

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS**

**LEONARDO GABRIEL DE MATTOS CAMPOS  
LUCAS CARVALHO GUIMARÃES**

**BIOFILMES À BASE DE PROTEÍNA DE SOJA: AVANÇOS, DESAFIOS E  
PERSPECTIVAS FUTURAS PARA EMBALAGENS SUSTENTÁVEIS**

**POÇOS DE CALDAS/MG**

**2025**

**LEONARDO GABRIEL DE MATTOS CAMPOS  
LUCAS CARVALHO GUIMARÃES**

**BIOFILMES À BASE DE PROTEÍNA DE SOJA: AVANÇOS, DESAFIOS E  
PERSPECTIVAS FUTURAS PARA EMBALAGENS SUSTENTÁVEIS**

Projeto final de curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de bacharel em Engenharia Química pela Universidade Federal de Alfenas.

Orientador: Prof. Dra. Melina Savioli Lopes

**POÇOS DE CALDAS/MG**

**2025**

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas  
Biblioteca Campus Poços de Caldas

Campos, Leonardo .

Biofilmes à base de proteína de soja: avanços, desafios e perspectivas futuras para embalagens sustentáveis / Leonardo Campos, Lucas Carvalho Guimarães. - Poços de Caldas, MG, 2025.

59 f. : il. -

Orientador(a): Melina Savioli Lopes.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2025.

Bibliografia.

1. Biofilmes. 2. Proteína de soja. 3. Biodegradabilidade. 4. Embalagens sustentáveis. 5. Biopolímeros. I. Guimarães, Lucas Carvalho. II. Lopes, Melina Savioli , orient. III. Título.

Ficha gerada automaticamente com dados fornecidos pelo autor.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

LEONARDO GABRIEL DE MATTOS CAMPOS  
LUCAS CARVALHO GUIMARÃES


Biofilmes à Base de Proteína de Soja: Avanços, Desafios e Perspectivas Futuras para  
Embalagens Sustentáveis

A Banca examinadora abaixo assinada a aprovação do Projeto Final de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química pela Universidade Federal de Alfenas.


Orientador: Profa. Dra. Melina Savioli Lopes

Aprovado em: 13 de novembro de 2025


Prof. Dra. Melina Savioli Lopes  
Universidade Federal de Alfenas

Documento assinado digitalmente  
 **MELINA SAVIOLI LOPES**  
Data: 02/12/2025 05:53:08-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Giselle Patrícia Sancinetti  
Universidade Federal de Alfenas

Documento assinado digitalmente  
 **GISELLE PATRICIA SANCINETTI**  
Data: 03/12/2025 16:42:22-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Grazielle Santos Silva Andrade  
Universidade Federal de Alfenas

Documento assinado digitalmente  
 **GRAZIELLE SANTOS SILVA ANDRADE**  
Data: 03/12/2025 16:35:29-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaríamos de expressar nossa sincera gratidão à nossa orientadora, Prof.<sup>a</sup> Dra. Melina Savioli Lopes, pela orientação dedicada, pelo incentivo contínuo e pelos preciosos conselhos ao longo de toda esta jornada. Seu apoio e compromisso foram fundamentais para o nosso crescimento acadêmico e pessoal, inspirando-nos a buscar sempre o melhor de nós mesmos.

Agradecemos a Deus, por nos conceder saúde, sabedoria e determinação para perseverarmos mesmo diante dos desafios que surgiram durante a realização deste trabalho.

Registramos, também, nossa profunda gratidão às nossas famílias, cujos apoios incondicional e constante foram pilares essenciais para nos manter firmes e confiantes nesta trajetória. Em especial, agradecemos aos nossos pais, que nos proporcionaram a oportunidade de estudar em uma universidade federal, longe de casa, acreditando em nosso potencial e nos sustentando com amor e coragem.

Por fim, estendemos nosso sincero agradecimento a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta pesquisa — seja por meio de orientações, discussões enriquecedoras ou apoio moral. Cada gesto de incentivo foi fundamental para a concretização deste trabalho.

## RESUMO

Biofilmes de proteína de soja isolada representam uma alternativa promissora aos plásticos derivados do petróleo devido à sua biodegradabilidade, renovabilidade e versatilidade funcional. Esta revisão examina criticamente pesquisas publicadas entre 2018 e 2025, com foco nos avanços em métodos de processamento, modificações estruturais e aplicações dos biofilmes de proteína de soja isolada. A análise abrange desde métodos convencionais, como o *casting*, e tecnologias escalonáveis, como extrusão e moldagem por compressão, até técnicas de fabricação avançadas, incluindo eletrofiação e impressão 3D. Paralelamente, são analisadas propriedades físico-químicas e funcionais — desempenho mecânico, comportamento de barreira, estabilidade óptica e térmica, biodegradabilidade e funcionalidades ativas. Destacam-se estratégias para superar limitações intrínsecas, como sensibilidade à umidade, fragilidade e restrições de escalabilidade. Aplicações emergentes são evidenciadas nas áreas de embalagens alimentícias, revestimentos comestíveis, sistemas biomédicos e embalagens ativas/inteligentes. Também são discutidas perspectivas de mercado e barreiras regulatórias, ressaltando o equilíbrio crítico entre inovação, segurança e viabilidade comercial. Apesar dos desafios persistentes, os biofilmes de proteína de soja isolada configuram-se como uma plataforma versátil, com significativo potencial para contribuir com materiais sustentáveis e estratégias de economia circular.

Palavras-chave: biofilmes; proteína de soja; biodegradabilidade; embalagens sustentáveis; biopolímeros.

## ABSTRACT

Soy protein biofilms represent a promising alternative to petroleum-based plastics due to their biodegradability, renewability, and functional versatility. This review critically examines research published between 2018 and 2025, focusing on advances in processing methods, structural modifications, and applications of soy protein biofilms. The analysis ranges from conventional methods, such as *casting*, and scalable technologies, like extrusion and compression molding, to advanced manufacturing techniques, including electrospinning and 3D printing. In parallel, physicochemical and functional properties—such as mechanical performance, barrier behavior, optical and thermal stability, biodegradability, and active functionalities—are analyzed. Strategies to overcome intrinsic limitations, such as moisture sensitivity, brittleness, and scalability constraints, are highlighted. Emerging applications are evidenced in the areas of food packaging, edible coatings, biomedical systems, and active/intelligent packaging. Market perspectives and regulatory barriers are also discussed, emphasizing the critical balance between innovation, safety, and commercial viability. Despite persistent challenges, soy protein biofilms stand out as a versatile platform with significant potential to contribute to sustainable materials and circular economy strategies.

Keywords: biofilms; soy protein; biodegradability; sustainable packaging; biopolymers.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
<b>2 JUSTIFICATIVA</b>	<b>14</b>
<b>3 OBJETIVOS</b>	<b>15</b>
3.1 OBJETIVO GERAL	15
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
<b>4 METODOLOGIA</b>	<b>16</b>
4.1 DELINEAMENTO DA PESQUISA E PERÍODO DE ANÁLISE	16
4.2 FONTES DE DADOS E ESTRATÉGIA DE BUSCA	16
4.3 CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO	17
4.4 ANÁLISE E SISTEMATIZAÇÃO DOS DADOS	18
<b>5 REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>19</b>
5.1 A ESTRUTURA DA PROTEÍNA ISOLADA DE SOJA COMO DILEMA FUNDAMENTAL PARA A FORMAÇÃO DE BIOFILMES	19
<b>5.1.1 Processo de obtenção da proteína de soja isolada</b>	<b>20</b>
5.2 MÉTODOS DE PRODUÇÃO DE BIOFILMES DE PROTEÍNA DE SOJA ISOLADA	21
<b>5.2.1 Método de casting</b>	<b>21</b>
<b>5.2.2 Tecnologias para escalonamento industrial: extrusão e moldagem por compressão</b>	<b>22</b>
<b>5.2.3 Fabricação avançada para estruturas funcionais: eletrofiação</b>	<b>23</b>
<b>5.2.4 Impressão 3D</b>	<b>23</b>
<b>5.2.5 Análise comparativa e perspectivas de aplicação</b>	<b>24</b>
5.3 CARACTERIZAÇÃO DOS BIOFILMES DE PROTEÍNA DE SOJA ISOLADA	25
<b>5.3.1 O balanço fundamental entre resistência e flexibilidade</b>	<b>25</b>
<b>5.3.2 Estratégias de reforço: nanocompósitos e reticulação química</b>	<b>26</b>
<b>5.3.3 Inovações estruturais: biomimética e materiais auto regenerativos</b>	<b>30</b>
<b>5.3.4 Propriedades de barreira</b>	<b>31</b>
<b>5.3.5 Propriedades ópticas e transparência</b>	<b>35</b>
<b>5.3.6 Propriedades ativas: funcionalidade antimicrobiana e antioxidante</b>	<b>35</b>
<b>5.3.7 Biodegradabilidade e análise crítica do ciclo de vida</b>	<b>36</b>
5.4 APLICAÇÕES DOS BIOFILMES DE PROTEÍNA DE SOJA ISOLADA	38
<b>5.4.1 Embalagens para alimentos</b>	<b>38</b>
<b>5.4.2 Revestimentos comestíveis</b>	<b>40</b>
<b>5.4.3 Aplicações biomédicas</b>	<b>41</b>
5.5 Síntese, multifuncionalidade e novas fronteiras	43
<b>5.5.1 Desafios e perspectivas futuras</b>	<b>44</b>

