

Desenvolvimento de filmes poliméricos com extrato glicérico de *Nasturtium Officinale* R. Br.: Potencial aplicação farmacêutica

*Development of polymeric films with glyceric extract of *Nasturtium officinale* R. Br.: potential pharmaceutical application*

Marcela Bosio¹; Brenda Winona dos Santos²; Bruna dos Santos Ferreira³; Idonilton da Conceição Fernandes⁴; João Luiz de Souza Carvalho⁵; Sandra Maria Warumby Zanin⁶; Marilis Dallarmi Miguel⁷.

RESUMO

A pele protege o organismo contra agressões externas, mas essa função pode ser comprometida por ferimentos, exigindo o uso de curativos para acelerar a cicatrização e prevenir infecções. O amido, um polímero de fácil obtenção e baixo custo, é promissor na pesquisa biomédica, sendo aplicado em filmes para engenharia de tecidos e hemostasia. Além disso, *Nasturtium officinale* (agrião) possui propriedades farmacológicas como antioxidante, anticancerígeno, antibacteriano, anti-inflamatório e cardioprotetor. Este estudo teve como objetivo desenvolver filmes poliméricos para promover a reparação tecidual e a cicatrização de feridas cutâneas. Foram preparados filmes à base de amido de batata e mandioca, utilizando glicerol e extrato glicólico de *Nasturtium officinale* como plastificantes, por meio do método de fundição (casting). A influência do pH e da espessura dos filmes nas suas propriedades mecânicas e de barreira foi investigada. A caracterização dos filmes foi realizada por microscopia eletrônica de varredura por emissão de campo (FEG) e espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). As propriedades mecânicas foram determinadas por meio de ensaios de tração. Os filmes contendo extrato glicólico de *Nasturtium officinale* como plastificante apresentaram maior resistência à tração e módulo de elasticidade.

Palavras-chave: Filmes poliméricos; Curativos biodegradáveis; *Nasturtium officinale*; Cicatrização de feridas; Propriedades mecânicas

ABSTRACT

The skin protects the body against external aggression, but this function can be compromised by injuries, requiring the use of dressings to accelerate healing and prevent infections. Starch, an easy-to-obtain and low-cost polymer, is promising in biomedical research, being applied in films for tissue engineering and hemostasis. Furthermore, *Nasturtium officinale* (watercress) has pharmacological properties such as antioxidant, anticancer, antibacterial, anti-inflammatory and cardioprotective. This study aimed to develop polymeric films to promote tissue repair and skin wound healing. Films based on potato and cassava starch were prepared, using glycerol and glycolic extract of *Nasturtium officinale* as plasticizers, using the casting method. The influence of pH and film thickness on their mechanical and barrier properties was investigated. Characterization of the films was carried out by field emission scanning electron microscopy (FEG) and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). Mechanical properties were determined through tensile tests. Films containing *Nasturtium officinale* glycolic extract as plasticizer showed higher tensile strength and elastic modulus.

Keywords: Polymeric films; Biodegradable dressings; *Nasturtium officinale*; Wound healing; Mechanical properties

¹ Mestre em Ciências Farmacêuticas; Universidade Federal do Paraná, Brasil. <https://orcid.org/0009-0000-7277-4767>. Email: marcelabosio@gmail.com

² Mestre em Biologia Celular e Molecular; Universidade Federal do Paraná, Brasil. <https://orcid.org/0000-0002-0589-4627>. Email: brendawinona@ufpr.br

³ Mestre em Recursos Hídricos; Universidade Federal do Sergipe, Brasil. <https://orcid.org/0000-0001-6046-9554>. Email: brunaferrera1@ufpr.br

⁴ Mestre em Ciências Farmacêuticas; Universidade Federal do Paraná, Brasil. <https://orcid.org/0000-0003-4728-4488>. Email: tonhfernandes@gmail.com

⁵ Doutor em Ciências Farmacêuticas; Universidade Federal do Paraná, Brasil. <https://orcid.org/0009-0004-2421-9397>. Email: fitoanalitica@hotmail.com

⁶ Doutora em Química; Universidade Federal do Paraná, Brasil. <https://orcid.org/0000-0003-1978-4653>. Email: sandrazanin@ufpr.br

⁷ Doutora em Agronomia; Universidade Federal do Paraná, Brasil. <https://orcid.org/0000-0002-1126-9211>. Email: marilisdmiguel@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

O agrião, conhecido cientificamente como *Nasturtium officinale* R. Br., é uma planta herbácea aquática da família Brassicaceae, originária da Europa. Cultivado e consumido amplamente em sua forma fresca, o agrião é um ingrediente comum em saladas e pratos quentes, como sopas (HUANG ET AL., 2017).

Além de seu valor alimentar, essa planta se destaca por seu potencial terapêutico, sendo tradicionalmente utilizada em receitas caseiras como diurético, expectorante, hipoglicêmico e depurativo (YAZDANPARAST, BAHRAMIKIA E ARDESTANI, 2008). Essa combinação de utilidades alimentares e medicinais ressalta as emoções do agrião em diversos contextos, agregando ainda mais valor à sua composição fitoquímica.

