



EFEITO DA INCORPORAÇÃO DE MANTEIGA DE CACAU (*Theobroma Cacao*) NAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE FILMES DE GELATINA

Vitória Borges de Araújo^{1,2}, Ricardo Henrique de Lima Leite (coorientador)^{1,3}, Francisco Klebson Gomes dos Santos (orientador)^{1,4}

¹Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA). Mossoró, RN, Brasil.

²E-mail: vitoriaaraujo6049@gmail.com

³E-mail: ricardoleite@ufersa.edu.br

⁴E-mail: klebson@ufersa.edu.br

Resumo: Diante da crescente demanda por materiais sustentáveis, esse estudo visou avaliar gelatina como base para obtenção de filmes biodegradáveis, no entanto devido à alta hidrofilicidade da gelatina, suas aplicações são limitadas. Com isso, a manteiga de cacau foi incorporada, visando seu impacto na redução da permeabilidade ao vapor de água dos filmes como também em outras propriedades físico-químicas como: solubilidade, umidade, variação de cor e propriedades mecânicas. Para determinar a concentração adequada de manteiga de cacau na preparação dos filmes de gelatina, foi realizado um teste preliminar envolvendo a preparação de uma emulsão variando concentrações de manteiga de cacau e tensoativo. A obtenção dos filmes seguiu o método *casting*, onde as soluções filmogênicas foram preparadas e depositadas em placas, posteriormente secas em estufa a 45° C. Os resultados mostraram que a adição de manteiga de cacau especialmente na concentração de 0,002g, reduziu a PVA em 45%, melhorando a resistência à umidade e reduzindo a solubilidade em 10%. Contudo, concentrações mais elevadas de manteiga de cacau (0,005g), apesar de reduzir a PVA dos filmes em 21%, comprometeram a homogeneidade dos mesmos. Além disso, as propriedades mecânicas dos filmes foram analisadas com destaque para o alongamento na ruptura (ϵ) de 252,59% na concentração de 0,002 evidenciando que a manteiga de cacau conferiu uma maior flexibilidade aos filmes. Concluiu-se que a manteiga de cacau foi efetiva na mudança de hidrofilia de filmes de gelatina, sendo uma alternativa promissora no desenvolvimento de embalagens sustentáveis, especialmente para aplicações que demandam maior elasticidade e capacidade de deformação.

Palavras-chave: Manteiga de semente de cacau; biopolímero; filmes biodegradáveis.

1. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com o meio ambiente tem motivado a busca por alternativas sustentáveis capazes de substituir os plásticos convencionais, que são amplamente utilizados, mas altamente poluentes [1]. Nesse contexto, a pesquisa por materiais biodegradáveis tem ganhado força, principalmente diante da valorização crescente da sustentabilidade e da necessidade de reduzir o impacto ambiental. Entre as soluções promissoras, destacam-se os filmes biodegradáveis, especialmente aqueles derivados de fontes naturais, que têm demonstrado grande potencial na proteção de alimentos [2]. Eles funcionam como barreiras eficazes contra umidade, gases e aromas, posicionando-se como uma alternativa viável para substituir embalagens plásticas [3].

Entre os biopolímeros mais promissores tem-se a gelatina, um material de origem proteica, destacando-se por ser biodegradável abundante e de fácil obtenção. Além disso, é capaz de formar filmes com propriedades adequadas para diversas aplicações [4]. No entanto, os filmes à base de gelatina, apesar de sua biocompatibilidade, apresentam algumas limitações quando comparados aos polímeros sintéticos, como menor resistência mecânica e maior sensibilidade à umidade [5]. Essas características reduzem a eficácia dos filmes em aplicações que demandam maior durabilidade e proteção [6]. A gelatina se destaca por sua ampla disponibilidade e diversas propriedades funcionais [7]. Obtida pela hidrólise do colágeno de ossos e pele de animais, é amplamente utilizada nas indústrias alimentícia, cosmética e farmacêutica [8]. Sua composição, de aminoácidos como glicina, prolina e alanina, é crucial para suas propriedades gelificantes, onde concentrações mais altas desses aminoácidos aumentam a força e a viscosidade do gel [9]. Variações no perfil de aminoácidos, influenciadas pela origem do colágeno (bovinos ou peixes), podem resultar em diferenças significativas nas propriedades físicas e químicas da gelatina [10]. Além disso, a presença de ácidos graxos nas formulações pode modificar propriedades mecânicas, como a redução da permeabilidade ao vapor de água e o aumento da rigidez dos filmes comestíveis [11], indicando que as interações entre ácidos graxos e proteínas são críticas para adaptar as propriedades funcionais do material.

Para contornar essas limitações, a incorporação de gordura vegetal, como a manteiga de cacau, extraída do *Theobroma cacao*, surge como uma estratégia promissora, pois apresenta propriedades físicas que podem melhorar a funcionalidade dos filmes de gelatina, sendo capaz de modificar as propriedades dos mesmos, tornando-os mais eficientes. A manteiga de cacau (MC) é amplamente utilizada nas indústrias alimentícia e farmacêutica devido à sua composição, predominantemente de ácidos palmítico (>25%), esteárico (>33%) e oleico (>34%), além de triglicerídeos assimétricos [12]. A interação entre esses ácidos graxos influencia diretamente o comportamento de fusão e as características térmicas da MC, essenciais para aplicações em liberação de chocolate e formulações farmacêuticas [13,14]. A MC apresenta polimorfismo, com pelo menos seis formas cristalinas, cada uma com diferentes comportamentos de cristalização e fusão [13,15]. Além disso, outros componentes, como ácidos graxos livres, minerais e tocoferóis, desempenham um papel importante na qualidade e estabilidade do produto [14].

