PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE FILMES BIOPOLIMÉRICOS À BASE DE QUITOSANA E POLIURETANO OBTIDO A PARTIR DO ÓLEO DE SOJA

PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF CHITOSAN-BASED BIOPOLYMERIC FILMS CONTAINING POLYURETHANE DERIVED FROM SOYBEAN OIL

Adriéli Medeiros [1] , Natália Borba[2] , Wladimir Hernandez Flores [3,4] , Catarina Motta De Moura [1,4], Valéria Terra Crexi [1,4]

[1] Engenharia de Alimentos, Unipampa - Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA). Bagé, RS, Brasil; [2] Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais - Universidade Federal do Pampa. (UNIPAMPA) Bagé, RS, Brasil; [3] Licenciatura em Física - Universidade Federal do Pampa. (UNIPAMPA) Bagé, RS, Brasil; [4] Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais. (UNIPAMPA) Bagé, RS, Brasil

Resumo: A crescente preocupação com os impactos ambientais associados à produção e ao descarte de materiais plásticos tem incentivado pesquisas voltadas ao desenvolvimento de alternativas provenientes de fontes renováveis. Nesse contexto, os óleos vegetais destacam-se como matérias-primas promissoras para a produção de materiais poliméricos. O presente trabalho teve como objetivo produzir e caracterizar filmes biopoliméricos à base de quitosana (Q) e poliuretano (PU) sintetizado a partir de poliol obtido do óleo de soja, avaliando suas propriedades físico-químicas, mecânicas, ópticas e morfológicas. Inicialmente, o poliol foi obtido por meio da modificação química do óleo de soja, utilizando reação de epoxidação, seguida das etapas de neutralização, secagem e purificação. Posteriormente, o poliuretano foi sintetizado pela reação entre o poliol e o 1,6-diisocianato de hexano (HDI), sob vácuo, à temperatura de 80°C por 2 h. Os filmes biopoliméricos foram produzidos pela técnica *casting*, sendo avaliadas duas formulações, F1 (100% Q), F2 (75% Q/ 25% PU). A caracterização físico-química do óleo de soja e do poliol compreendeu a determinação do índice de acidez (IA) e da viscosidade (V), além do índice de hidroxila (IOH) para o poliol. Os filmes foram avaliados quanto à espessura (E), resistência à tração (RT), alongamento na ruptura (AR), variação de cor (ΔCor) e morfologia superficial por microscopia eletrônica de varredura associada à espectroscopia de raios X por dispersão de energia (MEV-EDS). Os resultados demonstraram que o índice de acidez aumentou de 0,933 ± 0,005 para 1,596 ± 0,006 mg KOH g^{-1} após a modificação química do óleo, enquanto a viscosidade passou de 59,5 ± 0,30 para 72,3 ± 0,20 cP. O poliol apresentou índice de hidroxila de 225,75 ± 1,03 mg KOH g^{-1}, indicando a presença de grupos funcionais de interesse para a síntese do poliuretano. Em relação aos filmes, a formulação F2 apresentou redução da RT de 13,61 ± 0,26 para 2,71 ± 0,05 MPa e aumento do AR de 4,10 ± 0,25% para 7,13 ± 0,72%, quando comparado com a formulação F1, evidenciando maior capacidade de deformação. A espessura da formulação F2 apresentou pequena redução, de 0,08±0,01 para 0,07 ± 0,00 mm, enquanto a variação de cor aumentou de 14,18 ± 0,98 para 45,44 ± 1,98, quando comparadas com a formulação F1. As micrografias obtidas por MEV evidenciaram diferenças morfológicas entre as formulações, sendo observada uma superfície aparentemente mais uniforme no filme contendo poliuretano. A análise

por EDS identificou diferenças na composição elementar superficial dos materiais. Conclui-se que o óleo de soja apresenta potencial como matéria-prima renovável para a obtenção de poliol e sua aplicação na produção de filmes biopoliméricos à base de quitosana e poliuretano. A incorporação do PU modificou as propriedades mecânicas dos filmes, proporcionando maior capacidade de alongamento, embora acompanhada de redução na RT. Dessa forma, são necessárias análises complementares para avaliar a adequação dos materiais a aplicações específicas.