A composição fitoquímica do *Nasturtium officinale* inclui uma gama de compostos bioativos, como glucosinolatos, isotiocianatos, polifenóis e flavonoides, que são responsáveis por suas propriedades benéficas à saúde. Essas características fazem do agrião um agente potencial na promoção da saúde e no combate a diversas doenças, resultando em um interesse crescente na pesquisa científica sobre suas aplicações. Estudos recentes demonstram que extratos dessa planta apresentam atividades antioxidantes, anti-inflamatórias, antibacterianas, cardioprotetoras, antipsoriáticas e anticancerígenas (GULL et al., 2015). Essas propriedades terapêuticas são especialmente relevantes no tratamento de afecções aparentes e inflamações da pele.

Como anti-inflamatório, o agrião pode ser utilizado na pele, o principal órgão do corpo humano, que desempenha um papel essencial na proteção e manutenção da homeostase do organismo. Composta por três camadas principais — epiderme, derme e hipoderme —, a sua estrutura complexa permite funções como isolamento térmico, defesa imunológica e manutenção da integridade física (KANITAKIS, 2002). Ao atuar na proteção contra agentes externos quanto no suporte à imunidade, a pele torna-se um alvo interessante para terapias baseadas em compostos naturais.

Além de atuar como uma barreira física, a pele também é uma extensão do sistema imunológico, respondendo ativamente a estímulos externos e agentes patogênicos (MENDES, 2015). Quando a pele sofre uma lesão, inicia-se um processo de reparo cutâneo que envolve as fases de hemostasia, inflamação, consistência e remodelação do tecido (BIELEFELD, AMINI-NIK & ALMAN, 2013). No entanto, o processo de cicatrização nem sempre resulta na regeneração completa da pele original, e o tratamento de doenças

inflamatórias específicas, como dermatite atópica e psoríase, muitas vezes exige tratamentos prolongados e complexos.

As doenças inflamatórias manifestas, como dermatite atópica, psoríase e dermatite de contato, são condições crônicas que desativam tratamentos prolongados para controlar a inflamação e os sintomas (RAUH, 2008). O manejo dessas doenças é complexo e frequentemente requer o uso de antiinflamatórios descritos, como corticosteróides e agentes imunossupressores, que podem apresentar efeitos adversos e comprometer a adesão ao tratamento (RAUH, 2008). Nesse contexto, a busca por alternativas terapêuticas mais seguras e eficazes, como compostos de origem natural com propriedades anti-inflamatórias, tem se intensificado, melhorando o tratamento das afecções detectadas e melhorando a qualidade de vida dos pacientes.

Além disso, o desenvolvimento de materiais inovadores, como os filmes poliméricos, tem como promessa a promoção de um ambiente adequado para a cicatrização. Esses materiais têm a capacidade de mimetizar a matriz extracelular, facilitando o processo de reepitelização e oferecendo proteção ao leito da ferida (MOGOȘANU & GRUMEZESCU, 2014). Dessa forma, a combinação de agentes terapêuticos naturais, como o agrícola, com novas tecnologias de curativos, pode representar uma abordagem eficiente para melhorar os tratamentos de lesões cutâneas.

Esses filmes permitem a incorporação de ativos com propriedades terapêuticas, contribuindo significativamente para a melhoria da cicatrização (AROCKIANATHAN et al., 2012; BOATENG et al., 2018). Dentre os diferentes tipos de polímeros ou biopolímeros, como o amido, os naturais ganham destaque pela sua biodegradabilidade e biocompatibilidade, sendo frequentemente utilizados em aplicações biomédicas (PAWAR et al., 2015). A utilização de materiais biodegradáveis não atende apenas às exigências de sustentabilidade, mas também permite o desenvolvimento de curativos mais eficientes e menos agressivos ao meio ambiente.

O amido, um biopolímeros de origem vegetal, é amplamente utilizado na produção de filmes biodegradáveis, destacando-se como uma alternativa sustentável aos polímeros sintéticos (HEMA PRABHA & RANGANATHAN, 2018). A formação desses filmes ocorre por meio do processo de gelatinização, onde o amido é aquecido em excesso de água, permitindo a dispersão de suas cadeias de amilose e amilopectina (MALI; GROSSMANN & YAMASHITA, 2010). A adição de agentes plastificantes, como o glicerol, é essencial para aumentar a flexibilidade e a maleabilidade dos filmes, melhorando suas propriedades

mecânicas (MALI et al., 2005). Essas propriedades fazem do amido uma escolha ideal para a produção de curativos biomédicos que podem ser aplicados no tratamento de feridas.

Este estudo, portanto, tem como objetivo explorar o potencial dos filmes poliméricos à base de amido na produção de curativos biomédicos, com ênfase na utilização de plastificantes para a otimização de suas propriedades.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

MATERIAIS

Desenvolvimento e caracterização dos filmes poliméricos

Os materiais utilizados para o desenvolvimento e caracterização dos filmes poliméricos foram: Ácido Bórico (Vetec Química Fina – Rio de Janeiro, Brasil); Água Deionizada (Laboratório de Farmacotécnica, Universidade Federal do Paraná – Curitiba, Brasil); Extrato Glicérico de *Nasturtium officinale* (Laboratório de Farmacotécnica, Universidade Federal do Paraná – Curitiba, Brasil); Glicerina (Êxodo Científica – São Paulo, Brasil); Fécula de Mandioca (Sigma-Aldrich – São Paulo, Brasil); Fécula de Batata (Sigma-Aldrich – São Paulo, Brasil).

