

INFLUÊNCIA DO TEOR DE GLICEROL NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE BIOPLÁSTICOS DE AMIDO CONTENDO BAGAÇO DE MALTE EM DIFERENTES GRANULOMETRIAS

Thalisson R. S. S. Silva^a, Jeferson G. da Silva^b, Ângelo M. L. Denadai^b e Fábio A. Pieri^{a,*}^aDepartamento de Ciências Básicas da Vida, Universidade Federal de Juiz de Fora, 35010-180 Governador Valadares – MG, Brasil^bDepartamento de Farmácia, Universidade Federal de Juiz de Fora, 35010-180 Governador Valadares – MG, Brasil

Recebido: 01/07/2025; aceito: 02/02/2026; publicado online: 23/02/2026

INFLUENCE OF GLYCEROL CONTENT ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF STARCH-BASED BIOPLASTICS CONTAINING BREWER 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% m/m) 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,^{22,23} o resíduo gerado após o processo cervejeiro pode chegar a 40 milhões de toneladas, 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.

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

Editora-Chefe responsável pelo artigo: Cassiana C. Montagner



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 h. O processo foi finalizado após confirmação de que o material atingiu massa constante depois do processo de secagem. O material seco foi dividido em duas frações: a amostra bruta (fração 1), correspondente a aproximadamente 30% do total (~ 90 g), e a fração restante (70%, 210 g), que foi moída em um micromoinho de discos (Star FT 48) e posteriormente separada granulometricamente utilizando peneiras de malha 35 e 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 com variação do teor de glicerol (Merck), adicionado em relação à quantidade de amido (Sigma-Aldrich), de 10 a 40% m/m (grupos controle 1-4), bem como do tipo de amostra de bagaço de malte utilizado (frações 1 a 4). Cada fração foi subdividida em X.1 a X.4, de acordo com o teor de glicerol empregado, mantendo-se constante o conteúdo total de bagaço de malte em 15% m/m na formulação do bioplástico (considerando a soma das massas de fração, amido e glicerol). Os dados de preparação de cada material estão apresentados 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 (amostra) / g
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, das 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 min 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 min de aquecimento, o material foi vertido em placas de Petri e levado à secagem por 72 h 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 400x. Para cada amostra foram obtidas cinco imagens sob iluminação padronizada com luz branca refletida. As imagens foram adquiridas por um sensor CCD (*charge-coupled device*, ou dispositivo de carga acoplada) com resolução de 5,0 MPx (megapixels) e tratadas com o programa ImageJ (versão 1.53, National Institutes of Health, Bethesda, MD, EUA, 2021).

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 PerkinElmer (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 Spectrum 10ES (versão 10.03.08.0133, PerkinElmer, Inc., Shelton, CT, EUA, 2017) foi utilizado para a aquisição dos espectros. Os dados foram exportados para edição no programa Microcal Origin (versão 9.0, OriginLab, Northampton, MA, EUA, 2012).

Análises termogravimétricas

As análises térmicas dos compostos foram realizadas usando equipamento Hitachi STA7200RV. As amostras dos bioplásticos (~ 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.

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 (mm) foi determinada experimentalmente, enquanto a gramatura (g cm⁻²) e densidade (g cm⁻³) foram calculadas usando as Equações 1 e 2:

$$\text{Gramatura} = \text{massa} / (\text{comprimento} \times \text{largura}) \quad (1)$$

$$\text{Densidade} = \text{massa} / (\text{comprimento} \times \text{largura} \times \text{espessura}) \quad (2)$$

As dimensões (comprimento, largura e espessura) foram medidas utilizando um paquímetro digital (Fowler) com resolução de 0,02 mm. As massas foram medidas utilizando uma balança analítica (Urano)

com precisão de 0,0001 g. Todas as medidas foram realizadas em, no mínimo, quadruplicatas para cada material. Os resultados das propriedades medidas e calculadas foram expressos como 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 (versão 6.0, GraphPad Software, San Diego, CA, EUA, 2012).