<b>6 PERSPECTIVAS DE MERCADO E CENÁRIO REGULATÓRIO</b>	<b>45</b>
6.1 ANÁLISE DE MERCADO E VIABILIDADE TECNO-ECONÔMICA	45
6.2 BARREIRAS REGULATÓRIAS À COMERCIALIZAÇÃO DE MATERIAIS EM CONTATO COM ALIMENTOS (MCA)	46
<b>7 CONCLUSÃO</b>	<b>48</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>50</b>

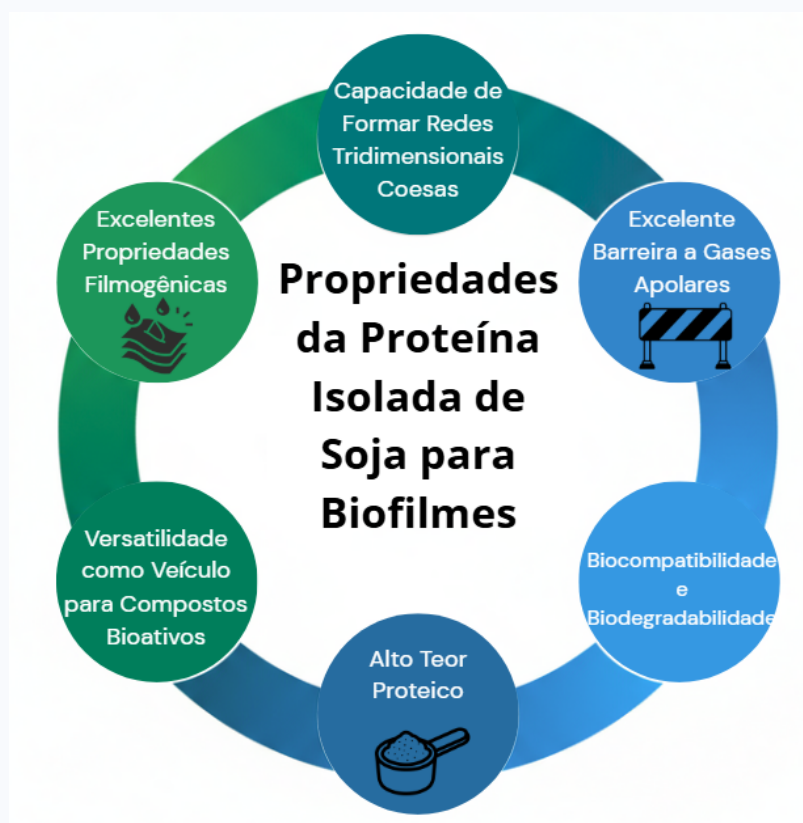
## 1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com os impactos ambientais adversos gerados por plásticos de origem petroquímica tem impulsionado, nas últimas décadas, uma busca global por alternativas sustentáveis (Dirpan *et al.*, 2023). Materiais plásticos convencionais, notórios por sua recalcitrância à degradação, acumulam-se em aterros sanitários e ecossistemas aquáticos, fragmentando-se em microplásticos e representando uma ameaça sistêmica à saúde planetária e humana (Olawade *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2024).

Nesse contexto, os biopolímeros, derivados de fontes renováveis como os biopolímeros naturais, emergem como uma solução estratégica alinhada aos princípios da economia circular. Eles oferecem o potencial de reduzir a dependência de recursos fósseis e mitigar o acúmulo de resíduos sólidos, posicionando-se como materiais fundamentais para um futuro mais sustentável (Dirpan *et al.*, 2023; González-López *et al.*, 2023; Versino *et al.*, 2023).

Dentre as diversas fontes de biopolímeros, a proteína de soja isolada (*Glycine max*) destaca-se como uma matéria-prima promissora para a produção de biofilmes. Trata-se de um material de elevado interesse estratégico, especialmente para o Brasil, um dos maiores produtores e exportadores mundiais do grão (Rajendran *et al.*, 2024; Brentin, 2014). A proteína de soja isolada (SPI), um coproduto da indústria de extração de óleo com um teor proteico superior a 90%, representa um insumo abundante, de baixo custo e com excelentes propriedades filmogênicas, devido à sua capacidade de formar redes tridimensionais coesas através de ligações intermoleculares (Chen *et al.*, 2021; Tian *et al.*, 2018). As principais propriedades que destacam a SPI como uma matéria-prima ideal para biofilmes estão resumidas na Figura 1.

Figura 1 – Principais propriedades da proteína de soja isolada(SPI) para a formação de biofilmes



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Essas características a tornam uma candidata ideal para aplicações em diversos setores, como embalagens alimentícias, revestimentos comestíveis, sistemas de liberação controlada de compostos bioativos, e até aplicações em biomedicina e agricultura (Hadidi *et al.*, 2022; Mihalca *et al.*, 2021). A Figura 2 ilustra esquematicamente essa versatilidade e os principais campos de aplicação da SPI.

Figura 2 – Esquema da versatilidade e das principais aplicações da proteína de soja isolada (SPI)



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Apesar do enorme potencial, o desenvolvimento de biofilmes de SPI é confrontado por barreiras técnicas críticas que limitam sua aplicação em larga escala. O problema central pode ser entendido como uma dualidade fundamental: a primeira barreira são as propriedades mecânicas inferiores em comparação aos plásticos sintéticos, resultando em materiais muitas vezes frágeis e com baixa resistência à tração e flexibilidade (Purewal *et al.*, 2024; Rani *et al.*, 2019).

A segunda é uma elevada sensibilidade à umidade, decorrente do caráter intrinsecamente hidrofílico das cadeias proteicas, que compromete a estabilidade dimensional e as propriedades funcionais em ambientes úmidos (Gonzalez-Rios *et al.*, 2024; Li *et al.*, 2022; Khayrullin *et al.*, 2023). Somam-se a estes os desafios de propriedades de barreira limitadas, particularmente quanto à permeabilidade ao vapor de água (Mohamed *et al.*, 2020), dificuldades de processabilidade e escalabilidade dos métodos de produção (Chen *et al.*, 2019) e um custo de produção

ainda relativamente elevado (Mihalca *et al.*, 2021). A superação desses desafios tornou-se o principal motor da inovação no campo.

Diante desse cenário, a questão central que este trabalho busca responder é: Quais são os principais avanços científicos e tecnológicos, no período de 2018 a 2025, na produção e funcionalização de biofilmes a partir da proteína de soja isolada, e como esses avanços contribuem para superar as limitações intrínsecas do material, viabilizando sua aplicação técnica, ambiental e regulatória.

## 2 JUSTIFICATIVA

A relevância deste estudo ancora-se em múltiplos pilares interdependentes. No pilar ambiental, a urgência em mitigar a poluição gerada por plásticos convencionais e reduzir a dependência de recursos não renováveis torna imperativo o desenvolvimento de alternativas sustentáveis. Os biofilmes de proteína de soja isolada, por sua natureza biodegradável e origem renovável, representam uma resposta direta a esse desafio (Versino *et al.*, 2023).

Cientificamente, uma análise crítica da literatura recente é fundamental para mapear tendências, identificar lacunas de conhecimento e direcionar futuras investigações, oferecendo uma visão consolidada do estado da arte sobre os mecanismos que regem a formação e as propriedades dos biofilmes proteicos (Małeck *et al.*, 2021). Essa síntese do conhecimento disponível constitui uma contribuição relevante para estudantes, pesquisadores e profissionais da área (Chen *et al.*, 2019).

Do ponto de vista tecnológico e econômico, o mapeamento de estratégias para o aprimoramento funcional desses materiais é um passo crucial para acelerar sua viabilidade comercial. A valorização da proteína de soja isolada como um insumo de alto valor agregado não apenas atende a uma demanda de mercado, mas também representa uma oportunidade econômica estratégica para países produtores, como o Brasil (Zubair; Ullah, 2020).

### 3 OBJETIVOS

#### 3.1 OBJETIVO GERAL

Analisar criticamente os avanços científicos e tecnológicos na área de biofilmes de proteína de soja isolada, com base na literatura publicada entre 2018 e 2025, abrangendo os métodos de produção, as estratégias de funcionalização, as propriedades-chave e o panorama das aplicações.

#### 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Sistematizar os principais métodos de produção, abordando desde as técnicas convencionais (ex: *casting*) até as tecnologias emergentes.
- Avaliar as propriedades-chave dos biofilmes (mecânicas, de barreira, térmicas e de biodegradabilidade) e as estratégias de funcionalização utilizadas para seu aprimoramento.
- Mapear as aplicações consolidadas e emergentes, com destaque para inovações em embalagens ativas e inteligentes, sistemas de liberação controlada e no setor biomédico.
- Identificar os desafios tecnológicos, econômicos e regulatórios que ainda limitam a aplicação comercial dos biofilmes de soja em larga escala.
- Delinear, a partir da análise crítica realizada, as direções mais promissoras para pesquisas futuras, visando superar as limitações identificadas e acelerar a inovação na área.