Apesar do potencial, a interação entre a manteiga de cacau e a matriz de gelatina, assim como os efeitos dessa combinação nas propriedades dos filmes, ainda é pouco explorada. Diante disso, este trabalho teve como objetivo investigar como a adição da manteiga da semente de *Theobroma cacao* influencia nas propriedades físico-químicas dos filmes de gelatina, preparando filmes com diferentes teores de manteiga de cacau e caracterizando-os quanto à permeabilidade ao vapor de água, propriedades ópticas, solubilidade, umidade e propriedades mecânicas. Buscou-se, com essa investigação, compreender de que maneira a inclusão desse componente natural pode contribuir para o desenvolvimento de materiais de embalagem mais eficientes e ecologicamente corretos.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A incorporação de lipídios, como ceras, gorduras vegetais e manteigas, em filmes à base de gelatina tem demonstrado melhorias significativas nas propriedades físico-químicas desses materiais, tornando-os promissores para uso em embalagens de alimentos. Vários estudos indicaram que a adição de lipídios a filmes de gelatina resulta em benefícios, como o aumento da resistência à água, aprimoramento das propriedades mecânicas e melhorias nas características de barreira [16-20].

A adição de lipídios como cera de abelha e cera de carnaúba, por exemplo, eleva a hidrofobicidade da superfície dos filmes e reduz a permeabilidade ao vapor de água, contribuindo para uma maior resistência à umidade [16, 21]. Esses efeitos são cruciais para o desempenho dos filmes em condições de alta umidade, conforme relatado em estudos recentes [22]. No entanto, o impacto dos lipídios nas propriedades mecânicas dos filmes é variável. Enquanto alguns lipídios melhoram a resistência à tração, outros podem aumentar a fragilidade dos materiais. A cera de abelha, por exemplo, mostrou-se eficaz em melhorar as propriedades de barreira dos filmes, mas não provocou grandes melhorias na resistência mecânica quando comparada aos filmes de controle [17]. Além das melhorias nas propriedades físicas, a incorporação de certos lipídios também pode conferir características funcionais adicionais. O óleo de buriti, por exemplo, não só diminui a permeabilidade dos filmes, como também introduz propriedades antioxidantes e antimicrobianas, o que pode ser altamente vantajoso para prolongar a vida útil dos alimentos embalados [23]. Dessa forma, o uso de lipídios em filmes de gelatina se apresenta como uma estratégia promissora para o desenvolvimento de embalagens ativas, que não apenas protegem os alimentos fisicamente, mas também auxiliam na preservação de suas qualidades microbiológicas e nutricionais.

A adição de MC a filmes à base de pectina leva à redução da resistência mecânica e ao aumento da opacidade, criando uma microestrutura heterogênea [18]. Em formulações contendo colágeno hidrolisado e MC, as propriedades mecânicas variam com a concentração de sacarose, o que indica que a presença de MC pode alterar a flexibilidade e a resistência à tração dos filmes [19]. Além das mudanças nas propriedades físicas, a MC também impacta as características de barreira dos filmes.

Embora aumente a estabilidade térmica, sua adição eleva a permeabilidade ao vapor de água, o que pode ser uma desvantagem em aplicações que exigem resistência à umidade [18,19]. A taxa de permeabilidade de vapor de água (TPVA) também é afetada pela espessura do filme, com filmes mais espessos exibindo maior permeabilidade ao vapor de água [18]. Tendo a capacidade de formar filmes transparentes e atuar como uma barreira eficaz contra gases como oxigênio (O₂) e dióxido de carbono (CO₂) [20].

No contexto da tecnologia de alimentos, filmes comestíveis contendo MC mostram-se promissores para a preservação de alimentos, oferecendo uma alternativa biodegradável aos revestimentos sintéticos [24]. Apesar de a MC melhorar certas propriedades dos filmes, como a estabilidade térmica e a opacidade, seu impacto negativo na resistência mecânica e na permeabilidade pode limitar seu uso em algumas aplicações.

3. MATERIAS E MÉTODOS

A gelatina utilizada foi obtida da Dr. Oetker do Brasil LTDA. O Glicerol (99% P.A) foi fornecido pela Sigma-Aldrich LTDA (Brasil). O Polioxietileno Sorbitano Monooleato (Tween80) foi fornecido pela Dinâmica Química Contemporânea LTDA (Brasil). A manteiga de cacau foi fornecida pelo Grão Potiguar – Ortsac

comércio e distribuição de produtos naturais EIRELI. Os experimentos foram realizados no Laboratório de Pós-Colheita do Centro de Engenharias (CE) na Universidade Federal Rural do semi-árido (UFERSA).

