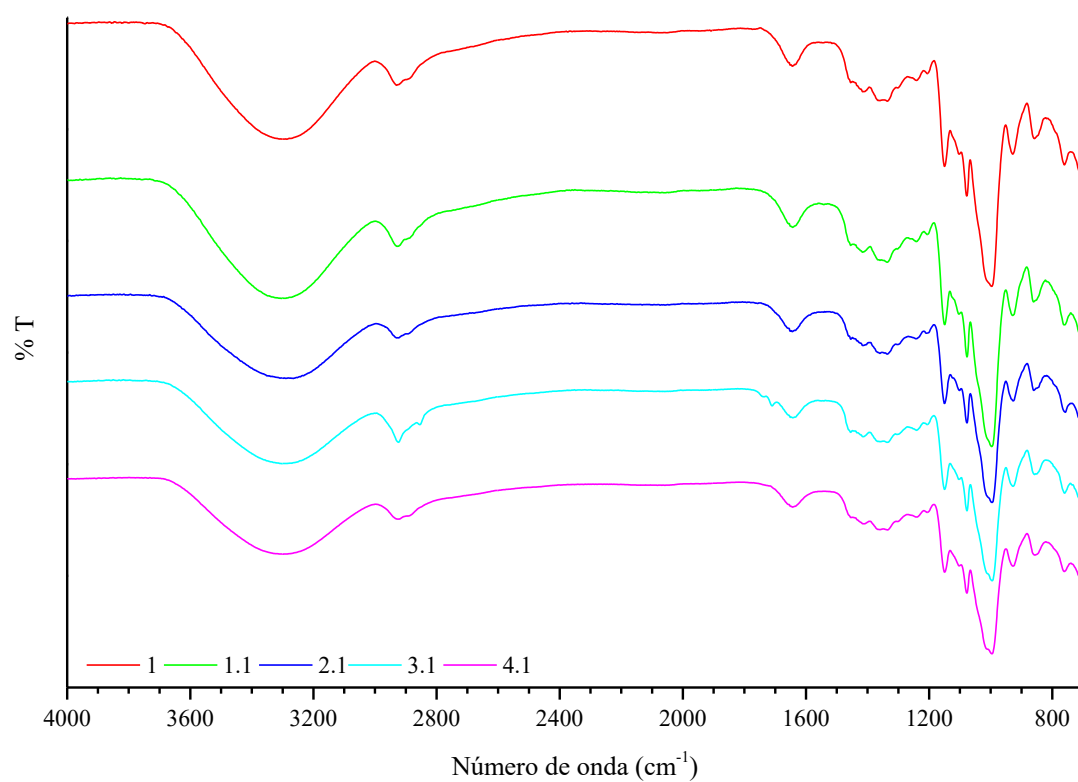


Figura 3S. Espectros de ATR-FTIR na faixa de 4000 a 700 cm^{-1} dos bioplásticos contendo 10% m/m de glicerol sem (1) e com diferentes amostras do bagaço de malte (1.1 a 4.1).