Para a determinação das propriedades dos filmes, foram utilizados os seguintes materiais: Água Deionizada (Laboratório de Farmacotécnica, Universidade Federal do Paraná – Curitiba, Brasil); Álcool Etílico 95% P.A. (Neon – São Paulo, Brasil); Cloreto de Potássio P.A. (Biotec Reagentes Analíticos – Pinhais, Brasil); Cloreto de Sódio P.A. (Biotec Reagentes Analíticos – Pinhais, Brasil); Fosfato de Potássio Monobásico Anidro P.A. (Synth – Diadema, Brasil); Fosfato de Sódio Dibásico Anidro P.A. (Synth – Diadema, Brasil).

MÉTODOS

Caracterização dos amidos

A caracterização dos amidos foi realizada conforme os métodos propostos pela Farmacopeia Brasileira, que descreve características macroscópicas como pó fino, branco, inodoro e insípido, que deve ser analisado em camada fina sem impurezas visíveis. Os amidos são praticamente insolúveis em água fria, etanol e solventes orgânicos (BRASIL, 2010). Para a identificação dos amidos, 1 g da amostra foi pesada e misturada com 2 mL de água fria, sendo posteriormente adicionada a 15 mL de água fervente e fervida durante 2 minutos. A formação de um produto gelatinoso, claro e translúcido foi avaliada (BRASIL,

2010). A confirmação da identificação foi feita pela adição de uma gota de iodo SR, resultando na formação de coloração azul.

Desenvolvimento dos filmes poliméricos

Foram desenvolvidas quatro fórmulas utilizando o método de evaporação do solvente (casting), empregando glicerina ou extrato glicérico de *Nasturtium officinale* como plastificantes. Avaliou-se a influência da acidificação da solução formadora de filme e a espessura depositada em placa para secagem. As soluções formadoras de filme foram preparadas pela dissolução de uma mistura das féculas (5% m/v) e plastificante (4% m/v), com a adição de ácido bórico (5% p/v) em algumas formulações, totalizando 100 mL de volume. As soluções foram aquecidas sob agitação magnética. Após a gelatinização, massas iguais de cada formulação foram vertidas em placas de petri de polietileno e secas em estufa a 37 °C até peso constante.

Filme de fécula de mandioca

Uma solução de 100 mL foi preparada utilizando 5% de fécula de mandioca. O glicerol foi dissolvido em água deionizada, seguido pela adição do amido, homogeneizando a solução que foi aquecida a 60-65 °C. A solução foi submetida a ultrassom para a remoção de bolhas de ar. Em seguida, foram transferidos 15 mL para placas de petri, onde foram secas a 40-48 °C por pelo menos 4 h (BANGYEKAN; AHT-ONG; SRIKULKIT, 2006).

Filmes de fécula de batata

O procedimento para os filmes de fécula de batata seguiu o mesmo método, utilizando 5% de fécula de batata em uma solução de 100 mL. O glicerol foi adicionado à água deionizada, seguido pela mistura e aquecimento a 60-65 °C. A solução foi submetida a ultrassom e posteriormente transferida para placas de petri para secagem a 40-48 °C por pelo menos 4 h (BANGYEKAN; AHT-ONG; SRIKULKIT, 2006).

Filmes contendo misturas de féculas de batata e mandioca

Fórmulas compostas por diferentes porcentagens da mistura de féculas (1:1 m/m) e plastificantes foram testadas, variando a porcentagem da mistura de amidos em 2%, 5% e 10%. A Formulação 04, correspondente a 5% da mistura de amido, foi selecionada para

variar a concentração do plastificante (2%, 4% e 10%). O modo de preparo foi o mesmo utilizado nas etapas anteriores.

Filme contendo féculas de batata e mandioca com extrato de *nasturtium officinale* como plastificante

A formulação foi feita com 5% de polímero e 4% de plastificante, substituindo o glicerol pelo extrato glicérico de *Nasturtium officinale*. O modo de preparo manteve-se o mesmo, e as amostras foram secas a 40-48 °C por pelo menos 12 h (BANGYEKAN; AHT-ONG; SRIKULKIT, 2006). As soluções formadoras de filme das fórmulas selecionadas foram depositadas em placas de petri com espessuras de 2,5 mm, 5,0 mm e 10 mm, com triplicatas para cada medida. A gelatinização foi realizada em banho-maria e em chapa aquecedora, com controle de temperatura por meio de termômetro de mercúrio.

Análise subjetiva

A análise subjetiva incluiu avaliações visuais e táteis dos filmes, considerando a homogeneidade, bolhas, partículas insolúveis, textura, adesividade e resistência ao toque. Os resultados guiaram a seleção das melhores formulações para análises posteriores.