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 (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, e gráficos de tensão em função do alongamento (gap) foram construídos para cada filme, na ausência e na presença dos componentes inorgânicos, para fins comparativos.²⁵

Foram medidas as propriedades tensão de ruptura (T_r / MPa), percentual de alongamento na ruptura (ϵ_r / %) e módulo de Young (Y / MPa). Inicialmente todos os dados foram manipulados usando o programa TRIOS® (T.A. Instruments, Newcastle, DE, EUA, 2020) 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 (versão 15.0, Microsoft Corporation, WA, EUA, 2013). A AHC classifica objetos em diferentes grupos por meio da estimativa de similaridade das características que eles apresentam, 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, utilizando o cálculo de correlação para análise entre as variáveis e a distância euclidiana para análise entre os bioplásticos. Os dados foram tratados usando o Microcal Origin 9.0.

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.

Espectros da região do infravermelho

Alterações na posição ou intensidade das bandas de absorção em

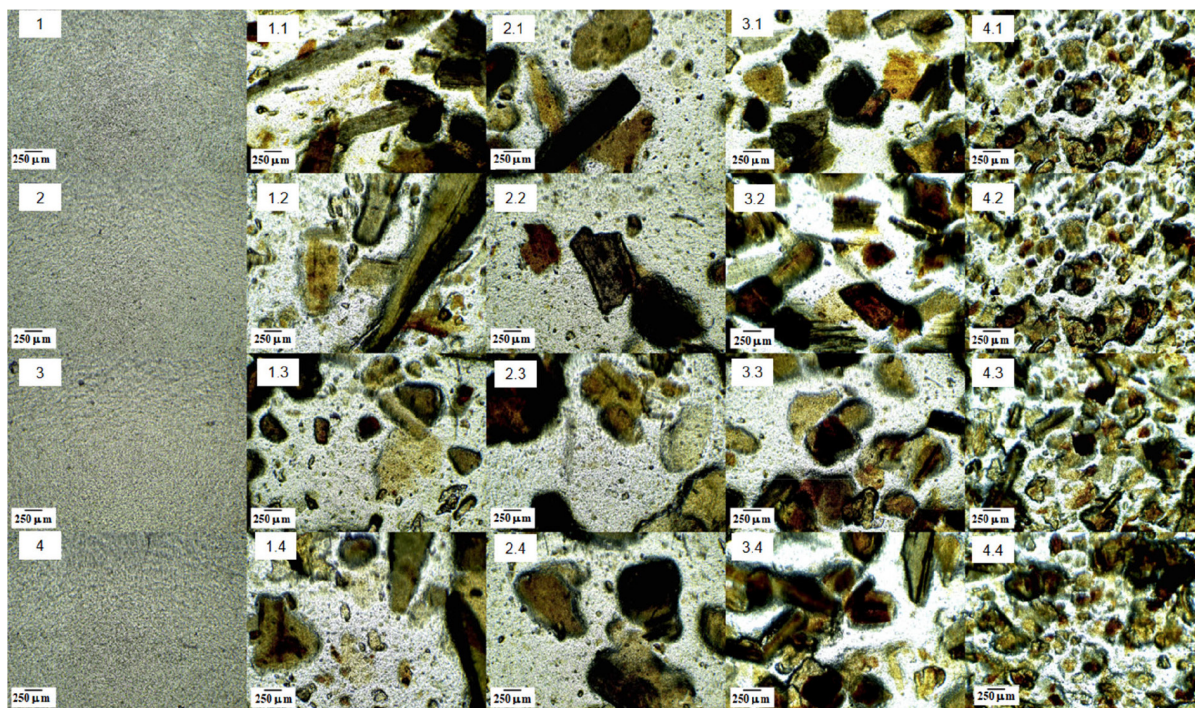


Figura 1. Imagens de microscopia óptica (aumento de 400 $\times$) dos bioplásticos obtidos variando o teor de glicerol de 10 a 40% m/m (1-4) e o tipo de amostra de bagaço de malte (frações 1 a 4, subdivididas em X.1 a X.4)