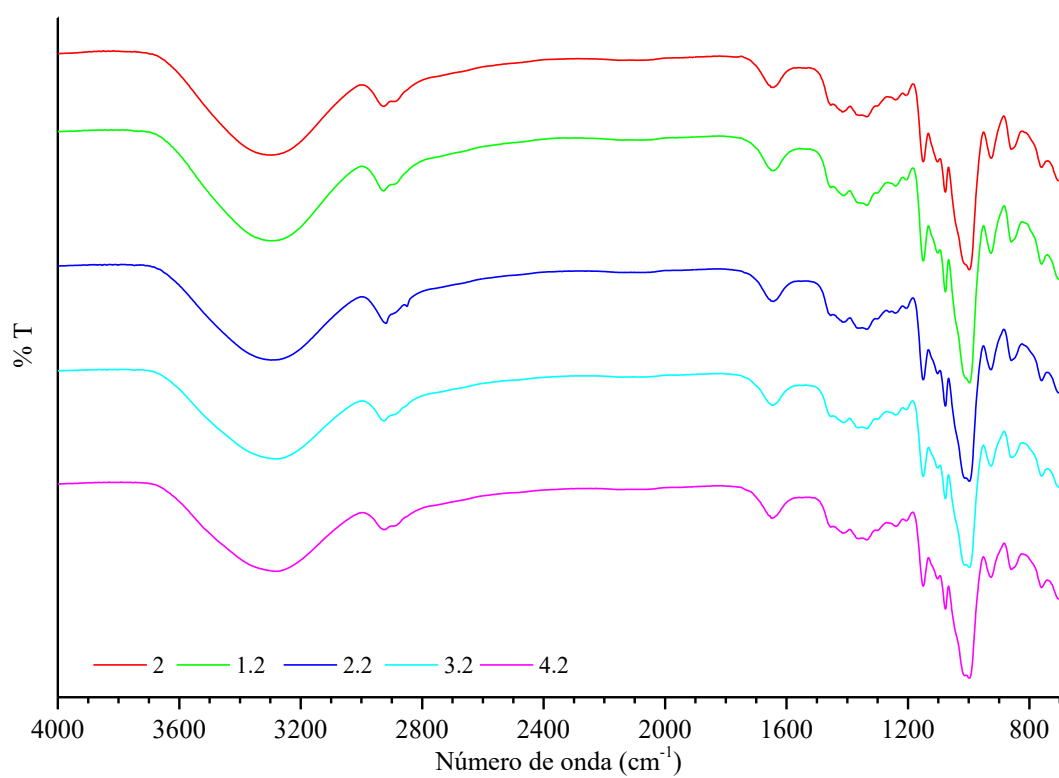


Figura 4S. Espectros de ATR-FTIR na faixa de 4000 a 700 cm^{-1} dos bioplásticos contendo 20% m/m de glicerol sem (2) e com diferentes frações de bagaço de malte (1.2 a 4.2).