Palavras-chave: Óleo de soja; Poliuretano; Filmes biopoliméricos

Abstract: The growing concern about the environmental impacts associated with the production and disposal of plastic materials has encouraged research aimed at developing alternatives from renewable sources. In this context, vegetable oils stand out as promising raw materials for the production of polymeric materials. The present study aimed to produce and characterize biopolymeric films based on chitosan (Q) and polyurethane (PU) synthesized from polyol obtained from soybean oil, evaluating their physicochemical, mechanical, optical, and morphological properties. Initially, the polyol was obtained through the chemical modification of soybean oil using an epoxidation reaction, followed by neutralization, drying, and purification steps. Subsequently, the polyurethane was synthesized by reacting the polyol with 1,6-hexamethylene diisocyanate (HDI) under vacuum at 80°C for 2 h. The biopolymeric films were produced by the casting technique, and two formulations were evaluated: one film consisting of 100%CH and another composed of 75%CH/25%PU. The physicochemical characterization of the soybean oil and the polyol included determining the acid value (AV) and viscosity (V), in addition to the hydroxyl value (HV) for the polyol. The films were evaluated for thickness (T), tensile strength (TS), elongation at break (EB), color variation (ΔColor), and surface morphology by scanning electron microscopy coupled with energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDS). The results showed that the acid value increased from 0.933 ± 0.005 to 1.596 ± 0.006 mg KOH·g^{-1} after the chemical modification of the oil, while the viscosity increased from 59.5 ± 0.30 to 72.3 ± 0.20 cP. The polyol showed a hydroxyl value of 225.75 ± 1.03 mg KOH·g^{-1}, indicating the presence of functional groups of interest for polyurethane synthesis. Regarding the films, formulation F2 showed a reduction in tensile strength from 13.61 ± 0.26 to 2.71 ± 0.05 MPa and an increase in elongation at break from 4.10 ± 0.25% to 7.13 ± 0.72% compared with formulation F1, indicating greater deformation capacity. The thickness of formulation F2 showed a slight decrease, from 0.08 ± 0.01 to 0.07 ± 0.00 mm, while the color variation increased from 14.18 ± 0.98 to 45.44 ± 1.98 when compared with formulation F1. SEM micrographs revealed morphological differences between the formulations, with an apparently more uniform surface observed in the film containing polyurethane. EDS analysis identified differences in the surface elemental composition of the materials. It is concluded that soybean oil has potential as a renewable raw material for obtaining polyol and its application in producing chitosan- and polyurethane-based biopolymeric films. The incorporation of PU modified the mechanical properties of the films, providing greater elongation capacity, although accompanied by a reduction in TS. Therefore, additional analyses are necessary to assess the suitability of the materials for specific applications.

Keyword: Soybean oil; Polyurethane; Biopolymeric films.

INTRODUÇÃO

A utilização de materiais plásticos em diferentes setores industriais tem intensificado as preocupações relacionadas aos impactos ambientais decorrentes de sua produção e descarte inadequado. Embora sejam amplamente empregados devido à resistência, durabilidade e versatilidade, grande parte desses materiais é produzida a partir de derivados do petróleo e possui baixa capacidade de degradação no meio ambiente, favorecendo o acúmulo de resíduos. Esse cenário evidencia a necessidade de desenvolver alternativas que reduzam a dependência de recursos não renováveis e incentivem o uso de matérias-primas de origem sustentável (OECD, 2022).

Nesse contexto, o desenvolvimento de materiais provenientes de fontes renováveis está relacionado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU) por meio da Agenda 2030. Destacam-se o ODS 9, voltado à indústria, inovação e infraestrutura; o ODS 12, relacionado ao consumo e à produção responsáveis; e o ODS 13, direcionado às ações de enfrentamento das mudanças climáticas. Essas diretrizes incentivam a pesquisa de tecnologias e processos produtivos que contribuam para a utilização mais eficiente dos recursos naturais (ONU, 2015).

Entre as matérias-primas renováveis utilizadas na produção de materiais poliméricos, destacam-se os óleos vegetais, especialmente o óleo de soja (Glycine max), devido à sua disponibilidade e composição química. As ligações duplas presentes nos ácidos graxos permitem a realização de modificações químicas para a obtenção de polióis, compostos caracterizados pela presença de grupos hidroxila (–OH). Esses grupos possibilitam a reação com isocianatos para a formação de poliuretanos (PU), polímeros utilizados em diferentes aplicações industriais, incluindo revestimentos, adesivos e filmes. Dessa forma, a utilização do óleo de soja permite incorporar componentes de origem renovável à produção de materiais poliuretânicos, reduzindo parcialmente a dependência de matérias-primas petroquímicas (Monteavaro, 2005; Petrović, 2008; Cangemi et al., 2009).

Entre os materiais investigados para a produção de filmes biopoliméricos, destaca-se a quitosana, um polissacarídeo obtido pela desacetilação da quitina. Suas características, como capacidade de formação de filmes, biodegradabilidade e atividade antimicrobiana, favorecem o interesse por sua utilização em embalagens e revestimentos. Entretanto, os filmes constituídos exclusivamente por quitosana podem apresentar limitações relacionadas às propriedades mecânicas e à sensibilidade à umidade. Nesse sentido, a combinação da quitosana com outros materiais poliméricos, como o poliuretano, constitui uma alternativa para modificar suas características e investigar novas possibilidades de aplicação (Aider, 2010; Azevedo et al., 2020; Xue et al., 2023).

Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo produzir e caracterizar filmes biopoliméricos à base de quitosana e poliuretano sintetizado a partir de poliol obtido do óleo de soja. Foram avaliadas duas formulações, sendo F1 (100% Q) e F2 (75% Q/ 25% PU). A pesquisa compreendeu a caracterização físico-química do óleo de soja e do poliol, por meio das análises de índice de acidez, viscosidade e índice de hidroxila, além da avaliação das propriedades físicas, mecânicas, ópticas e morfológicas dos filmes produzidos, buscando contribuir para o desenvolvimento de materiais poliméricos com componentes provenientes de fontes renováveis.

METODOLOGIA

A Figura 1 representa as etapas utilizadas para obtenção e caracterização do poliol de óleo de soja, produção do poliuretano e sua aplicação em filmes biopoliméricos.



Figura 1. Etapas da produção do poliol de óleo, de poliuretano e suas aplicações em filmes biopoliméricos.
Fonte: Autores, 2026.