espectros 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-se o teor de glicerol de 10 a 40% m/m (Figura 1S); diferentes amostras de bagaço de malte, denominadas frações 1-4, retidas em diferentes malhas (Figura 2S); bioplásticos contendo 10% m/m de glicerol sem (1) e com diferentes amostras do bagaço de malte (1.1 a 4.1) (Figura 3S); bioplásticos contendo 20% m/m de glicerol sem (2) e com diferentes frações de bagaço de malte (1.2 a 4.2) (Figura 4S); bioplásticos contendo 30% m/m de glicerol sem (3) e com diferentes frações de bagaço de malte (1.3 a 4.3) (Figura 5S); e bioplásticos contendo 40% m/m de glicerol sem (4) e com diferentes frações de bagaço de malte (1.4 a 4.4) (Figura 6S). Devido ao fato de todos os materiais serem constituídos por polióis ou apresentarem esses compostos em sua composição, os espectros de infravermelho mostraram-se bastante 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 C–H na região de 2950 a 2850 cm^{-1} ; deformação de grupo OH em torno de 1620 cm^{-1} ; e estiramentos da ligação C–O e do grupo C–O–C na região de 1200 a 950 cm^{-1} .²⁹ Na Tabela 2 estão listadas as principais bandas observadas para os materiais.

Na Figura 2S, a absorção em torno de 1855 cm^{-1} pode ser atribuída aos estiramentos da ligação C–H de grupos alifáticos, como metila. A banda em torno de 1742 cm^{-1} está associada ao estiramento da ligação C=O, enquanto a banda em torno de 1550 cm^{-1} é atribuída aos 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 C–O–H e C–O–C 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 (Figuras 2S e 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 (presente no Material Suplementar) estão apresentadas as curvas termogravimétricas (TG) do amido, glicerol e frações 1-4 de bagaço de malte. Na Figura 3a estão apresentadas 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,

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

	ν (OH)	ν (CH)	δ (OH)	ν (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

FTIR: espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier.

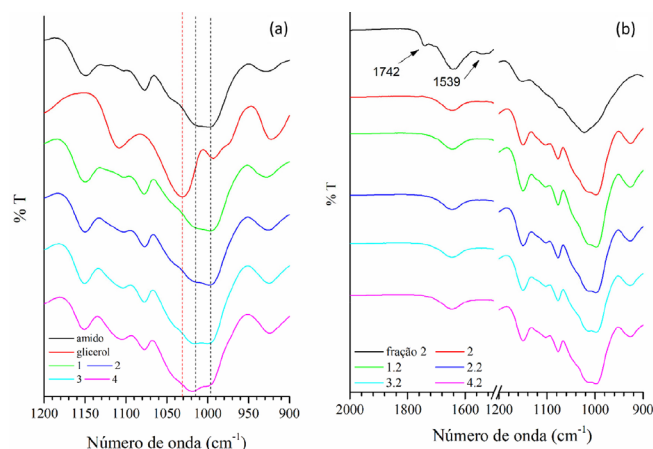


Figura 2. Destaque dos espectros de ATR-FTIR do amido, glicerol, e dos bioplásticos obtidos com teores de glicerol variando de 10 a 40% m/m (1-4) (a), e dos bioplásticos contendo 20% de glicerol com diferentes granulometrias do bagaço de malte como carga (1.2 a 4.2) (b)

contendo 20 e 40% de glicerol com as frações 1-4 de bagaço de malte estão demonstrados no Material Suplementar (Figuras 8S e 9S).

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 no glicerol. Esse comportamento é similar ao observado por Castelló *et al.*,³⁰ sendo a pequena perda de massa observada a partir de 30 °C atribuída à perda de água existente na amostra.

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 para as frações de bagaço, conforme mostrado nas Figuras 3a, 3b, 8S e 9S. Contudo, a primeira etapa de 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 temperaturas próximas de 190 °C.³² Quanto às demais etapas de decomposição, atribuem-se os mesmos fenômenos observados para as amostras puras de amido e de 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 teores superiores a 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. Trabalhos³⁶ envolvendo casca e palha de arroz também reportam espessuras de 0,030-0,045 mm, valores muito semelhantes aos observados neste estudo.

Entre os bioplásticos sem bagaço (1-4, com teor de glicerol variando de 10 a 40%), não foram observadas quaisquer alterações significativas nos valores de espessura. Entretanto, ao comparar as amostras contendo bagaço de malte com seus correspondentes controles (1-4), observa-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