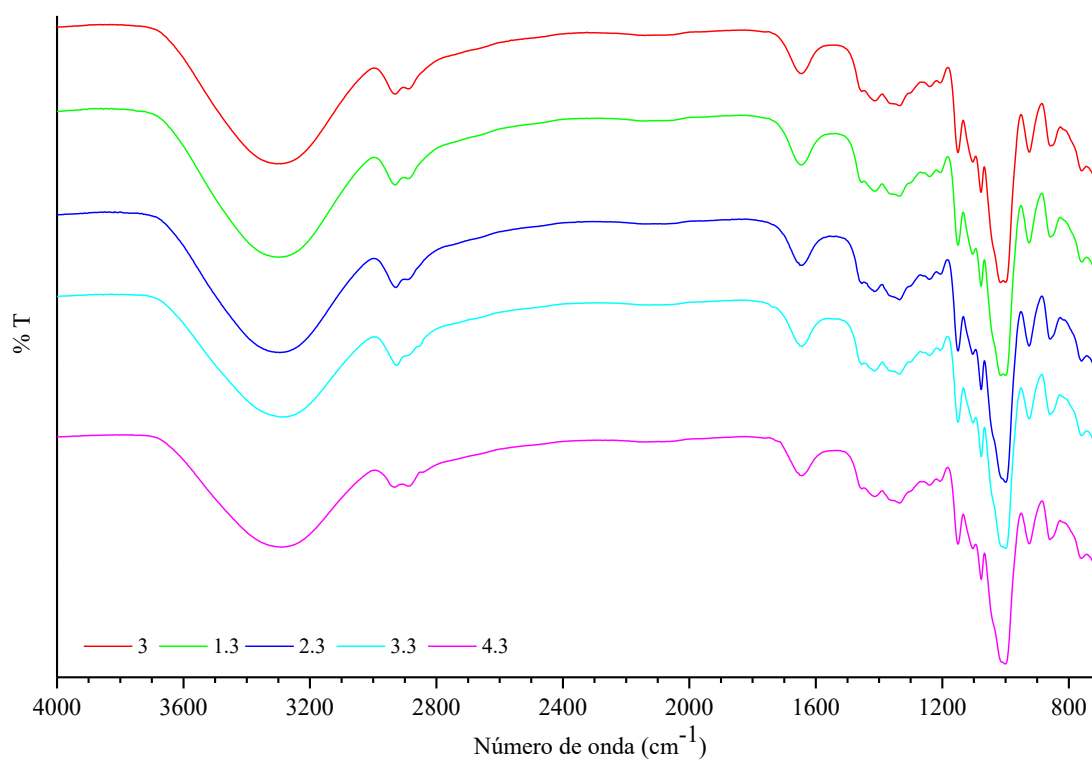


Figura 5S. Espectros de ATR-FTIR na faixa de 4000 a 700 cm^{-1} dos bioplásticos contendo 30% m/m de glicerol sem (3) e com diferentes frações de bagaço de malte (1.3 a 4.3).

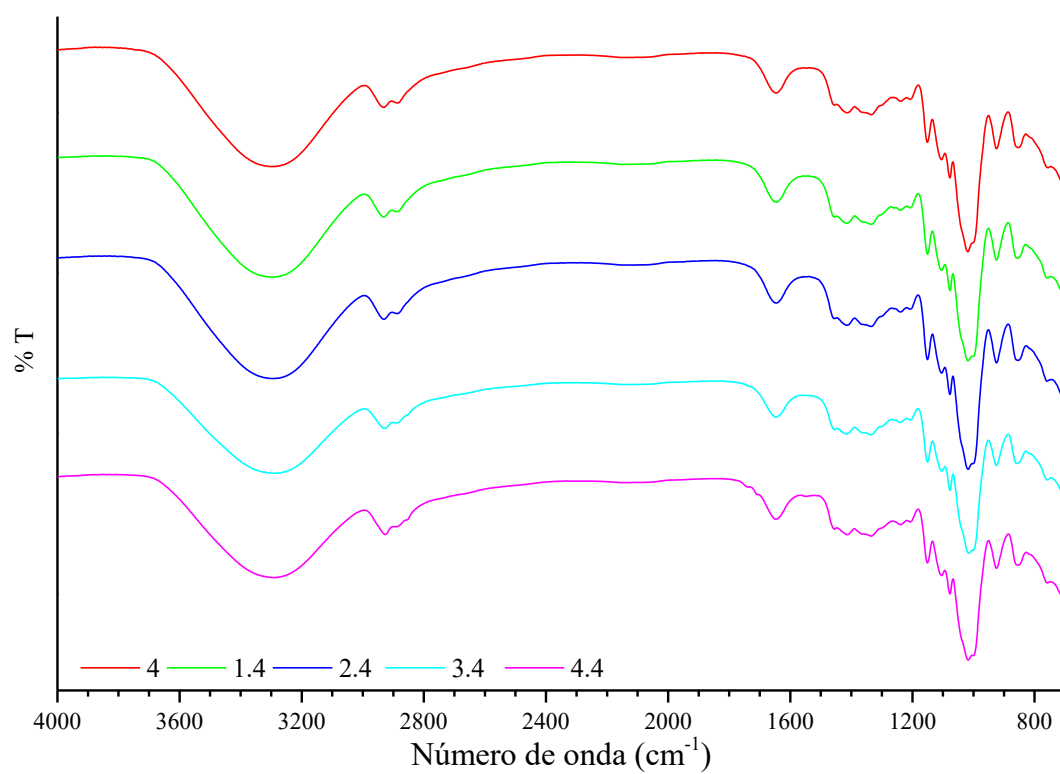


Figura 6S. Espectros de ATR-FTIR na faixa de 4000 a 700 cm^{-1} dos bioplásticos contendo 40% m/m de glicerol sem (3) e com diferentes frações de bagaço de malte (1.4 a 4.4).