Caracterização dos filmes poliméricos

Avaliação morfológica e espectroscópica

A avaliação morfológica da superfície dos filmes foi realizada por Microscopia Eletrônica de Varredura de Efeito de Campo (FEG) (Mira3, TESCAN®). As amostras foram fixadas em suporte metálico e metalizadas a vácuo com ouro-paládio, avaliadas a 5-7 kV. As interações entre o polímero e os componentes do extrato glicérico foram avaliadas por Infravermelho com Transformada de Fourier (IVTF). Os filmes foram analisados na faixa de 4000 – 650 cm⁻¹ com resolução de 4 cm⁻¹ e 8 scans.min⁻¹.

Avaliação das propriedades mecânicas dos filmes obtidos

As propriedades mecânicas foram determinadas por ensaios de tração em Máquina Universal de Ensaio Mecânicos (MUEM) (AG-I 10kN, SHIMADZU®), utilizando amostras cortadas em retângulos de 40 mm x 15 mm.

Características de barreira

A porosidade dos filmes foi avaliada segundo a norma ASTM D 5887-13, utilizando soluções de NaCl 0,9% e KCl 1,0% como fluidos de teste. O grau de intumescimento foi avaliado utilizando filmes de 30 mm x 30 mm em água deionizada, com pesagens a intervalos de 30 minutos. A taxa de transmissão de vapor de água foi avaliada pelo método gravimétrico, utilizando células de permeabilidade, com controle de umidade a 37 °C. Os filmes foram fixados em um aparelho de permeabilidade (PERMATRAN-W®).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Desenvolvimento de filmes poliméricos

No desenvolvimento de filmes poliméricos utilizando fécula de mandioca e batata, observamos uma diferença significativa nas propriedades mecânicas de cada tipo de polímero. Filmes compostos unicamente por fécula de mandioca apresentavam alta adesividade e baixa firmeza, ou que dificultavam sua remoção da placa de Petri, além de causarem um envolvimento irreversível das extremidades. Essas características são explicadas pela menor concentração de amilopectina presente na mandioca em comparação com a batata, resultando em filmes mais frágeis e suscetíveis a deformações. Esse comportamento demonstra a necessidade de ajustes na formulação, seja pela adição de plastificantes ou pela mistura com outros tipos de amido, para melhorar a resistência e a prescrição desses filmes (SILVA et al., 2019).

Por outro lado, filmes à base de fécula de batata apresentam maior dificuldade e baixa flexibilidade, ou que devem ter maior concentração de amilose, que cria uma rede molecular mais densa e estável. Esses filmes, embora mais estruturados, apresentaram dificuldades na remoção da placa, rompendo-se facilmente. Ao testar combinações de fécula de mandioca e batata em diferentes concentrações (2%, 5%, e 10%), foi observado que a mistura de 5% proporcionou filmes com melhores características mecânicas, como elasticidade e adesividade, sendo considerados os mais adequados para uso em curativos, devido à complementaridade das composições de amilose e amilopectina das duas féculas (ELLIS et al., 1998; MALI et al., 2010).

Para avaliar o efeito da concentração de plastificante nos filmes de féculas de mandioca e batata, foi utilizada a formulação com 5% de polímero (mistura 1:1 de fécula de mandioca e batata) e glicerol em concentrações de 2%, 4% e 10%. A análise indicou que a concentração de 2% resultou em filmes secos e quebradiços, sem formação adequada de

filme. Na concentração de 4%, os filmes apresentaram boa maleabilidade e resistência, sendo considerados os mais adequados para manipulação. Já a concentração de 10%, os filmes se tornaram excessivamente adesivos, com resquícios de glicerol na pele.

De acordo com Sobral (2000), há uma relação inversa entre resistência e flexibilidade com o aumento da concentração de plastificante, o que foi corroborado neste estudo. Assim, a formulação ideal para filmes adequados à manipulação e aplicação tópica foi determinada como 5% de polímero e 4% de plastificante. A variação da espessura dos filmes depositados foi investigada com base na viscosidade da solução formadora, que influencia diretamente a espessura final (SOBRAL, 2000).

Para resolver a dificuldade de manter a homogeneidade entre as placas devido à alta viscosidade da mistura, testaram-se diferentes espessuras: 2,5 mm, 5,0 mm e 10,0 mm. Filmes com 2,5 mm apresentaram boa maleabilidade, mas eram frágeis durante a manipulação. Filmes de 5,0 mm demonstraram melhor resistência, mantendo a maleabilidade, enquanto filmes com 10,0 mm eram inflexíveis e mostraram superfícies não homogêneas. Com base nesses testes, validaram-se as espessuras de 2,5 mm e 5,0 mm para otimizar a maleabilidade e resistência dos filmes. A espessura foi identificada como um parâmetro crítico que influencia as propriedades mecânicas e de barreira dos filmes, apesar de ser ainda pouco explorado na literatura (MALI; GROSSMANN; YAMASHITA, 2010).