## **4 METODOLOGIA**

O presente estudo consiste em uma revisão bibliográfica de caráter exploratório e descritivo, conduzida para mapear e analisar criticamente a produção científica sobre biofilmes de proteína de soja isolada.

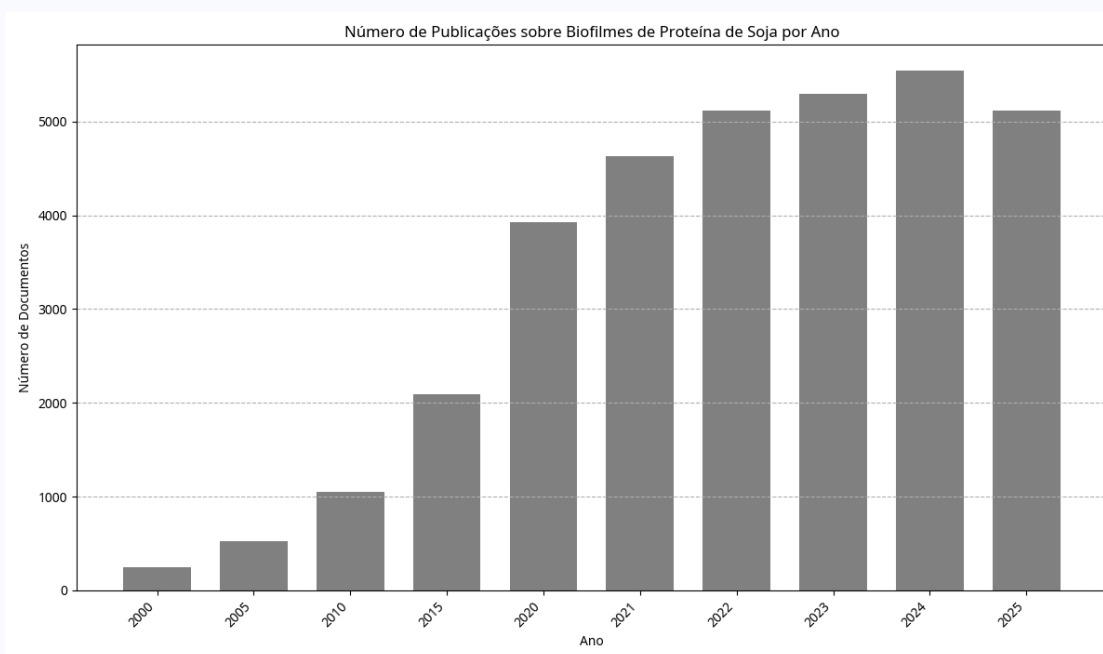
### **4.1 DELINEAMENTO DA PESQUISA E PERÍODO DE ANÁLISE**

A pesquisa abrangeu artigos científicos publicados no período compreendido entre janeiro de 2018 e julho de 2025. Este recorte temporal foi definido para garantir a análise dos avanços mais recentes e das tendências emergentes na área.

### **4.2 FONTES DE DADOS E ESTRATÉGIA DE BUSCA**

A prospecção dos artigos foi realizada em bases de dados de ampla relevância científica e acadêmica, incluindo Science Direct, Scopus, Web of Science, SciELO e Google Scholar. Após a remoção de duplicatas e a aplicação rigorosa dos critérios de inclusão e exclusão, 80 artigos foram considerados elegíveis e incluídos nesta revisão. O crescente interesse científico na área de biofilmes de proteína de soja isolada é evidenciado pela evolução do número de publicações ao longo dos anos, conforme ilustrado na figura 3.

Figura 3 - Número de publicações sobre Biofilmes de proteína de soja isolada



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

A estratégia de busca envolveu a combinação de descritores (termos de busca) em português e inglês, tais como:

- "biofilmes proteína soja"
- "filmes biodegradáveis proteína soja"
- "Soy protein films"
- "Soy protein isolate biofilms"
- "Biodegradable films AND soy protein"

#### 4.3 CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO

Os artigos identificados na busca inicial foram submetidos a um processo de triagem com base em critérios de inclusão e exclusão. Foram selecionados artigos de pesquisa originais e artigos de revisão sistemática que abordassem diretamente a produção, caracterização, funcionalização ou aplicação de biofilmes de proteína de soja isolada, priorizando trabalhos publicados em periódicos com revisão por pares e alto fator de impacto.

Por outro lado, foram excluídos editoriais, cartas ao editor, resumos de conferências, teses, dissertações, patentes e artigos cujo foco principal não estivesse alinhado aos objetivos deste estudo.

#### 4.4 ANÁLISE E SISTEMATIZAÇÃO DOS DADOS

As informações extraídas dos artigos que atenderam a todos os critérios de inclusão foram organizados, comparados e analisados de forma sistemática. A análise crítica buscou identificar convergências, divergências, lacunas no conhecimento e as principais tendências tecnológicas. A síntese dos dados foi estruturada de modo a responder diretamente aos objetivos específicos propostos neste trabalho, oferecendo uma visão abrangente e atualizada do estado da arte.

Para garantir a robustez e a confiabilidade desta revisão, foi realizada uma avaliação sistemática da qualidade metodológica dos estudos incluídos. Esta avaliação considerou aspectos como o delineamento experimental, a clareza e adequação dos métodos empregados, a representatividade e o tamanho das amostras, a validade interna e externa dos resultados, e a transparência na apresentação dos dados.

## 5 REVISÃO DE LITERATURA

A viabilidade e o desempenho dos biofilmes de proteína de soja isolada (SPI) estão intrinsecamente ligados à sua estrutura molecular e ao método de processamento empregado. A compreensão desses fundamentos é essencial para o desenvolvimento de materiais com propriedades otimizadas.

A transformação da proteína de soja isolada de um pó solúvel para um filme sólido e funcional é um processo físico-químico que depende da manipulação de sua arquitetura molecular. Em seu estado natural, a proteína de soja isolada, majoritariamente glicinina (11S) e  $\beta$ -conglucina (7S), são dobradas em conformações globulares estáveis, o que impede a formação de uma matriz coesa (Jiang *et al.*, 2019).

Portanto, o passo inicial e crucial na fabricação de biofilmes é a desnaturação, que desfaz essa estrutura compacta, expondo grupos hidrofóbicos e sulfidrilas anteriormente ocultos no interior da molécula. É a reorganização e a subsequente formação de novas ligações intermoleculares entre essas cadeias desdobradas que criam a rede tridimensional que constitui o biofilme (Kumar *et al.*, 2022).

O método de processamento, seja o *casting* em laboratório ou a extrusão em escala industrial, governa a extensão da desnaturação e as condições de formação dessa rede, determinando assim o balanço final entre resistência, flexibilidade e permeabilidade do material (Flórez *et al.*, 2023; Tian *et al.*, 2018).

### 5.1 A ESTRUTURA DA PROTEÍNA ISOLADA DE SOJA COMO DILEMA FUNDAMENTAL PARA A FORMAÇÃO DE BIOFILMES

A proteína de soja isolada (SPI), um derivado de alto valor proteico (>90%) da soja (*Glycine max*), é a matéria-prima central para os biofilmes discutidos neste trabalho devido à sua excelente capacidade filmogênica (Tian *et al.*, 2018). Essa capacidade reside em sua complexa estrutura molecular, dominada pelas duas frações de proteínas globulares.

A proporção e a estrutura dessas frações são determinantes para as propriedades finais do material, influenciando desde a resistência mecânica até a interação com a água (Jiang *et al.*, 2019; Tian *et al.*, 2018).

Contudo, para que essa capacidade filmogênica seja aproveitada, as proteínas em seu estado nativo precisam ser modificadas. O processo de formação do filme envolve uma etapa crucial de desnaturação controlada, geralmente por meio de aquecimento (75-95 °C) e ajuste de pH (8-11). Esse tratamento desenvolve as cadeias proteicas globulares, expondo grupos funcionais (hidrofóbicos, hidrofílicos, etc.) que estavam antes no interior da molécula.

Na etapa seguinte, durante a secagem, essas cadeias se organizam e formam uma nova rede tridimensional coesa, estabilizada por interações como pontes de hidrogênio, interações hidrofóbicas e pontes dissulfeto, que constituem a matriz do biofilme (Jiang *et al.*, 2019; Rani *et al.*, 2025).

É aqui que a composição de aminoácidos da SPI se torna o fator decisivo para o desempenho do biofilme, manifestando uma dualidade fundamental. Por um lado, a alta concentração de resíduos de aminoácidos hidrofílicos (como ácido aspártico e glutâmico) confere ao material sua principal desvantagem: uma elevada sensibilidade à umidade, que compromete sua estabilidade e função de barreira.

Em contrapartida, são os resíduos hidrofóbicos e os grupos sulfidrílicos (que formam pontes dissulfeto) os responsáveis por criar as interações essenciais que garantem a coesão, a integridade estrutural e as propriedades mecânicas do filme (Kumar *et al.*, 2022).