Matérias-primas e reagentes

Poliol

A matéria-prima utilizada na síntese do poliol foi óleo de soja, adquirido no comércio local no município de Bagé/RS. Os reagentes utilizados na síntese do poliol foram ácido fórmico, peróxido de hidrogênio, água destilada, álcool etílico, cloreto de sódio, sulfato de sódio anidro e carbonato de sódio, todos de padrão analítico.

Poliuretano (PU)

O reagente utilizado na reação de policondensação para produção do poliuretano foi o 1,6 –Diisocianato de Hexano (HDI).

Filmes biopoliméricos

Na formulação dos filmes biopoliméricos os reagentes utilizados foram quitosana, ácido acético, glicerol P.A., poliuretano (sintetizado a partir do poliol de óleo de soja) e água destilada.

Metodologia experimental

Produção do Poliol

Na síntese do poliol foram utilizadas condições experimentais segundo Klein (2023) com algumas adaptações. Ao óleo de soja foi adicionado ácido fórmico a temperatura ambiente e peróxido de hidrogênio 30% em banho de gelo, na relação molar de óleo de soja/ácido fórmico/peróxido de hidrogênio de 1:3:2, respectivamente. O sistema foi aquecido à 85°C em banho Dubnoff com agitação constante, durante 6 h.

Após o poliol foi neutralizado e seco, a etapa de neutralização foi realizada com a adição de soluções aquosas de carbonato de sódio (Na_2CO_3) a 10% e cloreto de sódio (NaCl) a 30%, até atingir valores neutros de pH. Na etapa de redução de umidade foi adicionado sulfato de sódio anidro (Na_2SO_4) ao poliol, mantendo-se por 24 h ao abrigo da luz, onde após este período, o agente secante foi retirado por filtração e o poliol mantido em funil de separação por 24 h, protegido da luz. Após, o poliol foi evaporado para retirada do peróxido de hidrogênio e ácido fórmico em rota-evaporador sob vácuo a temperatura de 60°C (Figura 2).



Figura 2. Etapas da produção do poliol de óleo de soja.
Fonte: Autores 2026.

Produção do Poliuretano (PU)

O PU utilizado na produção dos filmes biopoliméricos foi obtido por reação de policondensação entre 1 equivalente-grama de 1,6 diisocianato de hexano e 1 equivalente-grama do poliol de óleo de soja. A reação foi realizada sob atmosfera modificada (vácuo) à 80°C por 2 h (Sarojini K., et al. 2018).



Figura 3. Etapas de obtenção do poliuretano (PU)

Fonte: Autores 2026.

Produção dos filmes biopoliméricos

Os filmes biopoliméricos foram elaborados pela técnica *casting*. Todas as soluções filmogênicas foram preparadas com 1,0 g de sólidos secos (g), de modo a permitir a comparação entre as formulações. As formulações utilizadas foram F1 (100% Q), F2 (75% Q/ 25% PU), para a formulação F1, a quitosana foi dissolvida em solução de ácido acético 0,1 mol·L^{-1}, sob agitação constante (300 rpm) à temperatura ambiente (25 ± 1°C) por 24 h. Após a completa dissolução, adicionou-se 0,3 g de glicerol para agir como plastificante. A solução formadora de filme foi então filtrada sob vácuo (400 mmHg) (Figura 4), conforme metodologia descrita por Moura (2018).



Figura 4. Etapas da produção dos filmes de quitosana.

Fonte: Autores 2026.

Na formulação F2, o poliuretano (25%) foi previamente dissolvido em dimetilformamida (DMF), sob agitação constante (300 rpm) à temperatura ambiente (25 ± 1 °C) por 24 h. Em seguida, a solução de poliuretano foi incorporada à solução de quitosana previamente preparada, resultando na mistura filmogênica.

A representação esquemática do processo de elaboração dos filmes da formulação F2 encontra-se na Figura 5.



Figura 5. Etapas da produção dos filmes de quitosana com poliuretano.
Fonte: Autores 2026.

Após a homogeneização, todas as soluções foram vertidas em placas de Petri e submetidas à secagem controlada (40°C por 48 h), permitindo a formação dos filmes.

Metodologia analítica

Caracterização do óleo de Soja e do poliol

As análises realizadas para caracterização do óleo foram índice de acidez (IA), viscosidade. Para caracterização do poliol foram realizadas as mesmas análises do óleo, acrescido do índice de hidroxila (IOH).

Índice de acidez (IA)

A análise do índice de acidez foi realizada conforme a metodologia do Instituto Adolfo Lutz (2008), e determinada pela Equação 1.

$$IA = \frac{(V_a - V_b) \times N \times 56{,}1}{m_a} \quad (1)$$

onde: IA o índice de acidez (mg de NaOH g^{-1}); N a normalidade da solução de NaOH; V_b volume gasto na titulação do branco (mL); V_a volume gasto na titulação da amostra (mL); m_a a massa da amostra (g).

Viscosidade (V)

A viscosidade foi determinada utilizando o viscosímetro de Brookfield. O modelo utilizado foi o viscosímetro digital do modelo ALPHA R da marca Fungilab, equipado com cilindros de diâmetros diferentes, ou também chamado de spindles. Utilizou-se o spindle LV1 e rotação de 60 rpm.