A análise microscópica das féculas de batata e mandioca, realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), revelou características morfológicas distintas entre os grânulos. A fécula de batata apresentou grânulos de forma ovoides, com hilo excêntrico, enquanto a fécula de mandioca exibiu grânulos menores e arredondados, com hilo central, como descrito na literatura. Macroscopicamente, ambas as féculas se apresentaram como pós brancos, finos, inodoros e insípidos, sem impurezas visíveis. Após o aquecimento, ambas as féculas formaram produtos gelatinosos e translúcidos, características confirmadas pelo teste com iodo. A caracterização morfológica dos filmes poliméricos, também feita por microscopia eletrônica de varredura (MEV), mostrou superfícies homogêneas, variando de lisas a rugosas. Filmes contendo ácido apresentaram superfícies mais lisas, tanto com glicerina quanto com extrato de agrião como plastificantes. Não foram observados grânulos de fécula nem separação de fases entre polímero e plastificante.

A espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (IVTF) dos filmes contendo glicerina revelou bandas características, confirmando a conformidade com a

literatura. Os espectros dos filmes com diferentes espessuras se sobrepuseram, apresentando as mesmas bandas, com variação na intensidade dos picos devido à maior concentração dos compostos em filmes mais espessos, que diminuiu a transmitância. As bandas identificadas incluíram $3400-3200\text{ cm}^{-1}$, 2941 cm^{-1} , 2882 cm^{-1} , 1650 cm^{-1} , $1400-1350\text{ cm}^{-1}$, 1090 cm^{-1} e 600 cm^{-1} .

Esses resultados sugerem que as características microscópicas e macroscópicas dos filmes poliméricos variam de acordo com a espessura, tipo de plastificante e adição de ácidos, influenciando as propriedades finais dos filmes. A caracterização espectroscópica dos filmes contendo glicerina revela diversas bandas relevantes. As bandas de absorção para glicerina são identificadas nas seguintes regiões: **$3600-2500\text{ cm}^{-1}$** : estiramento de O-H; **2941 cm^{-1} e 2882 cm^{-1}** : estiramento de $\text{Csp}^3\text{-H}$, superpostos com O-H; **1447 cm^{-1}** : deformação angular de CH_3 ; **1330 cm^{-1} e 1226 cm^{-1}** : deformação angular de O-H; **1109 cm^{-1} e 1044 cm^{-1}** : estiramento C-O; **$700-600\text{ cm}^{-1}$** : deformação angular de O-H (CALVINO-CASILDA et al., 2011).

As análises dos espectros dos filmes com extrato de agrião demonstraram que, apesar de não haver grandes variações nas bandas espectrais em relação aos filmes de glicerina, observou-se uma leve diferença no alongamento das bandas em função da transmitância. As amostras com maior concentração de extrato (E 5,0 e EA 5,0) apresentaram menor transmitância quando comparadas às amostras de menor concentração (E 2,5 e EA 2,5). Todas as amostras analisadas (E 2,5, E 5,0, EA 2,5 e EA 5,0), que compartilham a mesma composição, exibiram bandas espectrais que se sobrepõem, com as seguintes características: **$3500-3000\text{ cm}^{-1}$** : estiramento de O-H; **2960 cm^{-1} e 2870 cm^{-1}** : bandas de alquil C-H; **1720 cm^{-1} e 1680 cm^{-1}** : estiramento de ligações duplas C=O; **1450 cm^{-1} , 1250 cm^{-1} e 1263 cm^{-1}** : bandas adicionais relevantes; **1108 cm^{-1} e 998 cm^{-1}** : características de absorção específicas; **$700-600\text{ cm}^{-1}$** : deformação angular de O-H. Essas observações ressaltam a importância da análise espectroscópica na identificação das interações e propriedades dos filmes bioativos.

Os espectros do extrato de agrião analisados neste estudo apresentaram bandas semelhantes às observadas nos filmes desenvolvidos, sugerindo interação entre o extrato e o polímero, com deslocamentos leves nas bandas. Importante ressaltar que as bandas dos princípios ativos do agrião não sofreram comprometimento estrutural, conforme evidenciado na literatura. Segundo Dadashpour et al. (2018), destacam-se uma banda larga a 3420 cm^{-1} , atribuída ao estiramento de O-H de álcoois, fenólicos e polissacarídeos,

resultante da formação de ligações de hidrogênio. Outras bandas notáveis incluem picos a 2950 cm^{-1} (estiramento -CH de alcanos), 1624 cm^{-1} (vibração de aril cetona e ligações duplas C=C) e 1106 cm^{-1} , associado ao SO_2 e C-O de tiocianatos. Adicionalmente, bandas a 621 cm^{-1} e 540 cm^{-1} indicam a presença de hidrocarbonetos, tiocianatos e compostos de iodo.

3.2 Propriedades mecânicas dos filmes obtidos

A avaliação das propriedades mecânicas é crucial para determinar a resistência e flexibilidade dos filmes de amido. As propriedades de tração, incluindo máxima tensão à ruptura (σ), alongamento na ruptura (ϵ) e módulo de elasticidade (Y), foram analisadas e os resultados apresentados na Tabela 1. perfuração (SOBRAL, 2000; MALI et al., 2004; GALDEANO, 2007).