Portanto, a compreensão dessa estrutura e de sua dualidade é o ponto de partida para o desenvolvimento de biofilmes de soja, já que as dificuldades em obter um material simultaneamente resistente e estável em água estão diretamente ligadas a essa composição molecular inerente.

### **5.1.1 Processo de obtenção da proteína de soja isolada**

O processo industrial padrão para a obtenção da proteína de soja isolada, conforme documentado na literatura científica, inicia-se com o farelo de soja desengordurado — o material sólido que resta após a extração do óleo — e não com o óleo em si.

Este farelo é disperso em solução aquosa e submetido a uma extração alcalina, elevando-se o pH da mistura para a faixa de 8,0 a 10,0 com a adição de um álcali. Nesta condição, distante do ponto isoelétrico, a solubilidade das principais proteínas globulares (glicinina e  $\beta$ -conglucina) é maximizada, fazendo com que se dissolvam na água, enquanto componentes insolúveis como fibras e carboidratos permanecem sólidos (Tian *et al.*, 2022).

A mistura é então centrifugada para separar o extrato líquido rico em proteína dos resíduos. Em seguida, o extrato líquido é submetido à precipitação isoelétrica, onde um ácido é adicionado para baixar o pH da solução até o ponto isoelétrico (pI) das proteínas, que se situa na faixa de pH 4,5 a 5,0 (Das *et al.*, 2023).

Neste pH, a carga líquida das proteínas torna-se nula, o que minimiza a repulsão eletrostática, causa a agregação e precipitação das proteínas, e as separa dos açúcares solúveis e sais que permanecem no soro.

Por fim, o "coalho" proteico precipitado é separado do soro por uma nova centrifugação, lavado com água para purificação, e frequentemente neutralizado (pH ajustado para próximo de 7,0) para restaurar sua solubilidade e funcionalidade. Esta pasta proteica é então submetida à secagem por atomização (spray-drying), convertendo-a no pó fino de alta pureza (mínimo de 90% de proteína) conhecido como proteína de soja isolada (Caldeira *et al.*, 2024).

## 5.2 MÉTODOS DE PRODUÇÃO DE BIOFILMES DE PROTEÍNA DE SOJA ISOLADA

### 5.2.1 Método de *casting*

O método de *casting*, ou evaporação de solvente, é a abordagem mais difundida em escala laboratorial para a produção de biofilmes de proteína de soja isolada, devido à sua simplicidade operacional e versatilidade (Hadidi *et al.*, 2022).

O processo consiste em dispersar o isolado de proteína de soja isolada (SPI) em água, seguida por uma etapa de desnaturação com calor e pH alcalino. Essa etapa é fundamental para desenvolver as cadeias proteicas e permitir novas interações (Hu *et al.*, 2025; Zhang *et al.*, 2022). Em seguida, um plastificante, como o glicerol, é adicionado, o que é essencial para conferir flexibilidade e superar a

fragilidade natural dos filmes de proteína pura (Purewal *et al.*, 2024). A solução final é espalhada sobre uma superfície e seca sob condições controladas.

Apesar de eficaz para pesquisa, o método de *casting* é inviável para a produção industrial devido ao longo tempo de secagem e ao alto consumo de energia, que resultam em baixa produtividade e custo elevado (Flórez *et al.*, 2023). Curiosamente, um princípio similar é usado há séculos na culinária asiática para produzir o "pele de tofu" (yuba film) a partir do aquecimento do leite de soja (Gonzalez-Rios *et al.*, 2024).

### **5.2.2 Tecnologias para escalonamento industrial: extrusão e moldagem por compressão**

Para a produção em larga escala de biofilmes de proteína de soja isolada, tecnologias de processamento a seco como a extrusão e a moldagem por compressão são alternativas ao *casting*.

A extrusão é um processo termomecânico contínuo que oferece alta produtividade com menor consumo de água e energia. No entanto, as altas temperaturas (120-160°C) e o cisalhamento podem causar a degradação da proteína, levando ao escurecimento do filme e à perda de propriedades mecânicas, o que torna o controle do processo um desafio significativo (Flórez *et al.*, 2023; Tian *et al.*, 2018).

A moldagem por compressão é outra técnica a seco na qual o pó de proteína de soja e o plastificante são prensados entre placas aquecidas. Este método é mais rápido que o *casting* e não utiliza solventes, resultando em filmes geralmente mais transparentes e com superfícies lisas (Tian *et al.*, 2018; Gonzalez-Rios *et al.*, 2024).

Apesar do potencial dessas tecnologias, a transição para a escala industrial enfrenta obstáculos significativos. A indústria de proteínas vegetais, em geral, têm encontrado dificuldades para construir a infraestrutura necessária e atrair investimentos para o escalonamento da produção e manufatura. Além disso, o custo de produção tem sido uma barreira para a adoção generalizada de SPI em escala industrial (Mihalca *et al.*, 2021). Para viabilizar economicamente o escalonamento, é fundamental buscar matérias-primas de baixo custo, como a própria proteína de soja isolada (SPI), que já é um coproduto e processos mais eficientes, incluindo a

otimização de formulações que utilizam resíduos agroalimentares (Granados-Carrera *et al.*, 2025; Bagnani *et al.*, 2024)

### **5.2.3 Fabricação avançada para estruturas funcionais: eletrofiação**

A eletrofiação (electrospinning) é uma técnica de fabricação avançada que utiliza um campo elétrico de alta voltagem para produzir fibras em escala nanométrica a partir de uma solução polimérica (Raeisi *et al.*, 2021; Guerrero *et al.*, 2021).

O resultado é um filme nanofibroso com elevada área superficial e porosidade, características vantajosas para aplicações em embalagens ativas que necessitam da liberação controlada de compostos funcionais, como óleos essenciais com ação antibacteriana. A viabilidade do processo frequentemente requer o uso de polímeros auxiliares, como o álcool polivinílico (PVA), para garantir a formação de fibras contínuas (Moosavi *et al.*, 2020).

### **5.2.4 Impressão 3D**

A impressão 3D é uma tecnologia de manufatura aditiva que permite criar estruturas tridimensionais complexas e personalizadas a partir de "tintas" à base de proteína de soja isolada, com grande potencial para embalagens de alimentos e dispositivos biomédicos (Ahmadzadeh *et al.*, 2023).

O principal desafio técnico é a formulação da tinta, que deve ter propriedades reológicas (viscosidade e fluidez) precisas para ser extrudada corretamente e manter sua forma. Pesquisas demonstram que a incorporação de aditivos, como extratos polifenólicos, pode resultar em filmes ativos com melhores propriedades antioxidantes, ideais para a conservação de alimentos (Ahmadzadeh *et al.*, 2023).

Para otimizar as formulações, hidrocoloides são frequentemente adicionados para ajustar a viscosidade. Além disso, tratamentos de pós-impressão, como a reticulação ou secagem controlada, são indispensáveis para garantir a estabilidade final da estrutura (Zubair; Ullah, 2020).

### **5.2.5 Análise comparativa e perspectivas de aplicação**

A escolha do método de produção representa, portanto, um balanço criterioso entre custo, volume de produção e as propriedades finais desejadas para o material.

Enquanto o *casting* permanece como a técnica ideal para a prototipagem e pesquisa em laboratório, a extrusão e a moldagem por compressão são mais promissoras para a produção em massa. Por sua vez, a eletrofição e a impressão 3D não visam competir em volume, mas sim criar materiais de alto valor agregado, onde a arquitetura nanométrica ou micrométrica é a chave para a funcionalidade.

Isso representa uma mudança de paradigma, movendo o foco da simples substituição de plásticos para a criação de materiais inteligentes com funcionalidades que os polímeros convencionais não possuem, abrindo nichos de mercado em biomedicina, embalagens de precisão e eletrônicos flexíveis (Raeisi *et al.*, 2021; Ahmadzadeh *et al.*, 2023). A Tabela 1 sintetiza e compara estas abordagens, que foram discutidas em detalhe.

