Resumo nº 40

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA, MECÂNICA E MICROESTRUTURAL DE BIONANOCOMPÓSITOS POLIMÉRICOS DE MATRIZ DA PROTEÍNA DE SORO DE LEITE.

Marília Marschall Sedosvki[1], Maryelen Alijar Souza[2], Marlene Bampi[3], Marcia Bär Schuster[4]

1 Bolsista IC/UDESC/CEO

2 Estudante UDESC/CEO

3. Professora UDESC/Oeste

4 Professora Coordenadora do projeto UDESC/CEO

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a crescente preocupação com o acúmulo de resíduos plásticos tem impulsionado a busca por materiais biodegradáveis provenientes de fontes renováveis. Em 2024, o Brasil gerou 4,82 milhões de toneladas de plásticos pós-consumo, dos quais apenas 21% foram reciclados mecanicamente (ABIPLAST, 2025), evidenciando a necessidade de alternativas aos polímeros convencionais. Nesse contexto, o amido destaca-se por sua ampla disponibilidade, baixo custo e biodegradabilidade, embora apresente limitações relacionadas à resistência mecânica, à estabilidade estrutural e à sensibilidade à umidade (Wu et al., 2019; Kumar et al., 2025). A proteína do soro do leite (PSL), por sua vez, apresenta capacidade de formação de filmes e possibilita a valorização de um subproduto agroindustrial cuja geração mundial deverá ultrapassar 200 milhões de toneladas até 2030 (Kandasamy et al., 2021; Buchanan et al., 2023). Dessa forma, este trabalho desenvolveu filmes biodegradáveis à base de amido de mandioca com diferentes teores de proteína de soro de leite, visando reduzir os impactos ambientais, sendo avaliadas as propriedades mecânicas e térmicas.

DESENVOLVIMENTO

Os biopolímeros foram elaborados contendo 5 %(m/m) de amido (Yoki, Brasil) em relação a água, com variações de 0, 10, 25 e 50 %(m/m) de PSL (Aurora Coop, Brasil) em relação ao amido, e 20 %(m/m) de glicerol pureza PA (Biotec®, Brasil) em relação a massa seca (amido + PSL), e processados pela técnica de *casting*, conforme Carvalho et al. (2020) com algumas modificações. Inicialmente, 50 mL de água destilada foram misturados com PSL e amido, e outros 50 mL de água com o glicerol, mantidos sob agitação por 30 min a ~ 23 °C. Em seguida, as duas soluções foram misturadas e agitadas por 10 min, seguido por ajuste de pH para 8,0 com NaOH 1N e sonicação (UP200Ht, Hielscher, Alemanha) por 10 min. Na sequência, os sistemas foram mantidos a 90 °C durante 30 min sob agitação em banho metabólico Dubnoff (LUCA-157/28, Lucadema, Brasil), depois vertidas em placas de Petri de poliestireno (2,36 mg/mm²), secas em estufa a 40 °C por 24 h.
As propriedades mecânicas dos biopolímeros foram determinadas por ensaio de tração em texturômetro (TAX.XT, Stable Micro Systems, Reino Unido), com velocidade de ensaio de 50 mm/min, sendo avaliados dez corpos de prova de 10 mm x 50 mm de cada sistema, os quais foram acondicionados em ambiente com umidade relativa de 55 (±5%) ºC por 48 h prévias ao ensaio, visando à estabilização das amostras (ASTM, 2018). Após o ensaio, uma amostra de cada composição foi fotografada com uma câmera de 200 MP de um smartphone, para comparação visual da fratura.
A análise termogravimétrica (TGA) foi realizada em equipamento STA 449C (Netzsch, Alemanha) com ~10 mg de 25 ºC a 600 ºC a uma taxa de aquecimento de 10 ºC/min e em atmosfera de nitrogênio (40 mL/min) para evitar reações termo-oxidativas. Foram avaliadas a temperatura referente a 5% de

degradação e a temperatura onde ocorreu a taxa máxima de degradação das composições, sendo que esta foi verificada através da derivada (DTG) da curva do inicial.

RESULTADOS

A incorporação da proteína do soro do leite alterou significativamente as propriedades mecânicas dos filmes. A formulação de amido puro (A-P) apresentou elevada fragilidade e dificuldade para formar um filme nas condições de processamento empregadas neste trabalho. Esse comportamento foi confirmado no ensaio de tração, no qual A-P apresentou a maior tensão máxima, porém rompeu com pouca deformação em comparação aos outros sistemas, conforme pode ser verificado no diagrama tensão-deformação ilustrado na Figura 1A. Além disso, pelas imagens dos corpos de prova após o ensaio (inserto na Figura 1A), pode ser verificado que a amostra da matriz pura ficou fragmentada em vários pedaços, corroborando a alta fragilidade do material. A fragilidade é frequentemente observada em filmes de amido e pode estar relacionada à retrogradação da matriz e à baixa mobilidade das cadeias poliméricas (Yang *et al*., 2024).