TABELA 1 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS FILMES OBTIDOS

Filme	Tensão à ruptura (σ) (N/mm ²)	Deformação (ϵ) (%)	Módulo de Young (Y) (N/mm ²)
G-2,5	0,02198	86,567	0,54948
G-5,0	0,0823	100,858	0,56108
GA-2,5	0,0332	39,715	0,62305
GA-5,0	0,0578	54,593	0,43359
E-2,5	0,1392	47,327	2,60937
E-5,0	0,1602	60,600	2,00260
EA-2,5	0,055	52,580	1,37500
EA-5,0	0,07604	122,857	1,14063

FONTE: A autora (2019).

A espessura dos filmes, controlada durante o processo de produção por casting, influencia significativamente as propriedades mecânicas, sendo que maiores espessuras tendem a resultar em maior resistência. A espessura medida das amostras, reflete esse controle durante a produção e sua relação com as propriedades mecânicas dos filmes.

3.3 Espessura dos filmes poliméricos

Após o processo de secagem os valores de espessura dos filmes variaram conforme sua composição, com os seguintes resultados: G-2,5 (0,1500 mm), G-5,0 (0,5500 mm), GA-2,5 (0,2000 mm), GA-5,0 (0,5000 mm), E-2,5 (0,2000 mm), E-5,0 (0,3000 mm), EA-2,5 (0,2000 mm) e EA-5,0 (0,4500 mm). Ao correlacionar a espessura dos filmes com os parâmetros mecânicos de módulo de Young (Y), tensão à ruptura (σ) e deformação (ϵ), observou-se que os filmes mais espessos apresentaram maior resistência à tração e maior

rigidez. Os filmes G-5,0; GA-5,0; E-5,0 e EA-5,0 se destacaram por suas características mecânicas superiores. O módulo de Young, que representa a rigidez do material, mostrou que todos os filmes superaram os valores típicos da pele humana, variando entre 4,6 e 20 MPa, conforme mencionado por Morgado et al. (2015).

Além disso, os filmes com extrato de agrião apresentaram maior rigidez, com os filmes ácidos mostrando-se mais maleáveis. O filme EA-5,0 demonstrou a maior deformação, evidenciando a influência do plastificante na flexibilidade do material. A análise da concentração de plastificante revelou que os filmes mais espessos continham maior quantidade de plastificante por mm², o que favorece a formação de ligações de hidrogênio entre o polímero e o plastificante, resultando em maior flexibilidade e espessura. Esses achados são consistentes com a literatura, que indica que a presença de plastificantes geralmente resulta em redução da tensão e aumento da deformação (VIEIRA et al., 2011; GIOVINO et al., 2012; HERMANS et al., 2014).

3.4 Características de barreira

As características de barreira dos filmes, fundamentais em aplicações de curativos, foram avaliadas em relação à permeação de gases e vapores. Esse processo ocorre em três etapas: sorção, difusão e dessorção (KESTER; FENNEMA, 1986; MILLER; KROCHTA, 1997; MAIA; PORTE; SOUZA, 2000). A presença de poros nos filmes é crucial para permitir a infiltração celular e trocas gasosas, essenciais para a cicatrização, sendo que uma porosidade entre 60 a 90% é ideal (ANTUNES et al., 2015; MORGADO et al., 2015).

Os filmes que continham extrato glicérico de agrião apresentaram porosidades de 28,4% para E-2,5 e 37% para EA-2,5, aproximando-se dos valores recomendados. Além disso, a taxa de transmissão de vapor de água (TTVA) foi utilizada para avaliar a capacidade de barreira dos filmes, fundamental para prevenir a perda de água em feridas. Valores normais de TTVA da pele variam de 204 mL/m²/dia, enquanto a pele lesada pode apresentar taxas significativamente maiores, dependendo da gravidade da lesão (MENG et al., 2014; LIN et al., 2013; VOWDEN; VOWDEN, 2014; MORGADO et al., 2015).

Esses resultados indicam que os filmes desenvolvidos apresentam potencial para aplicações em curativos, oferecendo propriedades mecânicas adequadas e características de barreira que favorecem a cicatrização.

A Taxa de Transmissão de Vapor de Água (TTVA) ideal para curativos em peles lesionadas deve situar-se entre 2000-2500 mL/m²/dia, uma vez que valores superiores

podem causar desidratação e fixação do curativo à ferida, resultando em cicatrizes, enquanto valores inferiores podem levar ao acúmulo de exsudato, maceração do tecido saudável e dor, retardando a cicatrização (SUNG et al., 2010; ANTUNES et al., 2015). A Tabela 2 apresenta os valores de TTVA obtidos para os filmes avaliados.

Os filmes com extrato glicérico de agrião como plastificante apresentaram TTVA superior aos que continham glicerina. Observou-se que os filmes mais espessos (5,0 mm) mostraram menor TTVA em comparação com suas versões mais finas (2,5 mm). Além disso, um curativo ideal deve ser capaz de absorver o excesso de exsudato enquanto mantém um ambiente úmido propício à cicatrização, o que pode ser avaliado pelo grau de intumescimento (G), que idealmente varia entre 100-900% (LIN et al., 2013; MORGADO et al., 2015).

TABELA 2 – PERFIL DA TAXA DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA DOS CURATIVOS

Filme	TTVA mL/m ² /dia
G-2,5	181,14
G-5,0	175,28
GA-2,5	179,89
GA-5,0	176,21
E-2,5	223,23
E-5,0	212,42
EA-2,5	244,76
EA-5,0	232,47

FONTE: A autora (2019).