Tabela 1 – Comparativo dos principais métodos de produção de biofilmes de proteína de soja isolada(continua)

Método	Princípio do Processo	Vantagens	Desafios/Limitações	Propriedades Típicas do Filme	Referência
<b>Casting</b>	Evaporação de solvente de uma solução polimérica espalhada em uma superfície.	Simplicidade, baixo custo em laboratório, versatilidade para incorporar aditivos.	Lento, alto consumo de energia, difícil escalonamento, uso de solventes.	Filmes homogêneos, mas potencialmente frágeis sem plastificantes.	Hadidi <i>et al.</i> , 2022; Flórez <i>et al.</i> , 2023
<b>Extrusão</b>	Processamento termomecânico contínuo sob alta pressão e cisalhamento.	Alta produtividade, processo contínuo, menor consumo de água e energia.	Risco de degradação térmica da proteína, controle de processo complexo.	Pode apresentar escurecimento e propriedades mecânicas variáveis.	Tian <i>et al.</i> , 2018
<b>Moldagem por Compressão</b>	Prensagem a quente de pó de SPI com plastificante (processo a seco).	Rápido, sem uso de solventes, menor impacto ambiental.	Requer altas pressões e temperaturas, pode ser um processo batelada.	Filmes mais transparentes e com superfície lisa devido à alta desnaturação.	Gonzalez-Rios <i>et al.</i> , 2024

Tabela 1 – Comparativo dos principais métodos de produção de biofilmes de proteína de soja isolada(conclusão)

Método	Princípio do Processo	Vantagens	Desafios/Limitações	Propriedades Típicas do Filme	Referência
<b>Eletrofição</b>	Uso de campo elétrico para estirar uma solução polimérica em nanofibras.	Produz filmes com alta área superficial e porosidade, ideal para liberação controlada.	Baixa taxa de produção, requer polímeros auxiliares, controle de morfologia.	Estrutura nanofibras, não é uma barreira densa.	Raeisi <i>et al.</i> , 2021; Guerrero <i>et al.</i> , 2021
<b>Impressão 3D</b>	Deposição camada por camada de uma "tinta" à base de proteína.	Alta personalização de geometria, fabricação de estruturas complexas.	Processo lento, formulação da tinta é crítica (reologia), custo elevado.	Estrutura e propriedades dependem totalmente do design e da formulação.	Ahmadzadeh <i>et al.</i> , 2023; Zubair; Ullah, 2020

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

### 5.3 CARACTERIZAÇÃO DOS BIOFILMES DE PROTEÍNA DE SOJA ISOLADA

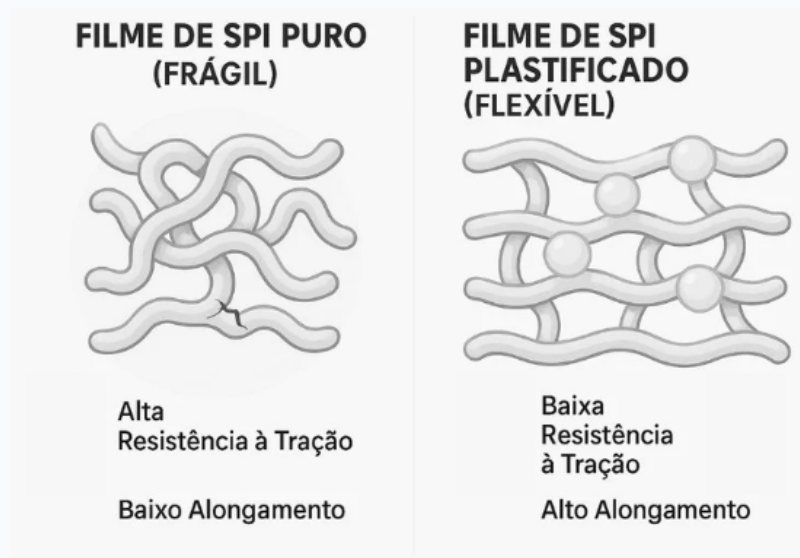
#### 5.3.1 O balanço fundamental entre resistência e flexibilidade

A viabilidade comercial dos biofilmes de proteína de soja isolada (SPI) depende fundamentalmente da superação de suas limitações intrínsecas, notadamente sua fragilidade. A pesquisa recente tem se concentrado em estratégias sofisticadas para aprimorar o desempenho desses materiais, explorando a profunda interconexão entre estrutura, processamento e funcionalidade. As propriedades mecânicas, comumente avaliadas por parâmetros como a resistência à tração (TS), o módulo de elasticidade (EM) e a elongação na ruptura (EAB), são críticas para a integridade do material, especialmente em aplicações de embalagem (Chen *et al.*, 2019; Flórez *et al.*, 2023).

Filmes de SPI puros, sem aditivos, são excessivamente rígidos e quebradiços, exibindo alta tensão de ruptura, mas um alongamento muito baixo, tipicamente na faixa de 1 a 10% (Rani; Kumar, 2019; Purewal *et al.*, 2024).

A adição de plastificantes, como o glicerol, é uma etapa essencial para conferir flexibilidade, aumentando drasticamente a EAB (frequentemente para valores superiores a 50%). No entanto, essa melhoria ocorre geralmente ao custo de uma redução na resistência (TS) e na rigidez (EM), estabelecendo um trade-off fundamental no design desses materiais (Milani; Tirgarian, 2020). A Figura 4 ilustra esquematicamente como a adição do plastificante altera a microestrutura do filme, explicando este balanço fundamental entre resistência e alongamento.

Figura 4 – Representação esquemática do efeito da adição de plastificante na microestrutura e nas propriedades mecânicas de um filme de proteína de soja isolada (SPI)



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

### 5.3.2 Estratégias de reforço: nanocompósitos e reticulação química

Para superar o balanço desfavorável entre resistência e flexibilidade, a literatura recente aponta para duas estratégias principais: o reforço da matriz com nanocompósitos e a indução de reticulação (crosslinking).

A primeira abordagem, que foca na criação de uma rede de interações físicas para uma distribuição mais eficiente da tensão, é exemplificada pelo uso de celulose microcristalina (MCC), que resultou em ganhos de até 75,9% no módulo de elasticidade com a adição de apenas 1% (Zhang *et al.*, 2024; Zhao *et al.*, 2021).

Já a segunda abordagem, a reticulação, busca fortalecer a própria matriz proteica por meio de novas ligações covalentes, como nas redes híbridas desenvolvidas por Xu *et al.* (2022) com o uso de agentes epoxídicos.

Outras interações, como as induzidas pela quercetina, podem atuar de forma complementar, alterando a conformação secundária da proteína para aumentar a estabilidade térmica e, por consequência, o desempenho mecânico (Rani *et al.*, 2025).

A comparação entre essas estratégias revela um trade-off: enquanto o reforço com nano reforços de origem natural pode apresentar um caminho regulatório mais simples, a reticulação química controlada tende a oferecer ganhos de desempenho mais expressivos, embora com maior complexidade de formulação, conforme detalhado na Tabela 2.

Tabela 2 – Comparativo de estratégias de reforço para biofilmes de proteína de soja isolada(continua).

Referência (Autor, Ano)	Modificação Principal/ Aditivo	Objetivo Principal do Estudo	Principal Resultado Quantitativo	Limitação / Trade-off observado
<b>Tang et al. (2019)</b>	Adição de 0.2% de Nanopartículas de ZnO	Melhorar propriedades mecânicas e atividade antimicrobiana	Aumento de 231% na resistência à tração (de ~1.5 MPa para ~5 MPa) e 16% na inibição microbiana	Necessidade de controle preciso da concentração de ZnO; concentrações acima de 0.2% podem causar agregação das nanopartículas
<b>Zhao et al. (2024)</b>	Reticulação com Ácido Tânico (TA) em Filmes SPI/Amido Dialdeídico	Melhorar resistência mecânica, resistência UV e propriedades antibacterianas através de reticulação verde	Aumento de 208.27%, na resistência à tração comparado ao SPI puro (152.99% comparado ao SPI/DAS)	Processo requer condições alcalinas; oxidação controlada do TA necessária; possível coloração escura do filme devido ao TA
<b>Li et al. (2017)</b>	Adição de Quitosana e Nanoclusters de Cu	Melhorar simultaneamente resistência e flexibilidade	Aumento de 118.78% na resistência à tração (de 2.29 para 5.01 MPa) e 74.93% na alongação (de 17.63% para 30.84%)	Aumento do conteúdo de umidade (de 9.89% para 14.09%); processo de síntese de nanoclusters requer controle de pH específico
<b>Qin et al. (2019)</b>	Reforço com Nanofibras de Celulose (CNF) e Nanopartículas de Nano-Sílica (NS) funcionalizadas com KH560	Reforço sinérgico para melhorar propriedades mecânicas e de barreira à água	Aumento de 90.54% na resistência à tração (de 3.49 para 6.65 MPa)	Processo de modificação de superfície em múltiplas etapas; complexidade na funcionalização com silano; possível redução da alongação

Tabela 2 – Comparativo de estratégias de reforço para biofilmes de proteína de soja isolada(continuação).

Referência (Autor, Ano)	Modificação Principal/ Aditivo	Objetivo Principal do Estudo	Principal Resultado Quantitativo	Limitação / Trade-off observado
<b>Kang et al. (2016)</b>	Celulose Microcristalina (MCC) modificada com Polidopamina (PDA)	Melhorar propriedades mecânicas e reduzir absorção de água através de modificação biomimética	Aumento de 82.3% na resistência à tração e redução de 31.3% na absorção de água	Processo de modificação biomimética mais complexo; necessidade de dopamina e controle de pH; custo mais elevado de produção
<b>Zhang et al. (2024)</b>	Adição de 1% de Celulose Microcristalina (MCC)	Melhorar propriedades mecânicas	Aumento de 75.9% no Módulo de Elasticidade	Aumento da rigidez em detrimento da flexibilidade (redução da alongação)
<b>Xu et al. (2022)</b>	Reticulação com agente epoxídico em estrutura biomimética ("tijolo-e-argam assa")	Aumentar drasticamente a resistência e tenacidade	Aumento de 392% na resistência à tração e 391% na tenacidade	Alta complexidade de fabricação; uso de reticulante químico não alimentar
<b>Li et al. (2019)</b>	Criação de ligações dinâmicas de dissulfeto	Desenvolver filme auto regenerativo e resistente	Alta resistência mecânica e capacidade de auto regeneração (>90% de eficiência)	Complexidade de síntese para viabilizar produção em larga escala

Tabela 2 – Comparativo de estratégias de reforço para biofilmes de proteína de soja isolada(conclusão).