Índice de hidroxila (IOH)

Para a determinação do índice de hidroxila foi utilizada a norma ASTM D 1957- 86 (ASTM, 2017). Em erlenmeyers de 250 mL, foi colocada a massa de amostra de acordo com a possível quantidade de hidroxila exemplificada na norma. Foi adicionado 5,0 mL de uma solução de piridina e anidrido acético na proporção 3:1, e colocado em refluxo por 1 h, aproximadamente, mantendo-se o material em banho-maria na temperatura de aproximadamente 90°C.

Após o refluxo, com a solução a temperatura ambiente adicionou-se 10 mL de água e 25,0 mL de álcool n-butílico, em seguida titulou-se a solução com KOH alcoólico 0,5 mol·L-1, utilizando como indicador fenolftaleína. As análises foram feitas em triplicata e para o cálculo do índice de hidroxila utilizou-se a Equação 2.

$$IOH = \frac{(V_b - V_a) + (m_{aIAc} + V_{IAc}) - V_{KOH}}{m_a} \quad (2)$$

onde: Vb o volume da solução padrão de KOH alcoólica gasto com a amostra em branco (mL); V_{KOH} o volume da solução padrão de KOH alcoólica gasto com a amostra (mL); V_{IAC} o volume da solução padrão de KOH alcoólica gasto na determinação do índice de acidez (mL); m_a massa de amostra (g); m_{aIAC} a massa de amostra em gramas utilizadas na determinação do índice de acidez da amostra (g).

Caracterização dos filmes biopoliméricos

Espessura (E)

Para análise da espessura dos filmes foi utilizado o método descrito por Moura et al. (2015) utilizando um micrômetro digital, onde foram realizadas dez medidas de maneira aleatória na superfície da amostra.

Resistência à tração (RT) e alongamento na ruptura (AT)

As propriedades mecânicas dos filmes biopoliméricos foram avaliadas por meio das análises de resistência à tração (RT) e alongamento na ruptura (AR), utilizando um texturômetro, com base na metodologia estabelecida pela norma ASTM D882, destinada à determinação das propriedades de tração de filmes e materiais plásticos de pequena espessura.

Para a realização das análises, as amostras dos filmes foram cortadas em dimensões padronizadas e fixadas nas garras do equipamento. Durante o ensaio, os filmes foram submetidos à aplicação de uma força de tração, com velocidade controlada, até ocorrer sua ruptura. A partir dos dados registrados pelo equipamento, foram determinados os valores de resistência à tração e

alongamento na ruptura, possibilitando avaliar a resistência mecânica e a capacidade de deformação dos filmes (ASTM, 2026).

A resistência à tração foi determinada pela relação entre a força máxima suportada pela amostra antes da ruptura e a área inicial de sua seção transversal, conforme a Equação 3.

$$RT = \frac{Fmáx}{A} \quad (3)$$

onde: RT é aresistência à tração (MPa); $F_{máx}$ é força máxima aplicada antes da ruptura (N); A é área inicial da seção transversal do filme (m^2).

O alongamento na ruptura foi determinado a partir da variação do comprimento da amostra durante o ensaio, em relação ao comprimento inicial entre as garras do equipamento, conforme a Equação 4.

$$AR(\%) = \frac{Lf - Li}{Li} \times 100 \quad (4)$$

onde: AR é o alongamento na ruptura (%); L_f é o comprimento no momento da ruptura (mm); L_i é o comprimento inicial da amostra (mm).

Variação de cor (∆Cor)

A avaliação da cor dos filmes biopoliméricos foi realizada por meio de um colorímetro, utilizando o sistema de coordenadas CIELAB, que permite determinar quantitativamente as características de cor dos materiais. Nesse sistema, são avaliados três parâmetros: L*, que representa a luminosidade, variando do preto ao branco; a*, que corresponde à variação entre as tonalidades verde e vermelha; e b*, que representa a variação entre as tonalidades azul e amarela.

Na realização da análise, as amostras dos filmes foram posicionadas sobre uma superfície de referência padronizada, sendo realizadas leituras em

diferentes pontos de sua superfície. Os valores obtidos para L*, a* e b* permitem determinar a diferença total de cor (ΔCor) entre as amostras, utilizando o filme de referência definido no procedimento experimental. O cálculo foi realizado com base no sistema CIELAB, conforme a metodologia de diferença de cor descrita pela ASTM D2244 (ASTM, 2025). A diferença total de cor é determinada conforme a Equação 5.

$$\Delta cor = \sqrt{[(L - L_0)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2]} \quad (5)$$

onde: ΔCor é variação total de cor; L*, a* e b* são parâmetros colorimétricos da amostra; L_0*, a_0* e b_0* são parâmetros colorimétricos da referência.

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A morfologia e a composição elementar dos filmes de quitosana (F1) e de quitosana com poliuretano (F2) foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de raios X por dispersão de energia (MEV-EDS), observada com ampliação de 1000x a 10 kV.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A caracterização do óleo de soja (OS) e do poliol do óleo de soja (POS) com relação ao índice de acidez (IA), a viscosidade (V) e ao índice de hidroxila (IOH) está representada na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização do óleo de soja (OS) e do poliol do óleo de soja (POS).