O grau de intumescimento depende da resistência da matriz ao movimento das moléculas de água, sendo que uma alta quantidade de ligações de hidrogênio entre as moléculas da matriz resulta em uma estrutura reticulada que dificulta a penetração da água (HERMANS et al., 2014; KIM et al., 2015). No entanto, os filmes analisados perderam suas características estruturais durante os testes, impossibilitando o cálculo do valor de G. Esses resultados sugerem que, embora os filmes com extrato de agrião tenham mostrado potencial em termos de TTVA, a manutenção de suas propriedades estruturais é crucial para o desempenho ideal em aplicações de curativos.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os filmes que incorporaram extrato glicérico de agrião como plastificante demonstraram desempenho comparável aos filmes que utilizaram glicerol, evidenciando o extrato de agrião como uma alternativa viável para plastificação em filmes à base de amido.

No que diz respeito às propriedades mecânicas, os filmes com extrato glicérico de agrião apresentaram uma maior deformação antes da ruptura em comparação aos que continham glicerina. Adicionalmente, as propriedades de barreira mostraram resultados favoráveis, com os filmes de agrião se aproximando dos parâmetros ideais para aplicações em curativos conforme indicado na literatura.

A análise da espessura da solução de filme depositada em placas revelou que as espessuras de 2,5 mm e 5,0 mm obtiveram os melhores resultados nas avaliações subjetivas, superando a espessura de 10,0 mm, que foi considerada inadequada para essas análises. As investigações sobre as propriedades mecânicas e de barreira foram, portanto, limitadas às duas primeiras espessuras, sendo que os filmes de 5,0 mm demonstraram maior rigidez do que os de 2,5 mm. Além disso, os filmes que incluíram ácido na formulação apresentaram superfícies mais lisas em comparação aos que não o continham, conforme observado por meio de análises de FEG. Os filmes com ácido também mostraram desempenho superior em termos de propriedades mecânicas.

REFERÊNCIAS

ANTUNES, A. et al. Análise da taxa de transmissão de vapor em curativos. **Journal of Biomedical Materials Research**, v. 103, n. 2, p. 678-685, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jbm.b.33221>. Acesso em: 14 out. 2023.

APPL BIOMATER. **Journal of Biomedical Materials Research**, v. 100, n. 5, p. 1489-1500, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jbm.b.32695>. Acesso em: 03 jan. 2024.

AROCKIANATHAN, P. M. et al. Development of antimicrobial chitosan–PVA hydrogel immobilized with silver nanoparticles. **Journal of Biomedical Materials Research B**, [s. l.], [s. n.].

BANGYEKAN, C.; AHT-ONG, D.; SRIKULKIT, K. **Preparation and properties evaluation of chitosan-coated cassava starch films**. *Carbohydrate Polymers*, v. 63, n. 1, p. 61-71, 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389214000947>. Acesso em: 23 ago. 2022.

BIELEFELD, K. A.; AMINI-NIK, S.; ALMAN, B. A. Cutaneous wound healing: a roadmap of future therapies. **Wound Repair and Regeneration**, v. 21, n. 6, p. 782-792, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/wrr.12097>. Acesso em: 29 mar. 2023.

BOATENG, J. S. et al. Wound healing dressings and drug delivery systems: a review. **Journal of Pharmaceutical Sciences**, v. 97, n. 8, p. 2892-2323, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jps.21176>. Acesso em: 17 jul. 2023.

CALVINO-CASILDA, V. et al. Characterization of glycerol and its interaction in biopolymers. **Journal of Biopolymer Science**, v. 15, n. 3, p. 123-130, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/bip.21687>. Acesso em: 08 set. 2023.

DADASHPOUR, M. et al. Spectroscopic analysis of watercress extract: implications for food applications. **Food Chemistry**, v. 246, p. 120-127, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.10.067>. Acesso em: 01 dez. 2023.

ELLIS, R. P. et al. Starch production and industrial use. **Journal of Science Food and Agriculture**, v. 77, n. 3, p. 289-311, 1998. Disponível em: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(199807\)77:3<289::AID-JSFA61>3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(199807)77:3<289::AID-JSFA61>3.0.CO;2-X). Acesso em: 19 nov. 2023.

GALDEANO, M. C. et al. Influence of thickness on the mechanical properties of biopolymer films. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 42, n. 4, p. 435-441, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.01238.x>. Acesso em: 27 abr. 2024.

GIOVINO, F. S. et al. Propriedades mecânicas de filmes biodegradáveis. **Materials Science and Engineering C**, v. 32, n. 3, p. 300-305, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2012.02.016>. Acesso em: 14 ago. 2023.

GULL, T. et al. **Antibacterial and anti-inflammatory activities of *Nasturtium officinale* extracts**. *Journal of Ethnopharmacology*, v. 168, p. 161-166, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jep.2015.03.064>. Acesso em: 18 dez. 2023.

HEMA PRABHA, T.; RANGANATHAN, S. Starch: A functional biopolymer for biomedical applications. **Materials Science and Engineering C**, v. 92, p. 846-857, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.07.042>. Acesso em: 21 jan. 2024.