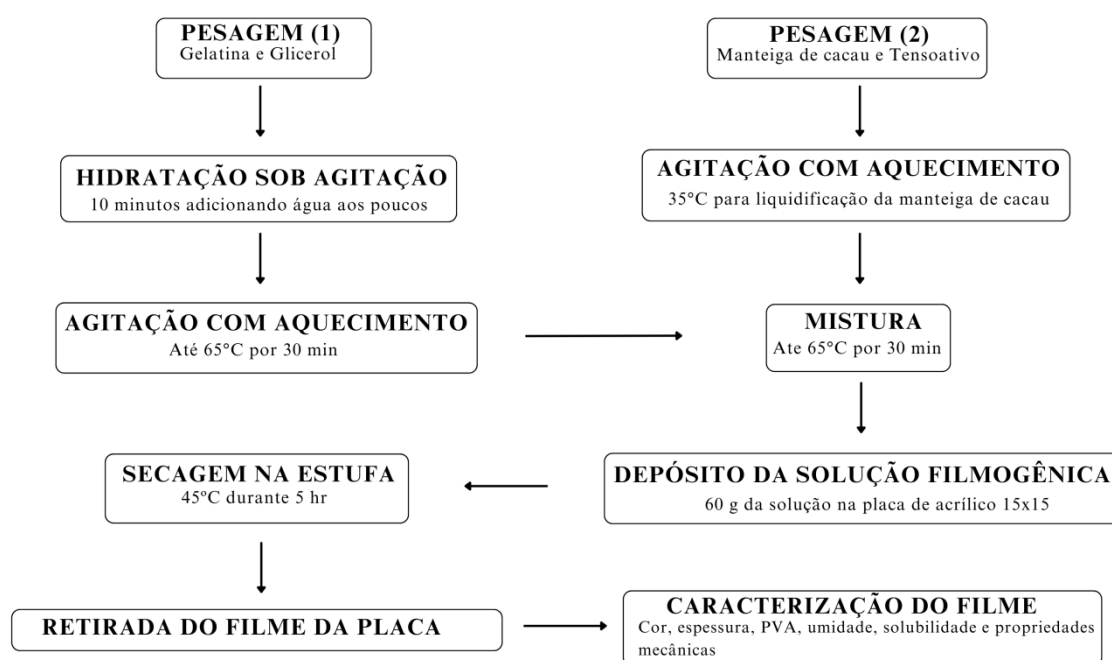
3.1 Análise de Emulsões Estáveis

Para determinar a concentração adequada de manteiga de cacau na formulação dos filmes de gelatina, foi realizado um teste preliminar envolvendo a preparação de uma emulsão. Diferentes formulações experimentais foram preparadas, variando as concentrações de manteiga de cacau e tensoativo, com o objetivo de identificar a melhor combinação para uma emulsificação. O critério de escolha foi à obtenção de uma emulsão estável e homogênea, sem sinais de separação de fases após um período de 24 horas.

3.2 Obtenção dos Filmes

Os filmes foram obtidos pelo método *casting* adaptado [25]. Foi preparada uma mistura da gelatina (5 g – base úmida) e glicerol (1,5 g – base seca) em um Erlenmeyer de 250 ml, adicionando água destilada. A solução foi hidratada por 10 min e em seguida foi aquecida em um termo agitador a uma temperatura de 65 °C. Preparou-se uma mistura de manteiga de cacau (MC) e Tween80 (TW), conforme razão pré-definida, sendo aquecido até 35°C até liquidação, pipetando gota a gota da solução filmogênica de gelatina que foi totalmente incorporado com a manteiga de cacau e tween80, completando a massa total de 100g, continuando em agitação por 30 minutos para garantir uma mistura homogênea. A solução foi despejada em placas de acrílico com aproximadamente 60g e espalhada uniformemente. Os filmes foram secos em estufa a 45°C por 5 horas. A Figura 1 mostra um esquema detalhado.

Figura 1. Diagrama do processo de obtenção e caracterização dos filmes.



Fonte: autoria própria (2024).

3.3 Determinação da Espessura

A espessura dos filmes foi determinada utilizando um Micrômetro Digital Externo, Shahe, com faixa de medição de 0-25 mm e precisão de 0,001 mm $\pm$ 0,003. As medições foram realizadas em cinco pontos diferentes para todas as amostras, calculando-se a média desses pontos.

3.4 Propriedades ópticas

As medições das propriedades ópticas foram realizadas de acordo com metodologia [26], no qual foi utilizado um colorímetro, CR-10 da Konica Minolta, apresentando valores de acordo com o sistema CIE-Lab* (CIELAB) com as coordenadas: luminosidade (L), coordenada vermelho/verde (a), coordenada amarelo/azul

(b) e (ΔE) a diferença total de cor, calculado de acordo com a Equação 1. Foi usado um padrão no fundo branco ($L^* 78,7$; $a^* 5,0$; $b^* 9,1$)

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

3.5 Permeabilidade ao vapor de água

A permeabilidade ao vapor de água (PVA) foi determinada conforme metodologia adaptada [26], seguindo a norma de determinação gravimétrica da taxa de transmissão de vapor de água de materiais [27]. O filme foi selado em uma célula de permeação, contendo 10 mL de água destilada, e pesado a cada uma hora ao longo de um período de 8 horas. Os Testes foram realizados em quintuplicada para cada amostra. O cálculo da permeabilidade foi com base no peso (W) de água que permeou o filme, considerando a espessura média (L) e a área exposta (A), com um período (t) sob um diferencial de pressão de vapor de água (ΔP). A PVA [(g.mm)/m².h. kPa] foi calculada pela Equação 2.

$$PVA = \frac{W \cdot L}{A \cdot t \cdot \Delta P} \quad (2)$$

3.6 Solubilidade

A Solubilidade foi determinada conforme metodologia adaptada [28]. A massa inicial (mi) foi obtida através da secagem dos filmes a 105 °C durante 1h30 min em estufa. A massa final (mf) foi obtida pela imersão dos filmes em água destilada sob agitação 200 rpm por 12 horas a 25°C e depois seco nas mesmas condições. A solubilidade (%) foi calculada de acordo com a Equação 3.

$$S = \frac{mi - mf}{mi} \times 100 \quad (3)$$

3.7 Umidade

A umidade foi determinada conforme a metodologia adaptada [29]. A massa inicial (mi) foi obtida pela pesagem dos filmes após 24 horas expostos a temperatura ambiente, 25°C. A massa final (mf) foi obtida através da secagem dos filmes a 105 °C durante 1h30 min hora em estufa. A umidade foi calculada de acordo com a Equação 4.