Amostras	IA (mg KOH·g$^{-1}_{amostra}$)	V (cP)	IOH (mg KOH·g$^{-1}_{amostra}$)
Óleo de Soja	0,933± 0,005	59,50±0,30	-
Poliol de óleo de Soja	1,596± 0,006	72,30±0,20	225,75± 1,03

*Valores para cada amostra são médias ± desvio padrão (n = 3). Fonte: Autores

Os resultados das análises físico-químicas do óleo de soja (OS) e do poliol de óleo de soja (POS) estão apresentados na Tabela 1. Foram avaliados o índice de acidez (IA) e a viscosidade (V) de ambas as amostras, além do índice de hidroxila (IOH) do poliol, com o objetivo de identificar as alterações nas propriedades do óleo após o processo de modificação química. Em relação ao índice de acidez, o poliol do óleo de soja apresentou um aumento de aproximadamente 71%. Esse comportamento pode estar relacionado às reações envolvidas no processo de epoxidação e posterior abertura dos anéis epóxidos, bem como à possível presença de compostos ácidos residuais provenientes das etapas de síntese (Petrović, 2008; Cangemi et al., 2009).

O controle da acidez representa uma etapa importante na obtenção de polióis destinados à produção de poliuretanos, uma vez que a presença de grupos ácidos pode favorecer reações secundárias com os isocianatos, interferindo na formação e nas propriedades do material polimérico (Petrović, 2008).

A viscosidade é uma propriedade relevante para a utilização dos polióis na síntese de poliuretanos, pois influencia a mistura dos reagentes e as condições de processamento. Na Tabela 1, observa-se um aumento na viscosidade do poliol em relação ao óleo de soja, correspondendo a aproximadamente 21,5%. Essa alteração pode estar relacionada às modificações na estrutura química dos triglicerídeos durante o processo de obtenção do poliol, especialmente à introdução de grupos funcionais que favorecem o aumento das interações intermoleculares. A presença de grupos hidroxila pode intensificar as ligações de hidrogênio entre as moléculas, contribuindo para uma maior resistência ao escoamento do material e, consequentemente, para o aumento da viscosidade (Monteavaro, 2005; Petrović, 2008).

Além disso, a modificação química do óleo de soja possibilita a introdução de grupos hidroxila na estrutura dos triglicerídeos, permitindo sua reação com grupos isocianato para a formação de poliuretanos. Nesse contexto, o poliol obtido apresentou índice de hidroxila de 225,75 ± 1,03 mg KOH/g, indicando a

presença de grupos funcionais de interesse para a síntese desses materiais. Esse parâmetro também fornece informações importantes para o estabelecimento das proporções entre o poliol e o isocianato durante a reação, contribuindo para a avaliação do potencial de aplicação do poliol produzido (Monteavaro, 2005; Petrović, 2008; Cangemi et al., 2009).

De maneira geral, os resultados demonstraram alterações nas propriedades físico-químicas do óleo de soja após o processo de modificação química, evidenciadas pelo aumento do índice de acidez e da viscosidade, além da presença de grupos hidroxila no poliol obtido. Essas características são relevantes para a avaliação do material como matéria-prima na síntese de poliuretanos. Assim, o poliol produzido apresenta potencial para utilização na elaboração de filmes biopoliméricos à base de quitosana e poliuretano, sendo necessária a avaliação das propriedades dos filmes para verificar seu desempenho nas formulações desenvolvidas. A Tabela 2 apresenta os resultados das análises de caracterização dos filmes biopoliméricos das formulações F1 e F2.

Tabela 2. Valores RT, AR, E e ∆ de Cor dos filmes biopoliméricos

Filme	E (mm)	RT* (MPa)	AR* (%)	ΔCor
F1	0,08 ± 0,01	13,61 ± 0,26	4,10 ± 0,25	14,18 ± 0,98
F2	0,07 ± 0,00	2,71 ± 0,05	7,13 ± 0,72	45,44 ± 1,98

*Valores para cada amostra são médias ± desvio padrão (n = 3). Na espessura são médias ± desvio padrão (n = 10).

Fonte: Autores 2025

Foram avaliadas a espessura (E), a resistência à tração (RT), o alongamento na ruptura (AR) e a variação de cor (ΔCor), com o objetivo de verificar as alterações nas propriedades físicas, mecânicas e ópticas dos filmes após a incorporação do poliuretano obtido a partir do óleo de soja. Em relação à espessura, observou-se uma redução de aproximadamente 12,5% na espessura do filme contendo poliuretano. Essa diferença pode estar relacionada às alterações na viscosidade e no espalhamento da solução filmogênica durante o processo de elaboração dos filmes, além das possíveis interações entre os componentes da matriz polimérica.

Quanto à resistência à tração (RT), o filme com quitosana e poliuretano (F2) apresentou uma redução de aproximadamente 80,1% quando comparado com o filme (F1) constituído exclusivamente por quitosana. Esse resultado indica que, nas condições experimentais utilizadas, a incorporação do poliuretano reduziu a resistência do filme à aplicação de forças de tração. Esse comportamento pode estar relacionado às alterações nas interações intermoleculares da matriz de quitosana e a possível formação de regiões com diferentes características estruturais. A compatibilidade entre os componentes poliméricos e a distribuição do poliuretano na matriz são fatores que podem influenciar diretamente a resistência mecânica dos filmes (Piotrowska-Kirschling e Brzeska, 2020).