Referência (Autor, Ano)	Modificação Principal/ Aditivo	Objetivo Principal do Estudo	Principal Resultado Quantitativo	Limitação / Trade-off observado
<b>Zeng et al. (2023)</b>	Reticulação com ácido cítrico	Melhorar propriedades mecânicas com um agente "verde"	Aumento significativo na resistência à tração e Módulo de Young	Pode induzir amarelamento do filme; requer otimização de temperatura e pH
<b>Zhao et al. (2021)</b>	Adição de nanocristais de celulose de algodão (CNC)	Reforçar a matriz proteica com nano reforço	Aumento de 45% na resistência à tração com 5% de CNC	Dispersão homogênea do nano reforço na matriz é um desafio técnico

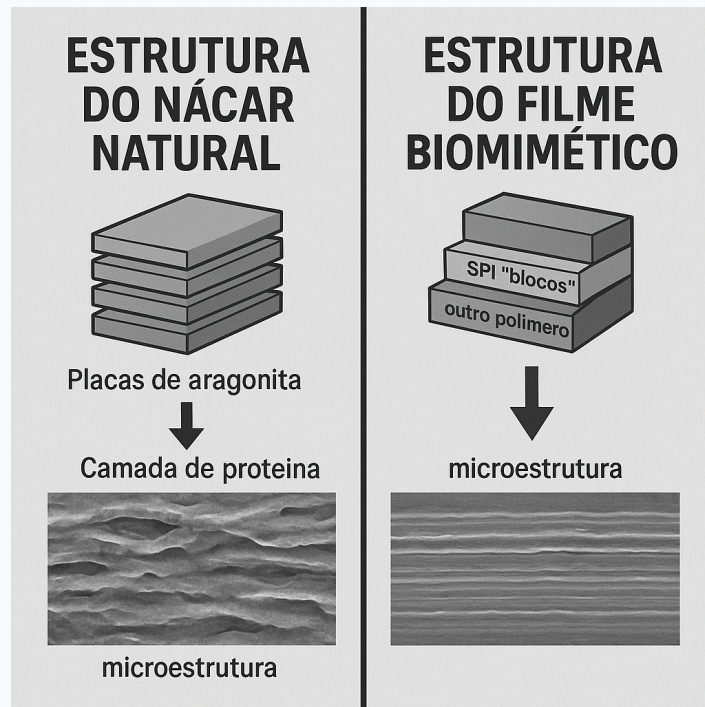
Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

### 5.3.3 Inovações estruturais: biomimética e materiais auto regenerativos

Uma das estratégias mais inovadoras para o aprimoramento mecânico é a biomimética, que busca replicar arquiteturas de alta performance encontradas na natureza. Inspirados na excepcional tenacidade do nácar (madrepérola), pesquisadores têm desenvolvido filmes com uma estrutura hierárquica do tipo "tijolo-e-argamassa" (brick-and-mortar). No nácar, camadas de placas de aragonita ("tijolos" rígidos) são unidas por uma fina camada de biopolímeros ("argamassa" flexível), uma arquitetura que dissipa grandes quantidades de energia sob tensão (Xu *et al.*, 2022).

Ao mimetizar essa estrutura utilizando SPI quimicamente reticulado como "tijolos" e um elastômero como "argamassa", obteve-se um aumento de 392% na resistência à tração e de 391% na tenacidade em comparação com filmes convencionais, conforme evidenciado por micrografias de fratura que revelam uma transição de fratura frágil para dúctil (Hadidi *et al.*, 2022).

Figura 5 – Comparação entre a estrutura do nácar natural e a estrutura biomimética de filmes de proteína de soja isolada(SPI)



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Na mesma linha de engenharia estrutural avançada, Li *et al.* (2019) desenvolveram biofilmes com capacidade de auto regeneração e alta resistência mecânica através da formação de uma rede contendo ligações dinâmicas de dissulfeto e interações hidrofóbicas, demonstrando o vasto potencial para o design de materiais de soja com funcionalidades avançadas.

### 5.3.4 Propriedades de barreira

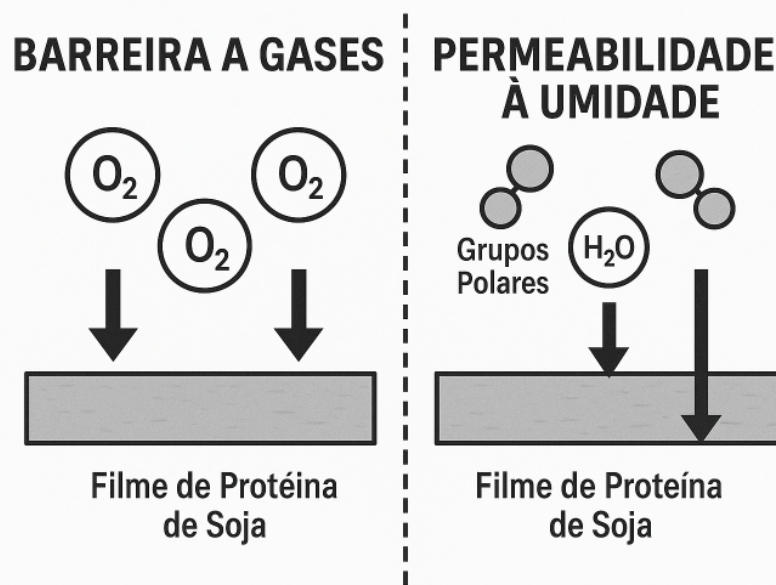
#### 5.3.4.1 A dualidade da barreira: permeabilidade a gases vs. vapor de água

As propriedades de barreira dos biofilmes de proteína de soja isolada, particularmente a permeabilidade ao vapor de água (WVP) e ao oxigênio (OP), são parâmetros críticos que definem suas aplicabilidades em embalagens de alimentos (Mohamed *et al.*, 2020). Estes materiais exibem uma dualidade de desempenho notável. Devido à sua natureza polar e à estrutura molecular densa formada pelas adsorção de cadeias proteicas, os filmes de SPI geralmente apresentam uma excelente barreira a gases apolares como oxigênio (O<sub>2</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), especialmente em condições de baixa umidade relativa. Neste quesito, podem

superar em centenas de vezes o desempenho de filmes plásticos convencionais, pois a matriz densa e polar dificulta a difusão de moléculas apolares ((Mohamed *et al.*, 2020; Gonzalez-Rios *et al.*, 2024; López *et al.*, 2020).

Contudo, o ponto de fragilidade dos filmes de SPI é sua alta permeabilidade ao vapor de água. As mesmas interações polares (grupos amino e carboxila) que barram os gases apolares interagem fortemente com as moléculas de água, facilitando sua adsorção e difusão através da matriz, o que limita sua aplicação em alimentos com alta atividade de água (Chen *et al.*, 2019; Gonzalez-Rios *et al.*, 2024).

Figura 6 – Esquema ilustrando a dualidade de barreira dos filmes de proteína de soja isolada: resistência a gases apolares e maior permeabilidade ao vapor d'água



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

#### 5.3.4.2 Estratégias para aprimoramento da barreira à umidade

A superação da alta permeabilidade à umidade é um dos focos centrais da pesquisa, com as estratégias se concentrando em duas abordagens principais: aumentar a hidrofobicidade da matriz ou aumentar sua tortuosidade estrutural.

A primeira abordagem é comumente alcançada pela incorporação de compostos lipofílicos. Exemplos incluem o uso de óleos essenciais, que reduzem a

WVP e o inchamento do filme (Hu *et al.*, 2025), e a adição de ácidos graxos, como o esteárico e o oleico, que aumentam a hidrofobicidade superficial (Chen *et al.*, 2022).

A segunda abordagem visa criar uma estrutura interna mais compacta para dificultar fisicamente a passagem das moléculas de água. Nesse sentido, a incorporação de nano reforços como a celulose microcristalina tem se mostrado eficaz, promovendo uma melhora de 12,9% na barreira ao vapor de água devido à formação de uma rede mais densa e com menores espaços intermoleculares (Zhang *et al.*, 2024).

Estas estratégias demonstram que a modificação da formulação, seja por meio da adição de componentes hidrofóbicos ou de reforços estruturais, é fundamental para modular as propriedades de barreira e expandir o potencial de aplicação dos biofilmes de soja.

Tabela 3– Comparativo de estratégias para a modulação das propriedades de barreira em biofilmes de proteína de soja isolada(continua).

Referência (Autor, Ano)	Modificação Principal / Aditivo	Objetivo Principal do Estudo	Principal Resultado Quantitativo	Limitação / Trade-off Observado
<b>Hu <i>et al.</i> (2025)</b>	Incorporação de óleo essencial de pimenta Sichuan	Melhorar barreira à umidade e dar função ativa	Redução significativa da Permeabilidade ao Vapor de Água (WVP) e do inchamento	Potencial de alteração das propriedades sensoriais (aroma, sabor) do alimento
<b>Chen <i>et al.</i> (2022)</b>	Adição de ácidos graxos (esteárico e oleico) a uma blenda SPI/alginato	Aumentar a hidrofobicidade e a barreira à umidade	Aumento do ângulo de contato (hidrofobicidade) e redução da WVP	Pode afetar a homogeneidade, transparência e propriedades mecânicas do filme

Tabela 3– Comparativo de estratégias para a modulação das propriedades de barreira em biofilmes de proteína de soja isolada(continuação).