$$U = \frac{mi - mf}{mi} \times 100 \quad (4)$$

3.8 Propriedades mecânicas

Para a realização dos ensaios mecânicos, as amostras foram cortadas no tamanho conforme as especificações recomendadas, seguindo as diretrizes das normas [30]. As propriedades mecânicas de tração foram determinadas utilizando uma máquina universal de ensaio mecânico. As propriedades avaliadas foram: tensão (σ) refere-se à força por unidade de área que o filme suporta antes de romper, sendo calculada conforme a Equação 5. O alongamento na ruptura (ε) mede a deformação relativa do material até o ponto de ruptura, conforme descrito na Equação 6. Já o módulo de Young (E), determinado pela Equação 7, representa a relação entre a tensão aplicada e a deformação elástica.

$$\sigma = \frac{Fm}{a} \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{Lo} \quad (6)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (7)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a homogeneidade e estabilidade necessárias, as concentrações de emulsão (Tabela1) foram utilizadas na preparação dos filmes de gelatina, assegurando uma distribuição uniforme da manteiga de cacau na matriz filmogênica. Por exemplo, para incorporar 0,002g de manteiga de cacau (Figura 1 – pesagem 2), foram pesados juntos 0,04g de tensoativo tween 80.

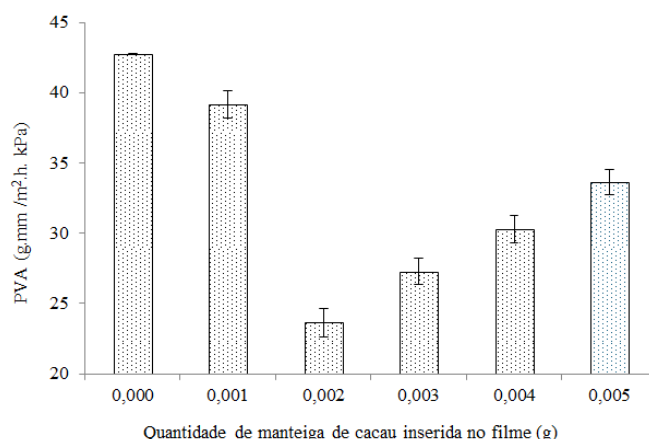
Tabela 1. Razão MC/tensoativo no preparo dos filmes

MANTEIGA DE CACAU (g) (base seca)	TWEEN80 (g) (base seca)
0,001	0,02
0,002	0,04
0,003	0,06
0,004	0,08
0,005	0,1

Fonte: autoria própria (2024).

A permeabilidade ao vapor de água (PVA) dos filmes foi influenciada pela adição de manteiga de cacau em diferentes concentrações, como é possível visualizar na Figura 2. O filme de gelatina sem manteiga de cacau (S/MC), que serviu como controle, apresentou o maior valor de PVA, 42,8 g.mm /m².h. kPa, confirmando sua natureza hidrofílica. A adição de manteiga de cacau, uma substância lipídica, impactou diretamente na capacidade de barreira dos filmes, como esperado, devido à sua característica hidrofóbica.

Figura 2. Permeabilidade ao vapor de água (PVA) dos filmes em diferentes concentrações de MC



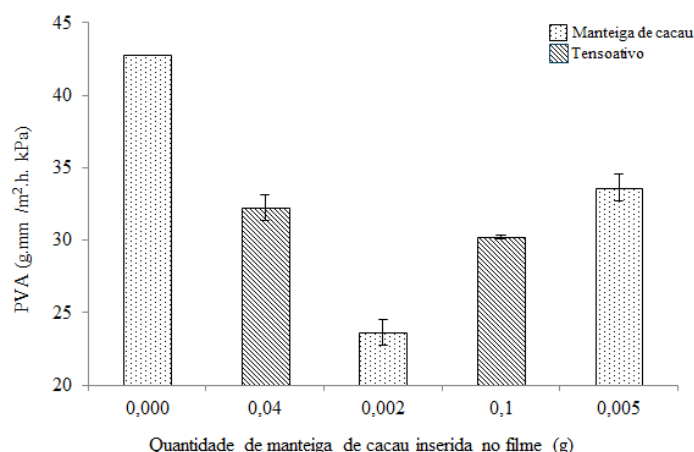
Fonte: autoria própria (2024).

Com a incorporação de 0,001g de manteiga de cacau, observou-se uma redução de 8,4% na PVA, com o valor diminuindo para 39,2 g.mm /m².h.kPa. Ao aumentar a concentração para 0,002 g, a PVA reduziu em 44,7% em relação ao controle, chegando a uma PVA de 23,7 g.mm /m².h. kPa. Esse valor indica que, nessa concentração, a manteiga de cacau foi efetivamente incorporada à matriz de gelatina, promovendo uma barreira mais eficaz contra a passagem de vapor de água.

Entretanto, ao aumentar a concentração para 0,003 g, a PVA aumentou levemente para 27,3 g.mm /m².h. kPa. KPa, correspondendo a uma redução de 36,2%. Esse comportamento pode indicar que, embora a manteiga de cacau continue a proporcionar uma barreira ao vapor de água, a eficácia diminui. Esse padrão é ainda mais evidente nas concentrações de 0,004 g e 0,005 g, nos quais os valores da PVA aumentaram para 30,3 e 33,6 g.mm /m².h.kPa, resultando em reduções de 29,2% e 21,3%, respectivamente. Esse aumento progressivo da permeabilidade sugere que concentrações mais elevadas de manteiga de cacau podem levar a uma distribuição não homogênea no filme, possivelmente formando agregados ou micro espaços que comprometem a barreira ao vapor de água, como observado em [18].

Esses resultados são consistentes com a literatura [16, 17, 20, 21, 23], no qual a adição de lipídios em filmes de biopolímeros reduz a permeabilidade ao vapor de água devido à criação de uma matriz mais hidrofóbica. No entanto, existe um limite de concentração a partir do qual a eficiência desse mecanismo começa a decair.