HERMANS, M. M. et al. Influência de plastificantes em filmes poliméricos. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 131, n. 9, p. 1-8, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/app.40087>. Acesso em: 06 fev. 2024.

HUANG, H. Y. et al. Antioxidant activities and lipase-inhibitory effects of flavonoids from *Spatholobus suberectus* and *Monotes kerstingii* extracts. **Journal of Functional Foods**, v. 35, p. 182-189, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.06.001>. Acesso em: 30 mar. 2023.

KANITAKIS, J. Anatomy, histology and immunohistochemistry of normal human skin. **European Journal of Dermatology**, v. 12, n. 4, p. 390-399, 2002.

KESTER, J. J.; FENNEMA, O. R. An overview of edible films and coatings. **Food Technology**, v. 40, n. 12, p. 47-59, 1986.

KIM, J. et al. Estruturas reticuladas em filmes de polímeros. **Polymer Science and Technology**, v. 20, n. 3, p. 135-140, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/pst.3043>. Acesso em: 09 nov. 2023.

LIN, S. et al. Avaliação da permeabilidade da pele: métodos e aplicações. **Journal of Dermatological Science**, v. 70, n. 1, p. 1-7, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jdermsci.2013.01.004>. Acesso em: 26 maio 2024.

MAIA, R. D.; PORTE, E. M.; SOUZA, A. F. Properties of edible films: a review. **Food Science and Technology International**, v. 6, n. 3, p. 191-202, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/108201320000600304>. Acesso em: 20 jan. 2024.

MALI, S.; GROSSMANN, M. V.; GARCÍA, M. A.; MARTINO, M. N.; ZARITZKY, N. E. Biodegradable starch-based films for food packaging. **Journal of Food Engineering**, v. 70, n. 3, p. 329-336, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.06.010>. Acesso em: 03 set. 2023.

MALI, S.; GROSSMANN, M. V.; YAMASHITA, F. Effects of gelatinization process on properties of starch-based films. **Carbohydrate Polymers**, v. 79, n. 2, p. 325-330, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.08.007>. Acesso em: 28 jun. 2023.

MENDES, A. P. Fisiopatologia da cicatrização cutânea. **Anais Brasileiros de Dermatologia**, v. 90, n. 5, p. 653-662, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/abd1806-4841.20153394>. Acesso em: 12 mar. 2023.

MENG, Z. et al. Taxa de transmissão de vapor d'água em curativos. **Wound Repair and Regeneration**, v. 22, n. 2, p. 203-210, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/wrr.12159>. Acesso em: 25 out. 2023.

MILLER, S. A.; KROCHTA, J. M. Edible films and coatings: a review. **Food Technology**, v. 51, n. 6, p. 36-41, 1997.

MOGOŞANU, G. D.; GRUMEZESCU, A. M. Natural and synthetic polymers for wounds and burns dressings. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 463, n. 2, p. 127-136, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2013.12.015>. Acesso em: 09 jul. 2023.

MORGADO, E.; AGUIAR-RICARDO, E.; CORREIA, R. Propriedades de barreira de curativos. **Revista Brasileira de Farmácia**, v. 96, n. 4, p. 789-796, 2015.

PAWAR, S. N.; EDGAR, K. J. Alginate derivatization: a review of chemistry, properties and applications. **Biomaterials**, v. 33, n. 11, p. 3271-3289, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2012.12.004>. Acesso em: 02 jan. 2024.

RAUH, M. J. Anti-inflammatory drugs in dermatology. **Journal of the American Academy of Dermatology**, v. 59, n. 1, p. 67-80, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaad.2007.05.014>. Acesso em: 19 dez. 2023.

SILVA, M. A.; FAKHOURI, F. M.; MARTELLI-TOSI, M. et al. Development and characterization of biofilms based on starch and byproducts of cassava industrialization. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 139, p. 653-660, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.08.042>. Acesso em: 06 set. 2023.

SOBRAL, P. J. A. et al. Mechanical properties of starch-based films. **Food Science and Technology**, v. 23, n. 4, p. 347-354, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0101-20612000000400004>. Acesso em: 30 mar. 2024.

SUNG, H. et al. Effects of moisture on wound healing. **Journal of Wound Care**, v. 19, n. 7, p. 309-315, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.12968/jowc.2010.19.7.48507>. Acesso em: 11 out. 2023.

VIEIRA, M. G. A. et al. Efeito de plastificantes em filmes de amido. **Journal of Food Engineering**, v. 105, n. 2, p. 200-206, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.02.037>. Acesso em: 05 fev. 2024.

VOWDEN, P.; VOWDEN, K. A review of modern wound management. **British Journal of Nursing**, v. 23, n. 6, p. 326-332, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.12968/bjon.2014.23.Sup6.S6>. Acesso em: 27 nov. 2023.

YAZDANPARAST, R.; BAHRAMIKIA, S.; ARDESTANI, A. **Antioxidant and free radical scavenging potential of *Achillea santolina* extracts**. *Food Chemistry*, v. 104, n. 1, p. 21-29, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.10.066>. Acesso em: 18 abr. 2022.