Em relação ao alongamento na ruptura (AR), observou-se um comportamento diferente daquele apresentado pela resistência à tração. O filme F2 apresentou um aumento de aproximadamente 73,9% quando comparado com o filme F1. Esse resultado indica que o filme contendo poliuretano apresentou maior capacidade de deformação antes da ruptura. Uma possível explicação está relacionada à presença de segmentos flexíveis na estrutura do poliuretano, provenientes do poliol de óleo de soja, que podem favorecer a mobilidade das cadeias poliméricas e contribuir para o aumento da flexibilidade do material (Petrović, 2008).

A redução da resistência à tração, acompanhada pelo aumento do alongamento na ruptura, sugere uma mudança no comportamento mecânico dos filmes após a incorporação do poliuretano. Enquanto o filme de quitosana (F1) apresentou maior resistência à tração e menor capacidade de alongamento, o filme de quitosana/poliuretano (F2) apresentou menor resistência e maior deformação antes da ruptura. Esse comportamento pode estar relacionado à modificação das interações entre as cadeias poliméricas, indicando que a incorporação do PU influenciou as propriedades mecânicas do material.

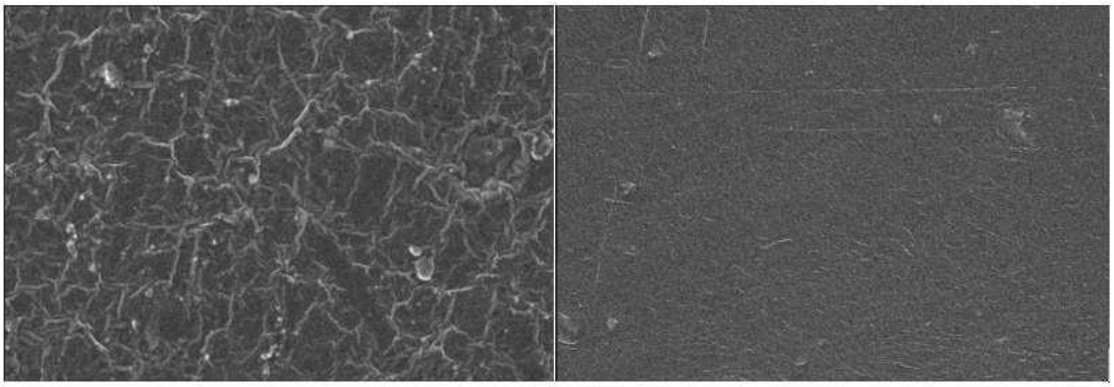
Quanto à variação de cor (ΔCor), o filme da formulação F2 apresentou um aumento de aproximadamente 220,5% quando comparado dom a formulação F1. Esse comportamento pode estar associado à coloração dos componentes

empregados na formulação, especialmente do poliuretano obtido a partir do óleo de soja, bem como às interações entre os materiais durante a formação dos filmes.

A partir da análise das propriedades físicas, mecânicas e ópticas dos filmes biopoliméricos, foi possível observar diferenças entre as formulações F1 e F2. A incorporação do poliuretano obtido a partir do poliol de óleo de soja resultou em uma pequena redução na espessura, diminuição da resistência à tração, aumento do alongamento na ruptura e maior variação de cor. Essas alterações evidenciam a influência do poliuretano sobre o comportamento dos filmes, principalmente em relação à resistência mecânica e à capacidade de deformação. Nesse contexto, a formulação contendo quitosana e poliuretano apresentou maior flexibilidade, indicando possibilidades de aplicação no desenvolvimento de materiais poliméricos.

Análise MEV-EDX

A análise morfológica foi realizada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com ampliação de 1000X na superfície do filme, com o objetivo de determinar a homogeneidade do filme de quitosana e dos filmes de quitosana modificados. A morfologia dos filmes pode ser observada na Figura 6(a) e 6(b).



(a) (b)

Figura 6. Micrografias do filme da formulação F1 (a) e da formulação F2 (b).
Fonte: Autores 2026.

A Figura 6(b) apresenta a micrografia eletrônica de varredura (MEV) do filme de quitosana/poliuretano (F2) de óleo vegetal, revelando uma superfície significativamente mais lisa em comparação ao filme de quitosana (F1) (Figura 6(a)). Enquanto a matriz isolada de quitosana tende a ser mais rígida e propensa a rugosidades e linhas de deformação, decorrentes das fortes interações intermoleculares de suas cadeias, a incorporação do poliuretano (PU) promoveu a compatibilização do sistema. Esse comportamento evidencia que o PU preencheu os vazios estruturais da quitosana, atenuando a rugosidade inicial. Esse fenômeno comprova a incorporação eficaz e a boa dispersão do polímero entre as macromoléculas de quitosana. Como resultado, obteve-se um filme com superfície mais homogênea, lisa e preenchida. Essa mudança gerou um material menos rígido e mais flexível que o filme de quitosana, o que corrobora com os valores de resistência à tração (RT) e alongamento na ruptura (AR) apresentados na Tabela 2.

Na literatura, sistemas compatibilizados são frequentemente associados a morfologias homogêneas, caracterizadas pela redução de descontinuidades estruturais e menor segregação de fases (Piotrowska-Kirschling e Brzeska, 2020). Xu et al. (2021) constataram que rotas de síntese que favorecem interações intermoleculares entre quitosana e poliuretanos limitam a mobilidade segmentar e refinam a organização microestrutural, elevando a estabilidade térmica e o desempenho geral dos filmes.