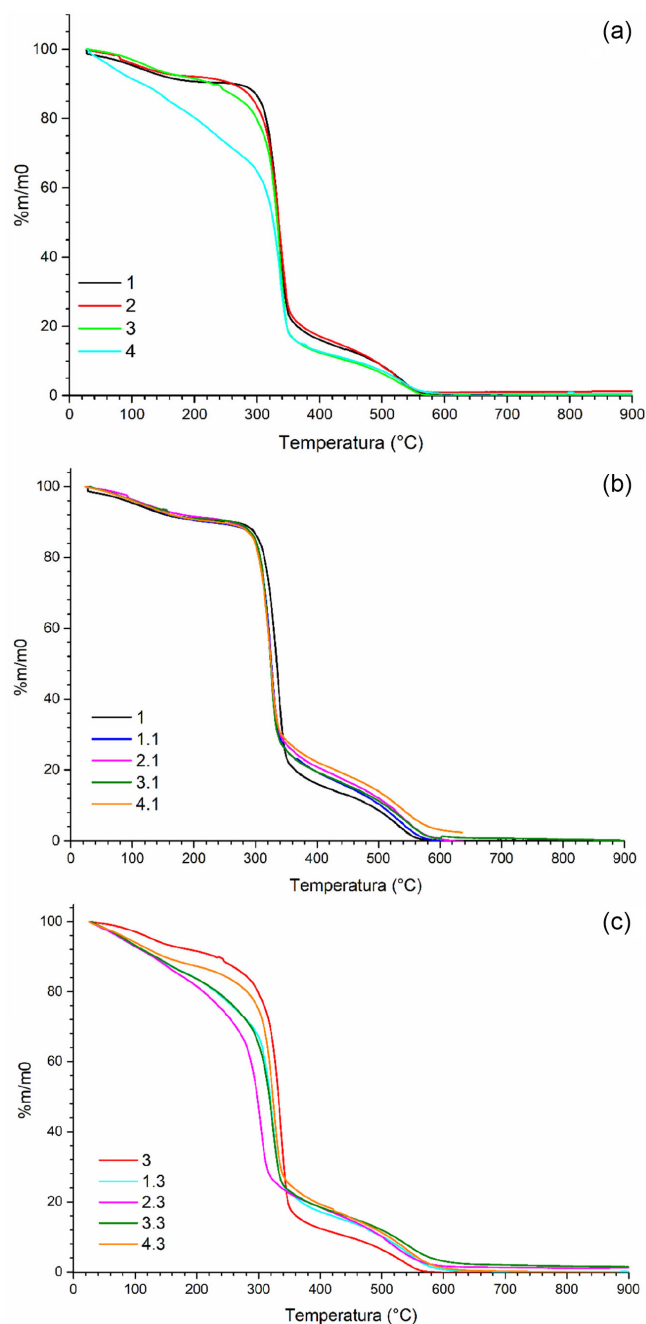


Figura 3. Curvas TG dos bioplásticos com teores de glicerol variando de 10 a 40% m/m (frações 1-4) (a), dos bioplásticos a 10% de glicerol com diferentes frações de bagaço de malte (b), e dos bioplásticos a 30% de glicerol com diferentes frações de bagaço de malte (c)

podem explicar o aumento da espessura dessas amostras, devido à dificuldade de empacotamento estrutural durante a secagem.

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

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 ^c	0,032 ± 0,002	0,79 ± 0,11 ^c
3.2	0,33 ± 0,03 ^a	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 ^b	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 ^c	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 ± desvio padrão (n = 4). Teste de Tukey: ^ap < 0,05 em relação ao bioplástico correspondente sem o bagaço de malte; ^bp < 0,001 em relação ao bioplástico correspondente sem o bagaço de malte; ^cp < 0,0001 em relação ao bioplástico correspondente sem o bagaço de malte.

a sua eficiência como agente aglutinante. Contudo, com a adição do bagaço, na maioria dos casos, foi observada 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.

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 (T_r / MPa), percentual de alongamento na ruptura (ϵ_r / %) 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 T_r entre as amostras com 10 e 20% de glicerol (1 e 2), a adição de glicerol apresenta uma tendência de reduzir os valores de T_r , das amostras 2-4. Isso demonstra que o glicerol tem um efeito significativo sobre a resistência mecânica do material, tornando-o menos resistente, uma vez que reduz as interações amido-amido.