Referência (Autor, Ano)	Modificação Principal / Aditivo	Objetivo Principal do Estudo	Principal Resultado Quantitativo	Limitação / Trade-off Observado
<b>Xiao et al. (2020)</b>	Incorporação de Nanopartículas de ZnO e CNC	Melhorar barreira a gases (O <sub>2</sub> ) e UV, além de dar função ativa	Redução da permeabilidade ao oxigênio e bloqueio de >99% da luz UV	Risco de agregação das nanopartículas; barreiras regulatórias para nano-ZnO
<b>Khayrullin et al. (2023)</b>	Reticulação da matriz proteica (Revisão)	Aumentar a densidade da rede para reduzir a difusão de moléculas	Redução da WVP e da permeabilidade a gases devido à rede mais compacta	Reticulação excessiva pode diminuir drasticamente a taxa de biodegradabilidade
<b>López et al. (2020)</b>	Incorporação de talco (nanoargila) em amido (análogo ao SPI)	Aumentar a tortuosidade do caminho difusivo	Redução da permeabilidade a gases (O <sub>2</sub> ) devido ao efeito de barreira das nanoargilas	Requer alta esfoliação e dispersão da argila para ser eficaz
<b>Wu et al. (2019)</b>	Cinamaldeído e nano lâminas de ZnO	Melhorar propriedades de barreira e adicionar função antifúngica	Inibição potente contra <i>Aspergillus niger</i> e <i>Penicillium</i>	Forte aroma do cinamaldeído; migração e regulação de nano-ZnO
<b>Zhang et al. (2024)</b>	Celulose microcristalina (MCC) de casca de milho	Reforço mecânico e melhoria da barreira à umidade	Melhora de 12,9% na barreira ao vapor de água (WVP)	Aumento da rigidez do filme (aumento do módulo de elasticidade)

Tabela 3– Comparativo de estratégias para a modulação das propriedades de barreira em biofilmes de proteína de soja isolada(conclusão).

Referência (Autor, Ano)	Modificação Principal / Aditivo	Objetivo Principal do Estudo	Principal Resultado Quantitativo	Limitação / Trade-off Observado
<b>Xue et al. (2019)</b>	Encapsulamento de óleo essencial (em emulsão SPI-goma acácia)	Garantir a liberação controlada de compostos bioativos	Criação de filme à base de emulsão para encapsular e proteger bioativos	Complexidade da formulação da emulsão; potencial alteração sensorial
<b>Zeng et al. (2023)</b>	Reticulação com ácido cítrico	Aumentar a resistência mecânica e a estabilidade da rede proteica	Aumento de 70% na resistência à tração (TS) em comparação ao filme controle	Necessidade de otimização da concentração de ácido cítrico para evitar fragilização
<b>Raeisi et al. (2021)</b>	Eletrofiação de nanofibras com óleos essenciais (Zataria e canela)	Criar nanofibras com alta área superficial para melhorar a funcionalidade antimicrobiana	Alta atividade antibacteriana contra E. coli e S. aureus	Processo de fabricação mais complexo (eletrofiação); alto custo de produção em escala

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

### 5.3.5 Propriedades ópticas e transparência

As propriedades ópticas, como transparência, brilho e cor, são determinantes para a aceitação do consumidor em embalagens onde a visualização do produto é importante (Chen *et al.*, 2019). Biofilmes de SPI geralmente apresentam uma coloração levemente amarelada, decorrente de pigmentos naturais da soja. Embora essa característica possa ser vantajosa ao conferir uma proteção natural contra a luz UV, ela pode ser uma limitação em aplicações que exigem alta transparência (Rani *et al.*, 2019).

No entanto, essas propriedades podem ser moduladas. Hu *et al.* (2025) relataram que a incorporação de óleo essencial de pimenta Sichuan resultou em filmes mais claros e transparentes. Por outro lado, a adição de outros componentes, como nanopartículas em concentrações elevadas, pode aumentar a opacidade devido à dispersão da luz (Xiao *et al.*, 2020). De modo geral, quando bem

formulados, os filmes são considerados transparentes e com boa aparência, características desejáveis para muitas aplicações alimentícias (Milani; Tirgarian, 2020).

### **5.3.6 Propriedades ativas: funcionalidade antimicrobiana e antioxidante**

Uma das áreas mais promissoras é a utilização da matriz de SPI como um veículo para compostos bioativos, criando embalagens ativas capazes de prolongar a vida útil dos alimentos (Tkaczewska, 2020). A versatilidade da matriz proteica permite a incorporação de uma vasta gama de agentes, incluindo nanomateriais, óxidos metálicos e compostos bioativos de origem vegetal, como extratos e óleos essenciais.

Estudos mostraram a incorporação bem-sucedida de nanopartículas de prata para atividade antibacteriana de amplo espectro (Alizadeh Sani *et al.*, 2022) e de cinamaldeído com nano lâminas de óxido de zinco para uma potente ação antifúngica contra *Aspergillus niger* e *Penicillium* (WU *et al.*, 2019). Além da proteção microbiana, a funcionalidade antioxidante também pode ser adicionada.

Rani *et al.* (2025) demonstraram um aumento significativo na capacidade de sequestro de radicais livres em filmes com adição de quercetina. De forma ainda mais complexa, Huang *et al.* (2021) criaram um filme multifuncional ao incorporar extrato de casca de mangostão e nanopartículas de ZnO, obtendo um material com atividade antibacteriana, antioxidante e com bloqueio de UV simultaneamente.

### **5.3.7 Biodegradabilidade e análise crítica do ciclo de vida**

A principal vantagem ambiental atribuída aos biofilmes de SPI é sua biodegradabilidade, contrastando com a persistência dos plásticos sintéticos (Versino *et al.*, 2023). Ao serem decompostos por microrganismos, eles retornam ao ciclo biogeoquímico. A taxa de degradação é influenciada por fatores como o grau de reticulação do filme e as condições do ambiente (Mohamed *et al.*, 2020), e estudos revelam fases de degradação com a ruptura das ligações peptídicas (RANI *et al.*, 2025). Além disso, por serem ricos em nitrogênio, sua decomposição no solo pode atuar como um condicionador, contribuindo para a fertilidade (Versino *et al.*, 2023; Walker; Rothman, 2020).

Contudo, a afirmação de que um material biodegradável é inerentemente "mais sustentável" é uma simplificação. A metodologia padrão-ouro para uma avaliação holística é a Análise de Ciclo de Vida (ACV), que quantifica os impactos desde a extração da matéria-prima ("berço") até o descarte ("túmulo"). Uma análise comparativa, conforme os dados inferidos na Tabela 2, revela trade-offs ambientais complexos entre o biofilme de soja, o PET (Polietileno Tereftalato) e o PLA (Poliácido Láctico). A produção de biofilmes de SPI tende a ter um impacto menor no uso de combustíveis fósseis e nas emissões de gases de efeito estufa (GEE), pois utiliza carbono de fonte renovável. No entanto, por depender da agricultura, seu impacto é significativamente maior em categorias como uso da terra, consumo de água e potencial de eutrofização dos corpos d'água devido ao uso de fertilizantes (Walker; Rothman, 2020; Brentin, 2014).

Adicionalmente, existe um trade-off entre o desempenho técnico e a sustentabilidade no fim de vida. A reticulação química, por exemplo, que é eficaz para aumentar a resistência do filme, pode diminuir drasticamente sua taxa de biodegradabilidade ao criar uma rede mais resistente ao ataque microbiano.

Da mesma forma, compósitos com polímeros sintéticos como o TPU, embora mecanicamente superiores, criam um material híbrido de difícil reciclagem e compostagem, desafiando os princípios da economia circular.

Isso demonstra que a busca pelo material de melhor desempenho pode levar a soluções que contradizem o objetivo inicial de sustentabilidade, destacando a necessidade de uma abordagem de co-design que considere o desempenho e o fim de vida simultaneamente (Walker; Rothman, 2020; Brentin, 2014).

Tabela 4 – Comparativo de impacto ambiental (ACV) entre PET, PLA e biofilme de soja

<b>Categoria de Impacto</b>	<b>PET (Virgem)</b>	<b>PET (Reciclado)</b>	<b>PLA</b>	<b>Biofilme de Proteína de Soja (Inferido)</b>
<b>Uso de Combustíveis Fósseis</b>	Alto	Baixo	Baixo-Médio	Baixo-Médio
<b>Emissões de GEE (kg CO2-eq)</b>	Alto	Muito Baixo	Médio	Médio
<b>Consumo de Água</b>	Baixo	Muito Baixo	Muito Alto	Muito Alto
<b>Uso da Terra</b>	Nulo	Nulo	Alto	Alto
<b>Potencial de Eutrofização</b>	Baixo	Baixo	Alto	Alto
<b>Fim de Vida</b>	Reciclável (sistema estabelecido)	Reciclável	Compostável (requer instalação industrial)	Biodegradável/Compostável

Fonte: Elaborado pelos autores (2025), com base em ( Walker; Rothman, 2020; Brentin, 2014).