A análise de raios X por dispersão de energia (EDS) do filme da formulação F1 (a) e da formulação F2 (b) é representada na Figura 7.

A análise dos espectros de EDS indica que ambos os filmes são compostos majoritariamente por Carbono (C) e Oxigênio (O), o que é esperado para matrizes orgânicas e poliméricas como a quitosana e o poliuretano, respectivamente. O pico de ouro (Au) presente em grandes quantidades em aproximadamente 2,12 keV em ambos os espectros decorre do processo metalização (revestimento) na etapa de preparação das amostras, realizada para garantir a condutividade elétrica superficial (Lin et al., 2026).

Os elementos sódio (Na) e Cálcio (Ca) detectados no filme de quitosana está relacionado a impurezas (sais minerais residuais) comuns do processo de extração e purificação da quitosana a partir da quitina (proveniente de carapaças de crustáceos) (Pakizeh et al, 2021). Assim a substituição de 25% da sua massa pelo poliuretano causou um efeito de diluição da matriz, diminuindo a fração mássica desses compostos na superfície analisada e comprovando qualitativamente a incorporação mútua de ambos os polímeros.

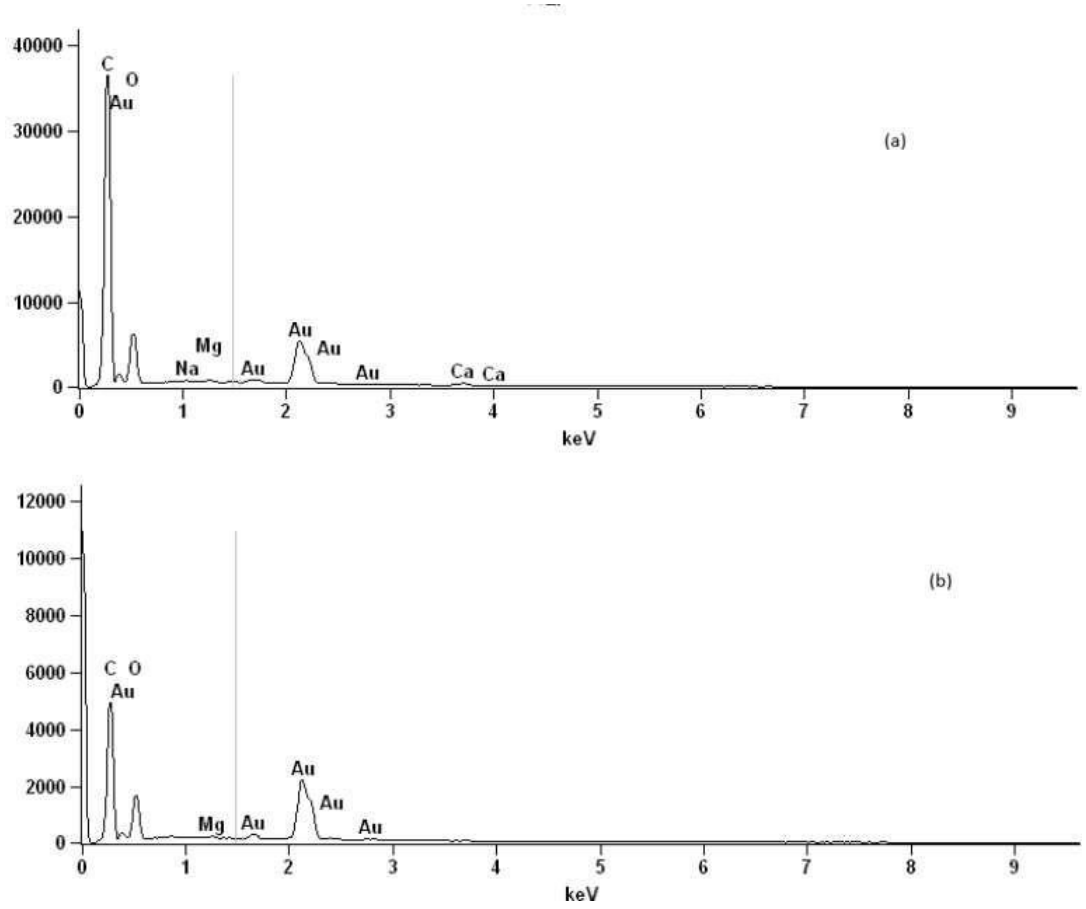


Figura 7. Filme de quitosana (a) e quitosana/poliuretano (b)
Fonte: Autores 2026.

Para a determinação da composição química elementar intrínseca do material, os dados brutos de EDS foram normalizados, obtendo-se as frações mássicas e atômicas reais do filme de quitosana e do filme de quitosana e poliuretano, conforme apresentadas nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3. Frações mássicas e atômicas dos elementos do filme de quitosana

Elementos	% Atômica	% Peso
C	70,72±0,65	38,77±0,36
O	23,18±0,45	16,93±0,33
Ca	0,89±0,12	1,64±0,22
Mg	0,34±0,04	0,38±0,05
Na	0,19±0,05	0,20±0,05
Au	4,68±0,08	42,09±0,71

Fonte: Autores 2026.