A adição de PSL favoreceu a formação de filmes estáveis e aumentou sua capacidade de deformação, embora tenha reduzido a resistência mecânica. Assim, conforme a Figura 1B, com a adição de soro de leite, a tensão máxima diminuiu 81%, 90% e 88 % para A-PSL10, A-PSL25 e A-PSL50, respectivamente, em relação a matriz de amido pura (A-P). Por outro lado, em comparação à deformação de A-P, os valores aumentaram 403 % para A-PSL10, 843 % para A-PSL25 e 333 % para A-PSL50. Esse comportamento indica que a proteína pode ter reduzido a coesão entre as cadeias de amido e aumentado a mobilidade da matriz, originando filmes menos resistentes, mas mais deformáveis (Rosseto *et al*., 2025). Entretanto, a menor deformação de A-PSL50 em relação à A-PSL25 indica que concentrações superiores a 25 %(m/m) de proteína não promoveram ganho adicional de flexibilidade, possivelmente devido à restrição da mobilidade das cadeias provocada pela maior concentração proteica (Azevedo et al., 2017).

Devido à elevada fragilidade, à baixa deformação e à dificuldade de formação de um filme estável, não foram realizadas caracterizações posteriores no sistema A-P. A flexibilidade é essencial para evitar a ruptura dos filmes durante o manuseio (Chiumarelli; Hubinger, 2014). Assim, a análise termogravimétrica foi realizada somente com as formulações contendo PSL, nas quais foram observados dois estágios principais de perda de massa, conforme ilustrado na Figura 2. O primeiro estágio ocorreu aproximadamente entre 80 e 200 °C e pode ser atribuído à perda de umidade remanescente presente nos filmes e ao início da degradação do glicerol. A segunda etapa pode ser observada entre 200 e 340 °C e corresponde à principal degradação térmica dos filmes, envolvendo a continuidade da decomposição do glicerol e a degradação das cadeias de amido e das estruturas proteicas (Ayala *et al*., 2012; Rosseto *et al*., 2025).

Conforme as curvas de TGA apresentadas na Figura 2, pode ser visualizado que com o aumento da proporção de PSL no amido ocorreu a antecipação do início da perda de massa. A temperatura correspondente a 5 % de degradação foi de 205±2 °C para A-PSL10, 152±2 °C para A-PSL25 e 134±2 °C para A-PSL50, indicando maior estabilidade térmica inicial para a formulação com menor teor de proteína. Além disso, através do pico das curvas DTG foi verificada a temperatura referente a taxa máxima de perda de massa dos sistemas, sendo 305±2 °C para A-PSL10 e de 295±2 e 297±2 °C para A-PSL25 e A-PSL50, respectivamente. Assim, pode ser verificado que a adição de uma menor quantidade de soro de leite (10 %(m/m)) retornou um sistema mais estável termicamente em comparação aos filmes que continham maior quantidade desse componente.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Todos os filmes contendo proteína de soro de leite apresentaram maior capacidade de deformação e menor resistência mecânica em comparação ao filme de amido puro. Além disso, maiores quantidade

de soro na composição dos filmes (25 e 50 %m/m) prejudicou a estabilidade térmica dos filmes. Desta forma, dentre as formulações avaliadas, o sistema com menor quantidade de soro (10 %m/m) apresentou o melhor equilíbrio entre resistência mecânica, deformação e estabilidade térmica, demonstrando maior potencial para o desenvolvimento de filmes biodegradáveis.

Palavras-chave: biopolímero; tração; termogravimetria; sustentabilidade.

ANEXOS

Figura 1. *A) Curvas de tensão versus deformação dos filmes poliméricos. B) Tensão máxima e deformação máxima dos filmes avaliados: A-P (amido puro); A-PSL10 (amido + 10 %m/m do soro de leite); A-PSL25 (amido + 25 %m/m do soro de leite); A-PSL50 (amido + 50 %m/m do soro de leite).*