Na presença de bagaço de malte, com exceção das 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 T_r , 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 (ϵ_r / %). 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 ϵ_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 ϵ_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

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

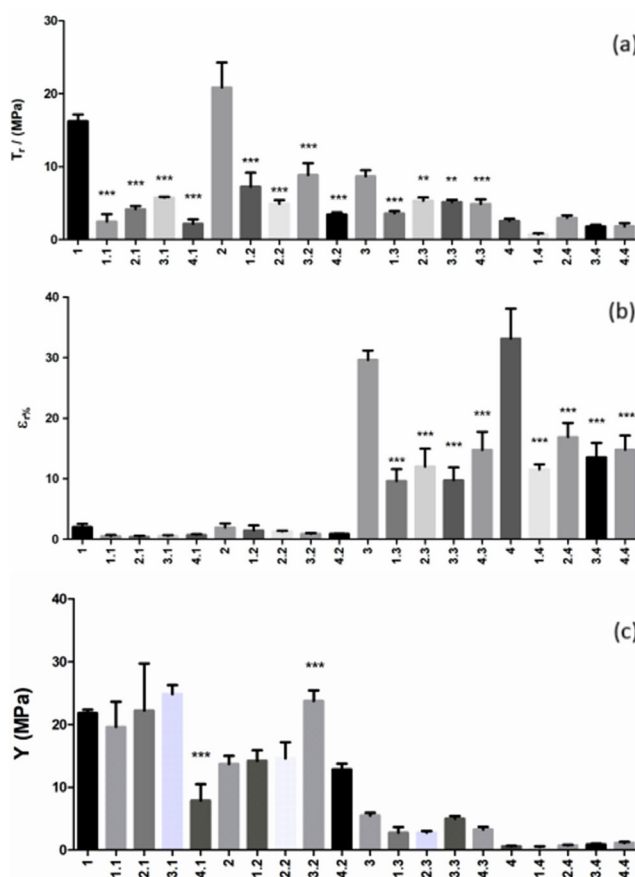


Figura 4. Comparação entre as tensões de ruptura (T_r) (a), percentual de alongamento na ruptura (ϵ_r) (b), e módulo de Young (Y) (c) dos bioplásticos obtidos com teores de glicerol variando de 10 a 40% m/m (1-4) e o tipo de fração do bagaço de malte (frações 1 a 4, subdivididas em X.1 a X.4). Teste 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

bioplásticos com teor de glicerol de 30 e 40%. Essa maior rigidez para os grupos de amostras contendo 10 e 20% de glicerol foi atribuída à baixa concentração de glicerol no meio, não sendo efetivo em se criar efeito plastificante nestas concentrações, coincidindo com os dados de ϵ_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, Material Suplementar) foi possível observar uma correlação negativa entre a densidade e espessura dos materiais ($r = -0,876$), bem como entre o módulo de Young e percentual de alongação ($r = -0,663$). Além disso, foram identificadas correlações positivas entre o percentual de alongamento na ruptura e a tensão de ruptura ($r = 0,672$), assim como entre o % de alongação e a densidade dos bioplásticos ($r = 0,671$). Embora fosse esperada uma correspondência entre os pares de propriedades – densidade e espessura, módulo de Young e percentual de alongamento na ruptura, bem como tensão de ruptura e percentual de alongamento na ruptura – observou-se que tais correlações foram significativamente enfraquecidas, com valores do coeficiente de correlação de Pearson (r) bem distantes de 1 em módulo. O interessante foi o aparecimento da correlação entre a densidade e % de alongação, que demonstra que quanto mais denso for 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, Material Suplementar). 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 baixo percentual de alongamento na ruptura, resultando em materiais mais rígidos entre as amostras do controle. Enquanto 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 composto pelas amostras 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 3.1, 3.2, 4.1 e 4.2, cujas propriedades se diferenciaram daquelas observadas no grupo formado pelas amostras 1 e 2, embora ainda permanecessem mais semelhantes a esses materiais.

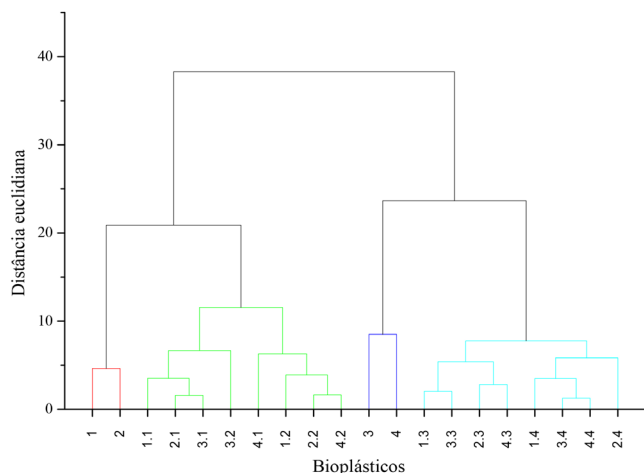


Figura 5. Dendrograma dos agrupamentos dos bioplásticos obtidos na AHC baseada na avaliação das distâncias euclidianas entre as propriedades físicas e mecânicas desses materiais

O último grupo foi constituído pelas amostras 1.3, 1.4, 2.3, 2.4, 3.3, 3.4, 4.3 e 4.4, que apresentaram características mais próximas às do grupo formado pelas amostras 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.