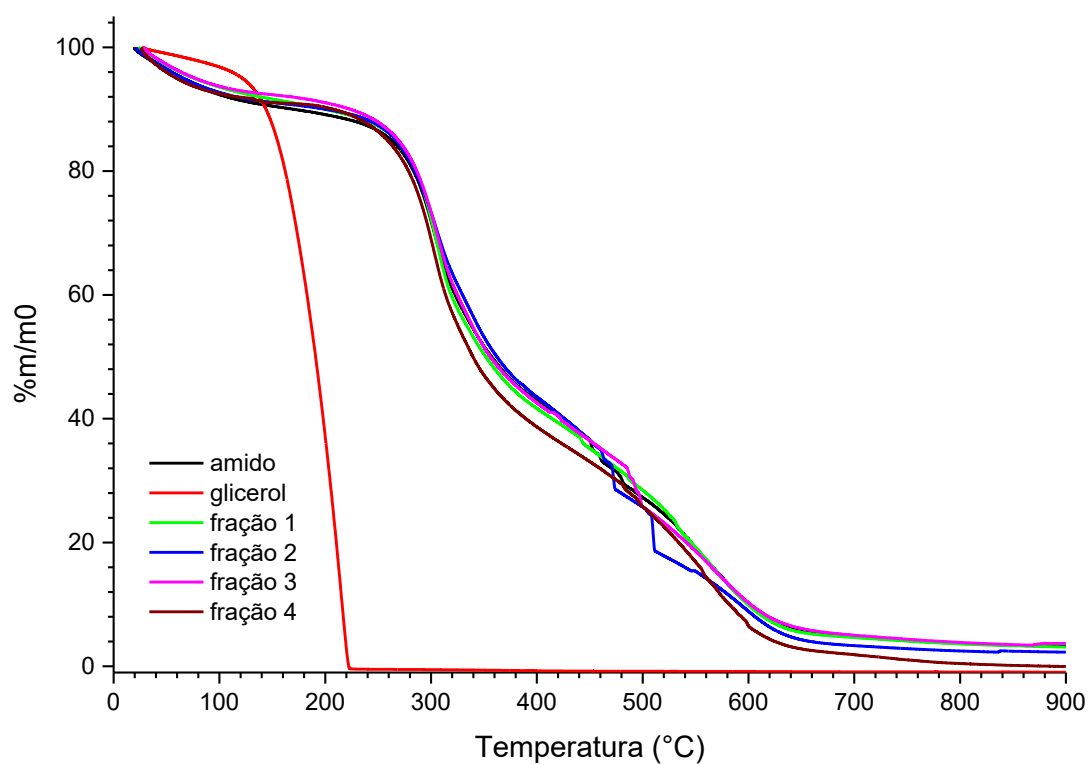


Figura 7S. Curvas TG do amido, glicerol e das diferentes amostras do bagaço de malte (frações 1 a 4).