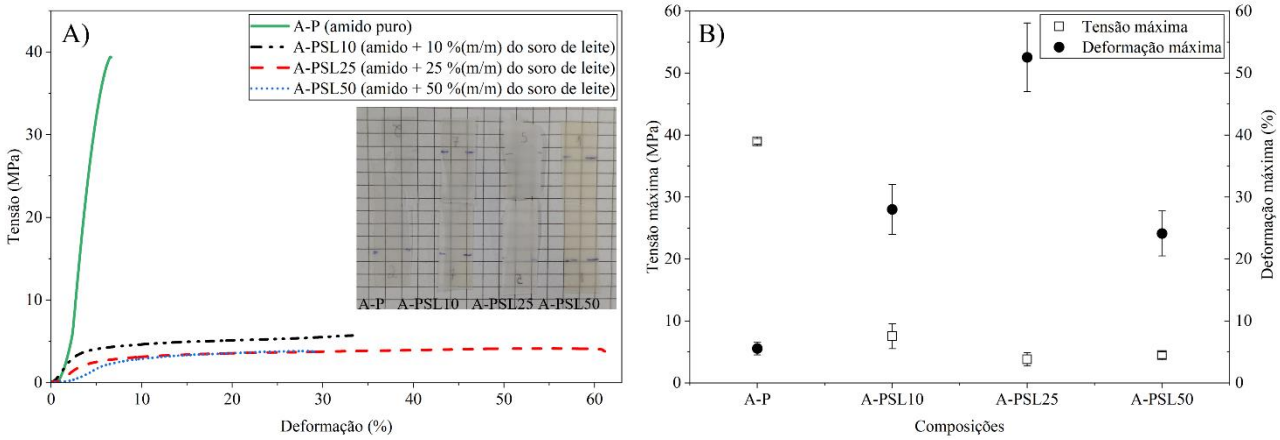
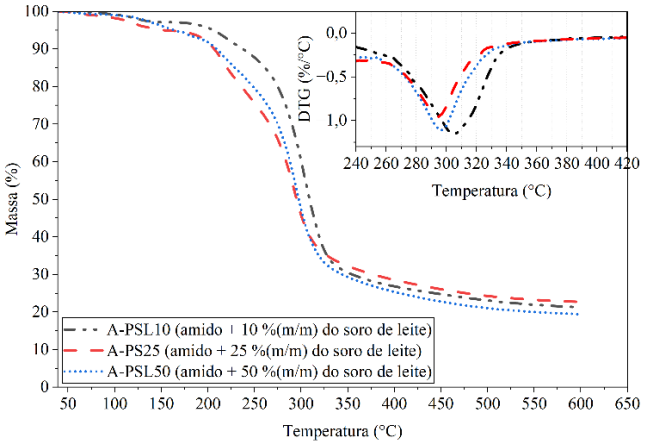


Figura 2. *Curvas de análise termogravimétrica (TG) e termogravimetria derivada (DTG) dos filmes de amido com proteína do soro de leite.*



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIPLAST — ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO. Reciclagem de plásticos no Brasil recupera-se em 2024 e índice para embalagens atinge 24,4%. São Paulo: ABIPLAST, 25 set. 2025. Disponível em: https://www.abiplast.org.br/noticias/reciclagem-de-

plasticos-no-brasil-recupera-se-em-2024-e-indice-para-embalagens-atinge-244/. Acesso em: 24 jul. 2026.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. ASTM D882-18: Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting. West Conshohocken: ASTM, 2018.

AYALA, G.; AGUDELO, A.; VARGAS, R. Effect of glycerol on the electrical properties and phase behavior of cassava starch biopolymers. DYNA, 79,138–147, 2012.

AZEVEDO, Viviane Machado et al. Effect of replacement of corn starch by whey protein isolate in biodegradable film blends obtained by extrusion. Carbohydrate Polymers, v. 157, p. 971–980, 10 fev. 2017.

BUCHANAN, Dominic et al. Recent advances in whey processing and valorisation: Technological and environmental perspectives. International Journal of Dairy Technology, v. 76, n. 2, p. 291–312, 2023.

CARVALHO, R. A. et al. WPI and cellulose nanofibres bio-nanocomposites: effect of thyme essential oil on the morphological, mechanical, barrier and optical properties. Journal of Polymers and the Environment, v. 28, n. 1, p. 231–241, 2020.

CHIUMARELLI, Marcela; HUBINGER, Miriam D. Evaluation of edible films and coatings formulated with cassava starch, glycerol, carnauba wax and stearic acid. Food Hydrocolloids, v. 38, p. 20–27, 1 jul. 2014.

KANDASAMY, Sujatha et al. Application of Whey Protein-Based Edible Films and Coatings in Food Industries: An Updated Overview. Coatings, v. 11, n. 9, p. 1056, set. 2021.

KUMAR, Anand et al. Biodegradable and smart packaging films for food quality and safety: A review. Applied Food Research, v. 5, n. 2, p. 101491, dez. 2025.

ROSSETO, Marieli et al. Corn starch and whey-based films with transglutaminase and broccoli extract: A bioactive strategy for Minas cheese preservation. Food Bioscience, v. 71, p. 107285, 1 set. 2025.

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

YANG, Yiwen et al. Strategies and Methodologies for Improving Toughness of Starch Films. Foods, v. 13, n. 24, p. 4036, jan. 2024.

DADOS CADASTRAIS

BOLSISTA: Marília Marschall Sedosvki.
MODALIDADE DE BOLSA: PROBIC/UDESC (IC)

VIGÊNCIA: 04/11/2024 a 31/10/2029
ORIENTADOR(A): Marcia Bär Schuster.
CENTRO DE ENSINO: CEO
DEPARTAMENTO: Departamento de Engenharia de Alimentos e Engenharia Química.
ÁREAS DE CONHECIMENTO: Ciências Agrárias / Ciência e Tecnologia de Alimentos.
TÍTULO DO PROJETO DE PESQUISA: Estudo de diferentes estratégias para obtenção de bionanocompósitos poliméricos multifuncionais a partir de proteína do soro do leite.
Nº PROTOCOLO DO PROJETO DE PESQUISA: PVEO222-2024