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 deste estudo, foi possível caracterizar dois comportamentos distintos dos materiais em função do teor de glicerol: para teores $\leq 20\%$, os materiais apresentaram maior rigidez, enquanto para teores $\geq 30\%$, mostraram-se mais flexíveis.

Os resultados demonstram o potencial para utilização de resíduos para produção de bioplásticos, bem como o potencial da modulação de suas propriedades mecânicas, abrindo caminho para futuras aplicações desses materiais na confecção de produtos industriais. Além disso, considerando a composição dos filmes e os testes realizados, há potencial para uso na indústria alimentícia. Contudo, é necessária a realização de novos experimentos para avaliar a capacidade desses materiais de absorver umidade. 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.

MATERIAL SUPLEMENTAR

O material suplementar desse trabalho está disponível em <http://quimicanova.sbq.org.br/>, na forma de arquivo PDF, com acesso livre.

DECLARAÇÃO DE DISPONIBILIDADE DE DADOS

Todos os dados estão disponíveis no texto.

AGRADECIMENTOS

Este estudo contou com o apoio da FAPEMIG (APQ-02506-22, APQ-02762-25). Os autores agradecem ao CNPq (302574/2025-5), à CAPES e à UFJF-GV, com agradecimento especial à cervejaria Hausmalte pela doação do bagaço de malte.

CONTRIBUIÇÕES DO AUTOR

T.R.S.S.: conceituação, investigação, curadoria e análise formal de dados, redação (rascunho original); J.G.S.: conceituação, metodologia, análise formal de dados e redação (edição e revisão); A.M.L.D.: conceituação, metodologia, análise formal e redação (edição e revisão); F.A.P.: conceituação, administração de projeto, supervisão, redação (edição e revisão).

REFERÊNCIAS

- Eriksen, M. K.; Pivnenko, K.; Faraca, G.; Boldrin, A.; Astrup, T. F.; *Environ. Sci. Technol.* **2020**, *54*, 16166. [Crossref]
- Lambert, S.; Wagner, M.; *Chem. Soc. Rev.* **2017**, *46*, 6855. [Crossref]
- Bishop, G.; Styles, D.; Lens, P. N. L.; *Resour., Conserv. Recycl.* **2021**, *168*, 105451. [Crossref]
- Ei, L. H. I.; *Bioplásticos: Biodegradáveis & Biobased - Definições, Fontes e Aplicações*, 1ª ed.; Editora da Unicamp: Campinas, 2016.
- Silva, S.; Sena, M.; Ghesti, G. F.; *Rev. Virtual Quim.* **2024**, *16*, 6. [Crossref]