Figura 3. Permeabilidade ao vapor de água para filmes de gelatina sem manteiga de cacau, filmes somente com tensoativo e filmes com manteiga de cacau



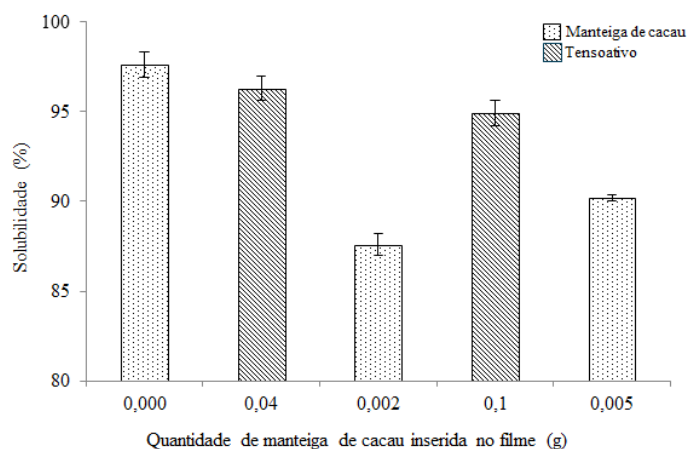
Fonte: autoria própria (2024).

A Figura 3 apresenta os valores de PVA dos filmes de gelatina sem manteiga de cacau filmes, somente com tensoativo (0,04g e 0,1g) e filmes com manteiga de cacau (0,002g e 0,005g). A necessidade de produzir filmes apenas com tensoativo, sem a presença de manteiga de cacau, surgiu para comparar os efeitos isolados de ambos os componentes. O tensoativo atua como um agente dispersante, facilitando a incorporação uniforme da fase lipídica, como a MC, na matriz polimérica.

A incorporação de tensoativo nos filmes de gelatina foi realizada para avaliar sua influência nas propriedades de barreira e para comparar a eficácia com a manteiga de cacau. O tensoativo é conhecido por reduzir a tensão superficial, facilitando a dispersão de substâncias hidrofóbicas, como a manteiga de cacau, em uma matriz hidrofílica como a gelatina [31, 32]. Assim, a presença de tensoativo é indispensável para promover uma melhor distribuição do agente hidrofóbico no filme, garantindo que ela seja incorporada de maneira homogênea, sem separação de fases.

Nos filmes com 0,04g e 0,1g de tensoativo, a PVA foi reduzida em relação ao filme sem MC indicando que o tensoativo, por si só, reduziu a PVA, embora de forma menos eficiente em relação a formulação com MC. A redução observada nos filmes somente com tensoativo, que pode ser atribuída à formação de uma rede mais estruturada na matriz do filme. No entanto, quando a manteiga de cacau foi incorporada, houve uma redução na PVA, em relação às amostras sem MC.

Figura 4. Solubilidade dos filmes de gelatina sem manteiga de cacau, filmes somente com tensoativo e filmes com manteiga de cacau

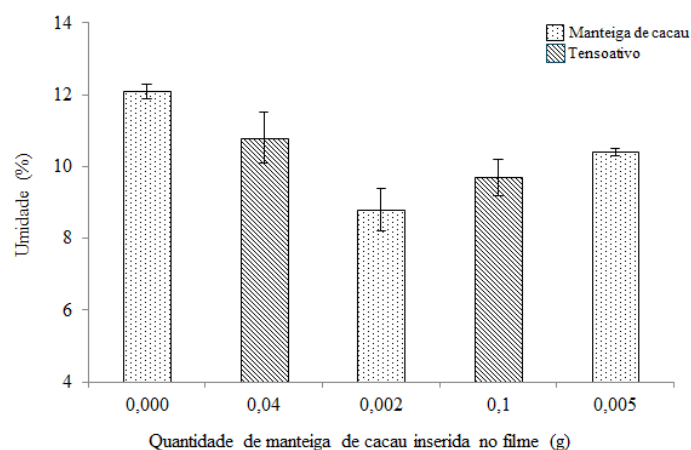


Fonte: autoria própria (2024).

Os resultados apresentados na figura 4 indicaram que a adição de tensoativo e MC têm um efeito notável na redução da solubilidade dos filmes. O filme controle sem MC apresentou solubilidade de 97,6%, confirmando que, os filmes de gelatina são altamente solúveis em água devido à sua natureza hidrofílica.

No entanto, a adição de tensoativo (0,04g e 0,1g), resultou em uma ligeira redução da solubilidade para 96,3% e 94,9%, respectivamente. A redução mais significativa na solubilidade foi observada nas amostras contendo MC. O filme com 0,002g apresentou uma solubilidade de 87,6%, enquanto o filme com 0,005g teve uma solubilidade de 90,2%, valores consideravelmente menores do que os filmes contendo apenas tensoativo. Esses resultados sugerem a formação de micelas com componentes apolares, o que resulta na redução da solubilidade dos filmes [33].

Figura 5. Umidade dos filmes de gelatina sem manteiga de cacau, filmes somente com tensoativo e filmes com manteiga de cacau



Fonte: autoria própria (2024).

Os valores de umidade, apresentados no Gráfico 4, mostraram que o filme sem MC apresentou o valor mais elevado, com 12,1%, o que era esperado devido à característica higroscópica da gelatina. A adição de tensoativo, como observado nas amostras somente com tensoativo, reduziu a umidade dos filmes para 10,8% e 9,7%, respectivamente. Essa redução pode ser explicada pela alteração na estrutura do filme, que se torna menos propensa a reter umidade. Os filmes contendo MC apresentaram menores níveis de umidade, 8,8% e 10,4%, respectivamente. No caso do filme com a concentração de 0,005g, o aumento da umidade na formulação levou à agregação e à formação de uma estrutura em rede, o que pode comprometer a uniformidade da matriz e, consequentemente, impactar as propriedades do material [32]. Por outro lado, para a amostra de 0,002g, a manteiga de cacau desempenhou um papel hidrofóbico mais acentuado, reduzindo a absorção de umidade nos filmes.