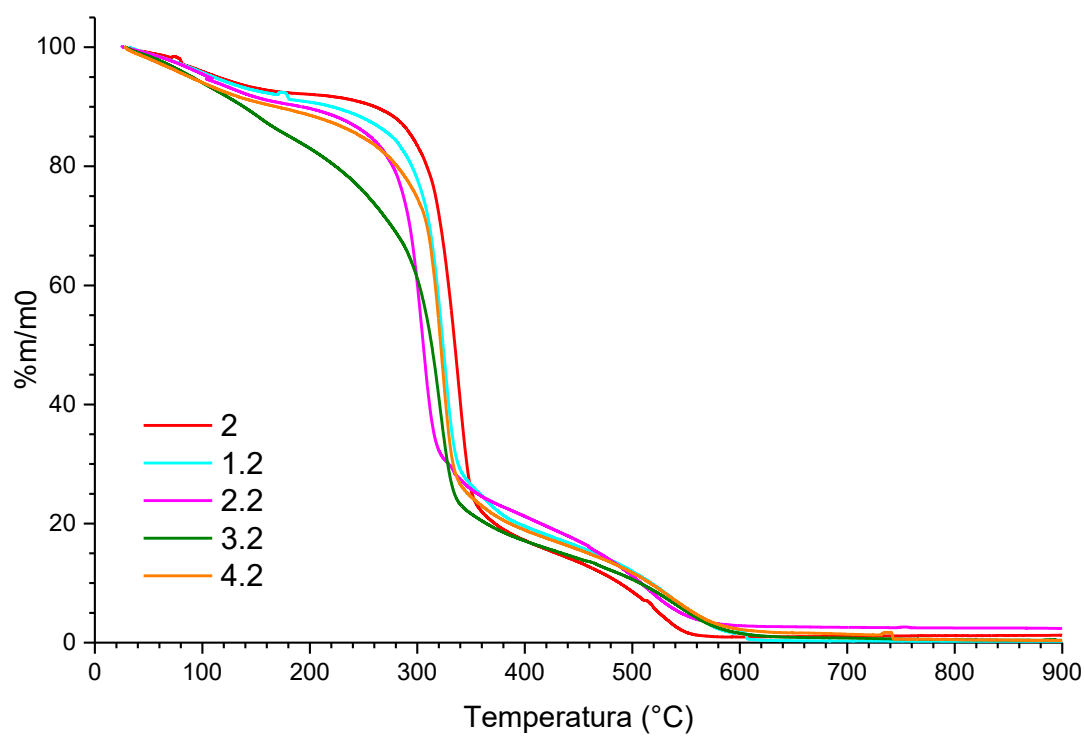


Figura 8S. Curvas TG dos bioplásticos a 20% de glicerol sem (2) e com diferentes amostras do bagaço de malte (1.2 a 4.2).

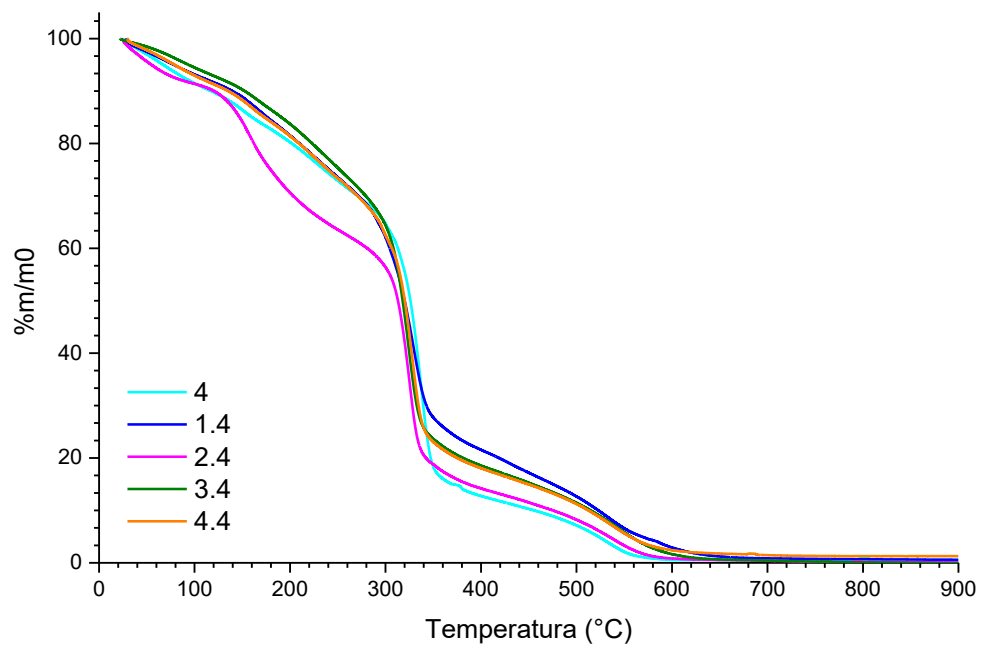


Figura 9S. Curvas TG dos bioplásticos a 40% de glicerol sem (4) e com diferentes amostras do bagaço de malte (1.4 a 4.4).