6. Iles, A.; Martin, A. N.; *J. Cleaner Prod.* **2013**, *45*, 38. [Crossref]
7. Chanatasig, J. A. C.: *Caracterización de Bioplástico de Almidón Elaborado por el Método de Casting Reforzado con Albedo de Maracuyá (Passiflora edulis spp.)*; Trabalho de Conclusão de Curso, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras, 2015. [Link] acessado em fevereiro 2026
8. Silva, M. L. T.; Brinques, G. B.; Gurak, P. D.; *Braz. J. Food Technol.* **2020**, *23*, e2018326. [Crossref]
9. Begnini, M. L.; Santos, N. R.; Toledo, A. L. O.; Oliveira, G. N. R.; Silva, L. T. G.; Oliveira, T. T.; *Brazilian Journal of Development* **2019**, *5*, 28405. [Crossref]
10. Mussatto, S. I.; Roberto, I. C.; *J. Chem. Technol. Biotechnol.* **2006**, *81*, 268. [Crossref]
11. Moreira, C.; Schneider, B. S.; Kunst, S.; Morisso, F. D. P.; *Research, Society and Development* **2022**, *11*, e451111335676. [Crossref]
12. Debiagi, F.; Mali, S.; Grossmann, M. V. E.; Yamashita, F.; *Cienc. Agrotecnol.* **2010**, *34*, 1522. [Crossref]
13. Leite, B. Z.; Pawlowsky, U.; *Eng. Sanit. Ambiental* **2005**, *10*, 96. [Crossref]
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. [Crossref]
16. Cimpan, C.; Iacovidou, E.; Rigamonti, L.; Velzen, E. U. T.; *Waste Manage.* **2023**, *166*, 115. [Crossref]
17. Herrmann, G.; Souza, C. F. V.; *Braz. J. Food Technol.* **2021**, *24*, e2020217. [Crossref]
18. Aliyu, S.; Bala, M.; *Afr. J. Biotechnol.* **2011**, *10*, 324. [Crossref]
19. Correia, L. F.; Barros, J. M. H. F.; Fernandes, A. M.; Clericuzi, G. Z.; Souza, K. S. M. G.; *Research, Society and Development* **2020**, *9*, e730997781. [Crossref]
20. Massardi, M. M.; Massini, R. M. M.; Silva, D. J.; *Journal of Engineering and Exact Sciences* **2020**, *6*, 83. [Crossref]
21. Lounis, F. M.; Benhacine, F.; Hadj-Hamou, A. S.; *Int. J. Biol. Macromol.* **2024**, *224*, 137823. [Crossref]
22. Schmidt, A. R.; Dresch, A. P.; Alves Junior, S. L.; Bender, J. P.; Treichel, H.; *Catalysts* **2023**, *13*, 755. [Crossref]
23. Jantason, N.; Suphantharika, M.; Wipatanawin, A.; Chansong, S.; Payongsri, P.; *Foods* **2024**, *13*, 440. [Crossref]
24. Arantes, G. C. A.; Silva, S. C.; Dutra, R. C.; Drummond, A. L.; Ghesti, G. F.; *Quim. Nova* **2024**, *47*, e-20240023. [Crossref]
25. Pelissari, F. M.; Andrade-Mahecha, M. M.; Sobral, P. J. A.; Menegalli, F. C.; *Food Hydrocolloids* **2013**, *30*, 681. [Crossref]
26. Sanyang, M. L.; Sapuan, S. M.; Islam, M. S.; Jawaid, M.; Jahan, S. A.; *Polymers* **2015**, *7*, 1106. [Crossref]
27. Van Soest, J. J. G.; Tournois, H.; De Wit, D.; Vliegthart, J. F. G.; *Carbohydr. Res.* **1995**, *279*, 201. [Crossref]
28. Zavareze, E. D. R.; Dias, A. R. G.; *Carbohydr. Polym.* **2011**, *83*, 317. [Crossref]
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. [Crossref]
30. Castelló, M. L.; Dweck, J.; Aranda, D. A. G.; *J. Therm. Anal. Calorim.* **2009**, *97*, 627. [Crossref]
31. Schlemmer, D.; Sales, M. J. A.; Resck, I. S.; *Polim.: Cienc. Tecnol.* **2010**, *20*, 6. [Crossref]
32. Alarcon, R. T.; Gaglieri, C.; Bannach, G.; *J. Therm. Anal. Calorim.* **2018**, *132*, 1579. [Crossref]
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. [Crossref]
34. Silva, A. A. S.; Bousada, G. M.; Mazzini, L. F. M.; Guezguan, S. M.; de Freitas, C. P. M.; Monteiro, K. A.; Renato, N. S.; Moreira, R. P. L.; *J. Anal. Appl. Pyrolysis* **2024**, *183*, 106707. [Crossref]
35. Sobral, P. J. A.; *Pesqui. Agropecu. Bras.* **2000**, *35*, 1251. [Crossref]
36. Pormsila, W.; Udomphoch, P.; *Processes* **2025**, *13*, 1387. [Crossref]
37. Wang, L.; Kan, J.; Tang, L.; Abidin, S. Z.; *LWT--Food Sci. Technol.* **2025**, *218*, 117427. [Crossref]
38. Santhosh, R.; Ahmed, J.; Thakur, R.; Sarkar, P.; *Sustainable Food Technol.* **2024**, *2*, 307. [Crossref]
39. Hamid, E. M. A.; 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. [Crossref]