Tabela 2. Medidas das coordenadas de luminosidade (L), vermelho/verde (a), amarelo/azul (b) e a diferença total de cor (ΔE) no fundo branco e espessuras dos filmes de gelatina sem manteiga de cacau, filmes somente com tensoativo (0,04g e 0,1g) e filmes com manteiga de cacau (0,002g e 0,005g)

FILMES	L	a	b	ΔE	ESPESSURA (mm)
0	77,9 $\pm$ 0,8	4,2 $\pm$ 0,2	13,0 $\pm$ 0,8	4,2 $\pm$ 0,1	0,153 $\pm$ 0,001
0,04	77,9 $\pm$ 0,5	3,8 $\pm$ 0,2	13,2 $\pm$ 0,7	4,4 $\pm$ 0,1	0,153 $\pm$ 0,001
0,002	77,8 $\pm$ 0,8	4,0 $\pm$ 0,3	13,6 $\pm$ 0,7	4,6 $\pm$ 0,1	0,154 $\pm$ 0,002
0,1	75,9 $\pm$ 0,8	4,1 $\pm$ 0,2	13,4 $\pm$ 0,8	4,4 $\pm$ 0,1	0,154 $\pm$ 0,001
0,005	74,3 $\pm$ 0,1	4,2 $\pm$ 0,2	12,5 $\pm$ 0,5	5,7 $\pm$ 0,1	0,157 $\pm$ 0,002

Fonte: autoria própria (2024).

As coordenadas L (luminosidade), que variaram entre 77,9 e 74,3, indicaram uma tendência de escurecimento à medida que a concentração de manteiga de cacau (MC) aumentou. O filme sem MC apresentou um valor de L de 77,9, o que reflete a alta luminosidade e a aparência mais clara da matriz de gelatina. Com a incorporação de manteiga de cacau, houve uma leve diminuição da luminosidade, especialmente para a

concentração de 0,005 g, que registrou o menor valor de L (74,3). Esse comportamento pode ser explicado pela maior absorção de luz causada pela presença da fase lipídica, que tende a escurecer os filmes, confirmando o impacto da manteiga de cacau sobre a opacidade e translucidez dos filmes [34].

As coordenadas a e b, que indicam as tonalidades vermelha-verde e amarela-azul, respectivamente, mostraram pouca variação com a adição de MC e tensoativo. O valor de a permaneceu próximo de 4 para todos os filmes, sugerindo que a tonalidade as amostras mantiveram-se relativamente estável, sem alterações significativas na percepção de cor avermelhada. De forma similar, os valores de b, variando entre 12,5 e 13,6, indicaram uma predominância da tonalidade amarelada nos filmes, com mudanças discretas entre as diferentes formulações.

No entanto, em concentrações mais elevadas de tensoativo, como 0,1%, observou-se uma redução nos valores de L, caindo para 75,9, no qual esse efeito pode estar relacionado à dispersão do tensoativo na matriz de gelatina, promovendo uma mudança na uniformidade óptica dos filmes. Em concentrações mais elevadas de MC (0,005 g), o aumento do valor de ΔE , combinado com a redução de L, sugere a aglomeração da fase lipídica e consequente alteração na homogeneidade, como observado nos valores de PVA.

Tabela 3. Valores de tensão na ruptura (σ), alongamento na ruptura (ϵ) e módulo de Young (E) dos filmes

FILMES	σ (MPa)	ϵ (%)	E (MPa)
S/MC	7,31	174,08	4,20
0,04	1,94	202,35	0,95
0,002	1,88	252,59	0,74
0,1	1,90	239,52	0,79
0,005	2,88	210,57	1,37

Fonte: autoria própria (2024).

Na Tabela 3, observa-se que os filmes de gelatina pura (S/MC) apresentaram os maiores valores de tensão na ruptura (7,31 MPa) e no módulo de elasticidade (4,20 MPa), demonstrando que a ausência de manteiga de cacau e tensoativo resultou em maior resistência mecânica. Contudo, a elongação na ruptura foi relativamente menor (174,08%), sugerindo que, embora mais resistentes, os filmes de gelatina pura possuem uma capacidade limitada de deformação antes de se romperem.

As amostras 0,04% e 0,1% provocaram uma redução significativa na tensão na ruptura e no módulo de elasticidade. No caso da amostra 0,04%, a tensão na ruptura foi reduzida para 1,94 MPa, como também o módulo de elasticidade para 0,95 MPa, valores inferiores aos do filme controle (S/MC). Entretanto, a elongação na ruptura aumentou para 202,35%, evidenciando que a presença do tensoativo tornou o filme mais flexível, embora menos resistente. O mesmo comportamento foi observado para amostra com 0,1% de tensoativo, que apresentou uma tensão na ruptura de 1,90 MPa e um módulo de elasticidade de 0,79 MPa, enquanto a elongação na ruptura foi ainda maior, atingindo 239,52%. Esses resultados revelaram que o tensoativo conferiu maior flexibilidade aos filmes, porém, isso comprometeu sua resistência mecânica.

Nas amostras contendo manteiga de cacau (0,002% e 0,005%), também houve uma redução na resistência mecânica em comparação ao filme controle, porém com um impacto mais notável na elongação. O filme com 0,002% de MC apresentou a maior elongação na ruptura (252,59%), indicando uma flexibilidade e uma elevada capacidade de deformação antes do rompimento. No entanto, essa flexibilidade veio acompanhada pelos menores valores de tensão na ruptura (1,88 MPa) e módulo de elasticidade (0,74 MPa), evidenciando que o filme se tornou mais maleável, porém menos resistente. Já o filme com 0,005% de manteiga de cacau apresentou um leve aumento na resistência mecânica ($\sigma = 2,88$ MPa e $E = 1,37$ MPa), mas com uma elongação um pouco inferior (210,57%).