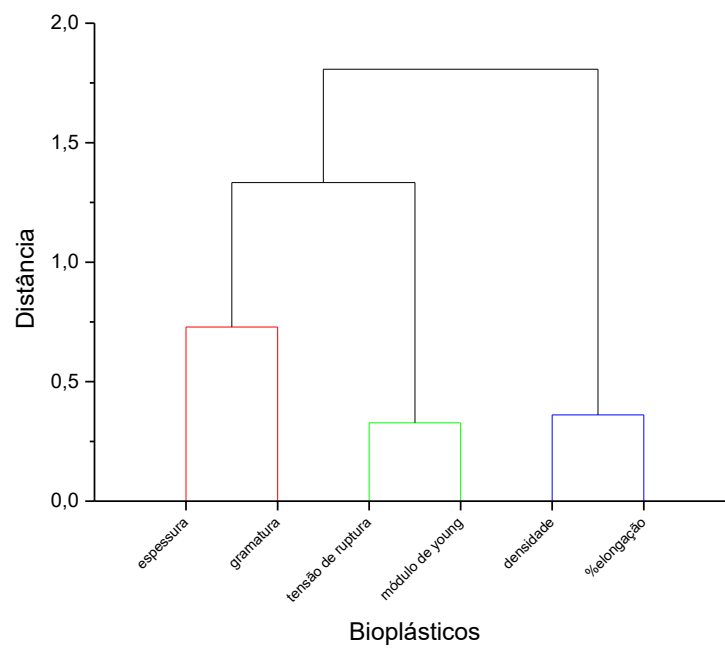


Figura 10S. Dendrograma com os agrupamentos das variáveis obtidos por AHC baseado nas distâncias entre as propriedades físicas e mecânicas desses materiais

Tabela 1S. Matriz de correlação entre as propriedades físicas e mecânicas obtidas para os bioplásticos obtidos variando o teor de glicerol de 10 a 40% m/m (1-4) e o tipo de fração do bagaço de malte (amostras 1 a 4, subdivididas em X.1 a X.4)

	espessura (mm)	gramatura	densidade	tensão de ruptura	módulo de young	% elongação
Espessura	1					
Gramatura	0,415	1				
Densidade	-0,867	0,166	1			
Tensão de ruptura	-0,305	-0,305	0,224	1		
Módulo de Young	0,016	-0,306	-0,196	0,672	1	
% Elongação	-0,400	0,331	0,671	-0,239	-0,663	1

3 CONCLUSÃO

Esta pesquisa evidenciou o potencial do bagaço de malte como matéria-prima alternativa para a produção de bioplásticos, destacando a relevância da variação da granulometria no controle das propriedades físicas e mecânicas dos filmes obtidos. Os resultados demonstraram que o ajuste das proporções e do processamento influencia diretamente a formação de matrizes mais homogêneas, o que pode repercutir em melhor desempenho mecânico e elasticidade.

Assim, o estudo reforça a importância da caracterização detalhada do material e do controle de variáveis de produção para o desenvolvimento de produtos inovadores, contribuindo para o aproveitamento sustentável de resíduos agroindustriais. Esses achados abrem perspectivas para o aprimoramento de formulações futuras e ampliação do uso de resíduos em soluções tecnológicas voltadas à redução de impactos ambientais.