Conforme apresentado na Tabela 3, o carbono (C) e o oxigênio (O) são os elementos dominantes no filme de quitosana, com teores de 70,72% e 23,18%, respectivamente, refletindo a estrutura básica do polímero.

Tabela 4. Frações mássicas e atômicas dos elementos do filme de quitosana e poliuretano

Elementos	% Atômica	% Peso
C	59,51 ±0,85	22,61±0,43
O	30,21±1,15	15,29±0,54
Mg	0,36±0,13	0,28±0,10
Au	9,92±0,23	61,82±0,69

Fonte: Autores 2026.

Um aumento no teor de O e uma diminuição nos teores de C foram observados no filme de quitosana com poliuretano (Tabela 4). Essa variação na composição é justificada pela presença de átomos de oxigênio na estrutura química dos poliuretanos e dos polióis vegetais precursores. Portanto, essa alteração estequiométrica confirma incorporação bem-sucedida do poliuretano com a quitosana na formação do filme.

CONCLUSÃO

O presente estudo possibilitou a obtenção de poliol a partir do óleo de soja e sua utilização na síntese de poliuretano para a produção de filmes biopoliméricos à base de quitosana. A caracterização físico-química evidenciou alterações no índice de acidez e na viscosidade após a modificação química do óleo, enquanto o índice de hidroxila obtido demonstrou a presença de grupos funcionais de interesse para a síntese do poliuretano.

A incorporação do poliuretano à matriz de quitosana promoveu alterações nas propriedades dos filmes produzidos, destacando-se a redução da resistência à tração e o aumento do alongamento na ruptura, indicando maior capacidade de deformação do material. Também foram observadas pequenas alterações na espessura e maior variação de cor na formulação contendo poliuretano.

As análises de Microscopia Eletrônica de Varredura evidenciaram diferenças na morfologia superficial dos filmes, sendo observada uma superfície aparentemente mais uniforme na formulação de quitosana/poliuretano. A análise elementar por EDS também identificou diferenças na composição superficial das amostras, complementando a caracterização dos materiais desenvolvidos.

Dessa forma, os resultados evidenciam a possibilidade de utilização do óleo de soja como matéria-prima renovável para a obtenção de poliol e produção de filmes à base de quitosana e poliuretano. A formulação contendo PU apresentou maior capacidade de alongamento, embora acompanhada de redução na resistência mecânica. Assim, o estudo amplia as possibilidades de investigação desses materiais, sendo necessárias análises complementares para avaliar sua estabilidade, propriedades de barreira e adequação a aplicações em embalagens e revestimentos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), ao Grupo de Pesquisa de Óleos e Gorduras, ao Programa de Pós-Graduação em

Ciência e Engenharia de Materiais (PPCEM) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

AIDER, M. Chitosan application for active bio-based films production and potential in the food industry: review. **LWT - Food Science and Technology**, v. 43, n. 6, p. 837-842, 2010.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D1957-86(2001): Standard Test Method for Hydroxyl Value of Fatty Oils and Acids**. West Conshohocken: ASTM International, 2001.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D2244-25: Standard Practice for Calculation of Color Tolerances and Color Differences from Instrumentally Measured Color Coordinates**. West Conshohocken: ASTM International, 2025.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D882-26: Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting**. West Conshohocken: ASTM International, 2026.

CANGEMI, J. M.; SANTOS, A. M.; CLARO NETO, S. Poliuretano: de travesseiros a preservativos, um polímero versátil. **Química Nova na Escola**, v. 31, n. 3, 2009.

GUNSTONE, F. D. (ed.). **Vegetable Oils in Food Technology: Composition, Properties and Uses**. 2. ed. Chichester: Wiley-Blackwell, 2011.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 4. ed. 1. ed. digital. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008.
KROCHTA, J. M.; DE MULDER-JOHNSTON, C. Edible and biodegradable polymer films: challenges and opportunities. **Food Technology**, v. 51, n. 2, 1997.

LENARDÃO, E. J.; FREITAG, R. A.; DABDOUB, M. J. et al. “Green chemistry”: os 12 princípios da química verde e sua inserção nas atividades de ensino e pesquisa. **Química Nova**, v. 26, n. 1, p. 123-129, 2003.

MONTEAVARO, L. L.; SILVA, E. O. da; COSTA, A. P. O. et al. Polyurethane networks from formiated soy polyols: synthesis and mechanical characterization. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 82, n. 5, p. 365-371, 2005.

OECD. **Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options**. Paris: OECD Publishing, 2022.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Nova York: ONU, 2015. Resolução A/RES/70/1.

PAKIZEH, M.; MORADI, A.; GHASSEMI, T. Chemical extraction and modification of chitin and chitosan from shrimp shells. **European Polymer Journal**, v. 159, art. 110709, 2021.

PETROVIĆ, Z. S. Polyurethanes from vegetable oils. **Polymer Reviews**, v. 48, n. 1, p. 109-155, 2008.

PIOTROWSKA-KIRSCHLING, A.; BRZESKA, J. The effect of chitosan on the chemical structure, morphology, and selected properties of polyurethane/chitosan composites. **Polymers**, v. 12, n. 5, art. 1205, 2020.

XU, J.; FU, C.-Y.; TSAI, Y.-L. et al. Thermoresponsive and conductive chitosan-polyurethane biocompatible thin films with potential coating application. **Polymers**, v. 13, n. 3, art. 326, 2021.