Esses resultados indicaram que o tensoativo comprometeu a resistência mecânica dos filmes de gelatina, enquanto a MC promoveu maior flexibilidade, como evidenciado pelos altos valores de elongação, mas reduziu a rigidez dos filmes. A manteiga de cacau por ser composta majoritariamente por triglicerídeos assimétricos [12], contribuiu para conferir flexibilidade e maleabilidade aos filmes. A maior flexibilidade pode ser vantajosa para aplicações que requerem materiais mais elásticos e maleáveis.

5. CONCLUSÃO

A pesquisa sobre filmes de gelatina incorporados com manteiga de cacau teve como objetivo investigar a influência de componentes lipídicos nas propriedades físico-químicas dos filmes. A hipótese inicial sugeria que a manteiga de cacau poderia melhorar a resistência à umidade e aperfeiçoar as propriedades físico-químicas dos filmes, tornando-os mais adequados para aplicações em embalagens sustentáveis.

Os resultados mostraram que a manteiga de cacau efetivamente promoveu uma barreira resistente à umidade, especialmente na concentração intermediária (0,002 g), onde a permeabilidade ao vapor de água foi reduzida em 44,7% em comparação ao filme de gelatina pura. No entanto, concentrações mais elevadas aumentaram a PVA, indicando a formação de agregados que comprometeram a integridade dos filmes, ressaltando a importância do controle na formulação.

Além disso, a adição de manteiga de cacau diminuiu a solubilidade, aumentando a hidrofobicidade do material. A análise colorimétrica revelou mudanças nas propriedades ópticas dos filmes, destacando a necessidade de controlar a concentração lipídica para manter a uniformidade visual. Em termos mecânicos, enquanto a gelatina pura apresentou maior resistência, os filmes com manteiga de cacau e tensoativo aumentaram a elongação na ruptura, sugerindo potencial para aplicações que exigem elasticidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PITANGA, Â. F. Evidências do desenvolvimento do pensamento complexo por meio da análise de produções textuais em aulas de química: uma jornada temática refletindo sobre o problema dos plásticos nos oceanos. **Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências (Belo Horizonte)**, v. 26, p. e46046, 2024.
- [2] LATIF, S.; AL-AHMARY, K.M.; ALI, I. Development of Plumeria alba extract supplemented biodegradable films containing chitosan and cellulose derived from bagasse and corn cob waste for antimicrobial food packaging. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 266, Parte 1, 131262, 2024.
- [3] WARUPA, S.; THAREJA, P. Techniques, applications and prospects of polysaccharide and protein-based biopolymer coatings: A review. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 266, p. 131104, 2024.
- [4] YARAHMADI, A.; DOUSTI, B; KARAMI-KHORRAMABADI, M; AFKHAMI, H. Materials based on biodegradable polymers chitosan/gelatin: a review of potential applications. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 12, 2024.
- [5] DE VARGAS, V. H.; MARCZAK, L. D. F.; FLORES, S. H.; MERCALI, G. D. Morphology and functional properties of gelatin-based films modified by UV radiation and bacterial cellulose nanofibers. **Journal of Food Process Engineering**, v. 46, n. 9, p. e14399, 2023.
- [6] WU, Y.; XIA, C.; ZHANG, L; NGUYEN, C; AL OBAID, S; ALFARRAJ, S; JHANANI, G. K. Organic gelatin-coated ZnNPs for the production of biodegradable biopolymer films. **Environmental Research**, v. 231, p. 116059, 2023.
- [7] ZHANG, Y.; WANG, J. Current status and prospects of gelatin and its derivatives in oncological applications: Review. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 274, p.133590, 2024.
- [8] ROSLI, N. M.; AHMED, Shakeel; SARBON, NorizahMhd. Gelatin alternative: extractability and functional and bioactivity properties. In: AHMED, Shakeel; ALI, Akbar (eds.). **Natural Gums**. 1. ed. Elsevier, p. 507-551, 2023.
- [9] FIRDAYANTI, W.; SUPRAYITNO, E. Amino acid profile of gelatin extracted from the skin of starry triggerfish (*Abalistes stellaris*) and determination of its physical properties. **International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP)**, v. 9, n. 4, p. p8895, 2019.
- [10] ZAITSEV, S. Y. Changes in the Amino Acid Composition of Gelatin After Treatment of Bovine Collagen with Enzyme Preparations. **Moscow University Chemistry Bulletin**, v. 78, p. 292-298, 2023.
- [11] FAKHOURI, F. M.; MARTELLI, S. M.; CAON, T.; VELASCO, J. I.; BUONTEMPO, R. C.; BILCK, A. P.; MEI, L. H. Innocentini. The effect of fatty acids on the physicochemical properties of edible films composed of gelatin and gluten proteins. **LWT**, v. 87, p. 293-300, 2018.
- [12] TARIGAN,E.; PUTRA, S. Alternatif lemak kakao dalam industri konfeksi/ Cocoa butter alternatives in confectionery industry. **Perspektif**, v. 21, p. 87-96, 2022.
- [13] LOKE, Y. et al. Cocoa butter: evolution from natural food ingredient to pharmaceutical excipient and drug delivery system. **Planta Med**, v. 90, n. 11, p. 824-833, 2024.
- [14] ROSTAMI, O. et al. Modelling thermal characteristics of cocoa butter using a feed-forward artificial neural network based on multilayer perceptron. **International Journal of Food Science & Technology**, John Wiley & Sons, 2024.
- [15] SIMONE, E. et al. A synchrotron X-ray scattering study of the crystallization behavior of mixtures of confectionary triacylglycerides: Effect of chemical composition and shear on polymorphism and kinetics. **Food Research International**, v. 177, 2024.
- [16] GÜNAL-KÖROĞLU, D.; CAPANOGLU, E. The effect of using natural plant-based waxes in coating/film materials on postharvest quality of fruits and vegetables. **Future Postharvest and Food**, v. 1, n. 1, p. 166-172, 2024.
- [17] ZHANG, Yi; SIMPSON, B. K.; DUMONT, M. J. Effect of beeswax and carnauba wax addition on properties of gelatin films: A comparative study. **Food Bioscience**, v. 26, p. 88-95, 2018.
- [18] MENDES, J. F.; NORCINO, L. B.; MANRICH, A.; et al. Characterization of Pectin Films Integrated with Cocoa Butter by Continuous Casting: Physical, Thermal and Barrier Properties. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 28, p. 2905-2917, 2020.