REFERÊNCIAS

- ALLEGRETTI, C.; BELLINETTO, E.; D'ARRIGO, P.; GRIFFINI, G.; MARZORATI, S.; ROSSATO, L.A.M. *et al.* Towards a complete exploitation of brewers' spent grain from a circular economy perspective. **Fermentation**, v. 8, n. 4, p. 151, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/fermentation8040151>. Acesso em: 15 jun. 2025.
- AMIENYO, D.; AZAPAGIC, A. Life cycle environmental impacts and costs of beer production and consumption in the UK. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 21, p. 492–509, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1028-6>. Acesso em: 16 jun. 2025.
- ATIWESH, G.; MIKHAEL, A.; PARRISH, C. C.; BANOUB, J.; LE, T. T. Environmental impact of bioplastic use: A review. **Heliyon**, v. 7, n. 9, p. e07918, 2021. Disponível em: [10.1016/j.heliyon.2021.e07918](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07918). Acesso em: 1 jun. 2025.
- BALLESTEROS-MARTÍNEZ, L.; PÉREZ-CERVERA, C.; ANDRADE-PIZARRO, R. Effect of glycerol and sorbitol concentrations on mechanical, optical, and barrier properties of sweet-potato starch film. **NFS Journal**, v. 20, p. 1–9, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.nfs.2020.06.002>. Acesso em: 15 jun. 2025.
- CAPOSSIO, J. P.; FABANI, M. P.; REYES-URRUTIA, A.; TORRES-SCIANCELEPORE, R.; DENG, Y.; BAEYENS, J. *et al.* Sustainable solar drying of brewer's spent grains: a comparison with conventional electric convective drying. **Processes**, v. 10, n. 2, p. 339, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pr10020339>. Acesso em: 15 jun. 2025.
- JIN, Z.; LAN, Y.; OHM, J. B.; GILLESPIE, J. Physicochemical composition, fermentable sugars, free amino acids, phenolics, and minerals in brewers' spent grains obtained from craft brewing operations. **Journal of Cereal Science**, v. 104, n. 16, p. 103413, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2022.103413>. Acesso em: 1 jul. 2025.
- LAUER, M. K.; SMITH, R. C. Recent advances in starch-based films toward food packaging applications: Physicochemical, mechanical, and functional properties. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 19, n. 6, p. 3031–3083, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12627>. Acesso em: 1 jun. 2025.
- MAINARDIS, M.; BUTTAZZONI, M.; GOI, D. Up-Flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Technology for Energy Recovery: A review on state-of-the-art and recent technological advances. **Bioengineering**, v. 7, p. 43, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/bioengineering7020043>. Acesso em: 1 jun. 2025.
- MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; HINRICHSSEN, G. I. Biofibres, Biodegradable Polymers and Biocomposites: An Over-view. **Macromolecular Materials and Engineering**, v. 276, n. 1, p. 1–24, 2000. Disponível em:

[http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1439-2054\(20000301\)276:1<1::AID-MAME1>3.0.CO;2-W](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1439-2054(20000301)276:1<1::AID-MAME1>3.0.CO;2-W). Acesso em: 16 jun. 2025.

ŚWIECHOWSKI, K.; SYGUŁA, E.; RASAQ, W. A.; GASIŃSKI, A.; ŁYCZKO, J. Anaerobic digestion of brewer's spent grain with biochar – biogas production kinetics and process efficiency. **Detritus**, n. 16, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2023.17277>. Acesso em: 15 jun. 2025.

ANEXO A – COMPROVANTE DE SUBMISSÃO DO ARTIGO

Submission Confirmation		 Print
Thank you for your submission		
Submitted to	Química Nova	
Manuscript ID	QN-2025-0168	
Title	Estudo da dependência do teor de glicerol sobre propriedades mecânicas de bioplásticos contendo bagaço de malte em diferentes granulometrias como carga	
Authors	Pieri, Fabio da Silva, Jeferson Denadai, Ângelo Márcio Soares Silva, Thalisson	
Date Submitted	01-Jul-2025	