- [19] FADINI, A. L. et al. Mechanical properties and water vapour permeability of hydrolysed collagen–cocoa butter edible films plasticised with sucrose. **Food Hydrocolloids**, v. 30, n. 2, p. 625-631, 2013.
- [20] JOY, J. M.; DARA, P. K.; AMRUTH, P.; JACOB, R. M.; DHANDAPANI, N.; MATHEW, S.; et al. Avaliação das propriedades físico-químicas e tecnofuncionais da gelatina extraída de resíduos de processamento de peixes. **IJBMS**, [S.l.], v. 14, n. 5, p. 733-742, 2023.
- [21] HOSSEINI, S. F.; MOUSAVI, Z.; McCLEMENTS, D. J. Beeswax: A review on the recent progress in the development of superhydrophobic films/coatings and their applications in fruits preservation. **Food Chemistry**, v. 424, p. 136404, 2023. ISSN 0308-8146, 2024.
- [22] CHENG, Y et al. Effects of natural wax types on the physicochemical properties of starch/gelatin edible films fabricated by extrusion blowing. **Food Chemistry**, v. 401, 2023.
- [23] ANJOS, H. A. et al. Gelatin-based films incorporated with buriti oil (*Mauritia flexuosa* L.) as active packaging for artisanal cheese conservation. **Bioresource Technology Reports**, v. 23, 2023.
- [24] ANDRADE, G.; SAMPEDRO, L. J. Diseño y evaluación de un recubrimiento comestible funcionalizado con compuestos activos, y pectina obtenida de la cáscara de cacao, para fines tecnológicos en la industria alimentaria. **Publicaciones e Investigación**, v. 17, n. 4, 2023.
- [25] LEITE, L. S. F.; BILATTO, S.; PASCHOALIN, R. T.; SOARES, A. C.; MOREIRA, F. K. V.; OLIVEIRA, O. N. Jr; MATTOSO, L. H. C.; BRAS, J. Eco-friendly gelatin films with rosin-grafted cellulose nanocrystals for antimicrobial packaging. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 165, p. 2974-2983, 2020.
- [26] MENEZES, F.L.G; LEITE, R.H. L; SANTOS, F. K. G; ARIA, A. I; AROUCHA, E. M. M. TiO₂ incorporated into a blend of biopolymeric matrices improves film properties and affects the post-harvest conservation of papaya fruits under UV light. **Food Chemistry**, v. 433, p. 137387, 2024.
- [27] ASTM INTERNATIONAL. ASTM E96/E96M-22: Standard Test Methods for Gravimetric Determination of Water Vapor Transmission Rate of Materials. West Conshohocken: ASTM International, 2022.
- [28] OLIVEIRA, V. R. L.; SANTOS, F. K. G.; LEITE, R. H. L.; AROUCHA, E. M. M.; SILVA, K. N. O. Use of biopolymeric coating hydrophobized with beeswax in post-harvest conservation of guavas. **Food Chemistry**, v. 259, p. 55-64, 2018.
- [28] GARRIDO, MA; LEITE, RH de L.; AROUCHA, EMM.; SANTOS, FKG Filmes biodegradáveis de gelatina incorporados com argila bentonítica ionicamente modificada. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 2, pág. 182–188, 2021.
- [30] ASTM INTERNATIONAL. ASTM D882-18: Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting. 2022. West Conshohocken: ASTM International, 2022.
- [31] DEVATHA, T.; GAJJAR, J.A Cryptic Review on Surfactants and its Application. **International Journal of Science and Research**, v. 12, n. 12, p. 492-496, 2023.
- [32] BANJARE, B. S.; BANJARE, M.K. Desafios dos tensoativos, metodologia e sua versátil aplicação. **Futuristic Trends in Chemical Material Sciences & Nano Technology**, v. 3, p. 125-154, 2024.
- [34] WIJAYA, E. C.; SEPAROVIC, F.; DRUMMOND, C. J.; GREAVES, T. L. Micelle formation of a non-ionic surfactant in non-aqueous molecular solvents and protic ionic liquids (PILs). **Physical Chemistry Chemical Physics**, v. 18, n. 35, p. 24377-24386, 2016.
- [34] HELGASON, T.; SALMINEN, H.; KRISTBERGSSON, K.; McCLEMENTS, D. J.; WEISS, J. Formation of transparent solid lipid nanoparticles by microfluidization: Influence of lipid physical state on appearance. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 448, p. 114-122, 2015.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) e CNPq, pelo apoio institucional e financeiro. Meu reconhecimento ao Laboratório de Pós-Colheita e ao Laboratório de Ensaios Mecânicos do Centro de engenharias (CE) da UFERSA, pela infraestrutura e suporte técnico essencial à realização desta pesquisa.