## 5.4 APLICAÇÕES DOS BIOFILMES DE PROTEÍNA DE SOJA ISOLADA

### 5.4.1 Embalagens para alimentos

A aplicação de biofilmes de SPI como embalagens ativas se manifesta através de diversas estratégias antimicrobianas. Uma abordagem de alta especificidade é o uso de agentes de biocontrole, como os bacteriófagos, que foram empregados com sucesso para inibir *Escherichia coli* O157:H7 em carne bovina, demonstrando um controle direcionado e eficaz (Choo *et al.*, 2024).

Em contraste, outros estudos focam em agentes de amplo espectro para combater uma gama maior de microrganismos. Essa abordagem inclui a combinação de compostos de origem vegetal, como o cinamaldeído, com nano lâminas de óxido de zinco para uma potente ação antifúngica (Wu *et al.*, 2019), e o encapsulamento de óleos essenciais para garantir uma liberação controlada e prolongada de seus compostos bioativos (Xue *et al.*, 2019).

Adicionalmente, a natureza comestível e biodegradável desses filmes permite sua aplicação em contato direto com alimentos como frutas, vegetais e confeitos, atuando como uma película protetora que pode ser consumida junto ao produto, eliminando resíduos de embalagem (Milani; Tirgarian, 2020).

Tabela 5 – Comparativo de funcionalidades ativas e inteligentes incorporadas em biofilmes de proteína de soja isolada(continua).

Referência (Autor, Ano)	Modificação Principal / Aditivo	Função (Ativa ou Inteligente)	Principal Resultado Funcional	Limitação / Desafio
<b>Prajapati &amp; Jadeja (2024)</b>	Incorporação de Extrato de Casca de Pitaya Vermelha (Betalaínas)	Ativa: Antioxidante e Bloqueio UV	Atividade antioxidante elevada (filme SPI D); bloqueio total de UV (200-300 nm); aumento de 78.76% na resistência à tração	Aplicação limitada em alimentos com alto teor de água (migração elevada em simulante aquoso >1400 mg/kg); estabilidade do pigmento betalaína sensível a luz e calor

Tabela 5 – Comparativo de funcionalidades ativas e inteligentes incorporadas em biofilmes de proteína de soja isolada(continuação).

Referência (Autor, Ano)	Modificação Principal / Aditivo	Função (Ativa ou Inteligente)	Principal Resultado Funcional	Limitação / Desafio
<b>Sun et al. (2024)</b>	Conjugado de Quercetina-Amido Dialdeído (DAS-QR)	Ativa: Antioxidante e Antimicrobiana (amplo espectro)	Atividade antioxidante: 79.8% DPPH e 62.1% ABTS; atividade antibacteriana de 92.7% contra <i>S. aureus</i> ; preservação eficaz de batatas frescas	Processo de conjugação química aumenta complexidade e custo; liberação sustentada pode ser mais lenta que bioativos livres; possível coloração amarelada do filme
<b>Hu et al. (2023)</b>	Incorporação de Nanopartículas de TiO <sub>2</sub> (1-4% w/w)	Ativa: Antimicrobiana e Bloqueio UV	Bloqueio UV aprimorado (redução >95% em 200-400 nm); atividade antibacteriana significativa; resistência à tração de 6.77 MPa com 2.5% TiO <sub>2</sub>	Redução da flexibilidade com aumento de TiO <sub>2</sub> ; agregação de nanopartículas em altas concentrações; necessidade de dispersante (PVP); preocupações regulatórias sobre migração de nanomateriais
<b>Li et al. (2025)</b>	Reticulação com Ácido Tânico (TA) em Sistema SPI/CMC com Liberação Responsiva a pH	Ativa/Inteligente: Liberação controlada de antioxidante responsiva a pH (deterioração alimentar)	Liberação on-demand de TA: 89% de eficiência antibacteriana; prolongamento da vida útil de camarão em 4 dias através de resposta a pH	Processo requer controle preciso de pH alcalino; liberação de TA depende de mudanças de pH específicas; possível coloração escura; sistema de múltiplos componentes aumenta complexidade

Tabela 5 – Comparativo de funcionalidades ativas e inteligentes incorporadas em biofilmes de proteína de soja isolada(continuação).

Referência (Autor, Ano)	Modificação Principal / Aditivo	Função (Ativa ou Inteligente)	Principal Resultado Funcional	Limitação / Desafio
<b>Sun et al. (2022)</b>	Filme Inteligente de Proteína Lipofílica de Soja/HPMC com Extrato de Repolho Roxo (Antocianinas)	Inteligente: Sensor de pH para monitoramento de frescor	Mudança de cor visível de rosa/vermelho para amarelo/verde com aumento de pH (5.2 a 8.5); monitoramento eficaz do frescor de salmão por 10 dias	Sensibilidade do indicador antocianina à luz e temperatura; degradação durante armazenamento prolongado; necessidade de interpretação da mudança de cor pelo consumidor
<b>Choo et al. (2024)</b>	Incorporação de bacteriófago CAM-21	Ativa: Antimicrobiana (alta especificidade)	Forte inibição de E. coli O157:H7 em carne bovina	Eficaz apenas contra um patógeno-alvo; não possui ação de amplo espectro
<b>Wu et al. (2019)</b>	Cinamaldeído e nano lâminas de ZnO	Ativa: Antifúngica (amplo espectro)	Inibição eficaz de <i>Aspergillus niger</i> e <i>Penicillium</i>	Forte aroma do cinamaldeído; migração e regulação de nano-ZnO
<b>Huang et al. (2021)</b>	Extrato de casca de mangostão e nano-ZnO	Ativa: Multifuncional (Antimicrobiana, Antioxidante, bloqueio de UV)	Atividade simultânea contra bactérias, oxidação e radiação UV	Extrato pode conferir cor escura ao filme; interações complexas entre os aditivos

Tabela 5 – Comparativo de funcionalidades ativas e inteligentes incorporadas em biofilmes de proteína de soja isolada (conclusão).

Referência (Autor, Ano)	Modificação Principal / Aditivo	Função (Ativa ou Inteligente)	Principal Resultado Funcional	Limitação / Desafio
<b>Ahmadzadeh et al. (2023)</b>	Extratos polifenólicos (semente de uva, chá verde) em filme impresso 3D	Ativa: Antioxidante	Inibição da oxidação lipídica e sequestro de radicais livres Mudança de cor visível (roxo → verde) na presença de aminas voláteis	Processo de impressão 3D é lento e a formulação da "tinta" é complexa
<b>Gonzalez-Rios et al. (2024)</b>	Incorporação de Antocianinas (ex: repolho roxo)	Inteligente: Sensor de pH	(sinal de deterioração)	Estabilidade do pigmento natural à luz e ao calor pode ser baixa

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

#### 5.4.2 Revestimentos comestíveis

Além de filmes independentes, a proteína de soja isolada pode ser utilizada para formar revestimentos comestíveis diretamente na superfície dos alimentos, atuando como barreira e veículo para compostos bioativos (Mihalca *et al.*, 2021). Revestimentos à base de proteína de soja isolada têm sido aplicados em frutas, vegetais, produtos cárneos e produtos de panificação para reduzir a perda de umidade, retardar a oxidação lipídica, melhorar a aparência e prolongar a vida útil (Akrami *et al.*, 2022).

Um estudo recente demonstrou que o revestimento de frutas com um filme comestível de proteína de soja isolada dopado com hidroxipropil metilcelulose resultou em melhor preservação, reduzindo a perda de peso e mantendo a firmeza e qualidade sensorial durante o armazenamento (Yan *et al.*, 2022).

Soluções filmogênicas de proteína de soja isolada podem ser aplicadas como cobertura em queijos, frutas cortadas ou produtos de panificação, formando uma camada fina que protege contra contaminação e desidratação (Akrami *et al.*, 2022).

Esses revestimentos são praticamente invisíveis e imperceptíveis ao paladar quando bem formulados, agregando valor sem prejudicar a aceitação do produto.

### **5.4.3 Aplicações biomédicas**

A versatilidade dos biopolímeros de proteína de soja isolada, aliada a características intrínsecas como biocompatibilidade, biodegradabilidade e baixa imunogenicidade, tem impulsionado pesquisas para seu uso em aplicações biomédicas avançadas. Diferentemente de muitos polímeros sintéticos, os materiais à base de proteína de soja isolada oferecem uma plataforma que pode interagir favoravelmente com sistemas biológicos. Conforme destacam Chen *et al.* (2021), essa combinação de propriedades é fundamental para o desenvolvimento de biomateriais de próxima geração.

Devido à sua excelente biocompatibilidade, biodegradabilidade, abundância, baixo custo e fácil processamento, as proteínas de soja isoladas têm sido amplamente utilizadas em campos biomédicos, como na engenharia de tecidos, liberação de fármacos e tratamento de feridas. A estrutura molecular única das proteínas de soja isoladas permite que sejam facilmente modificadas para atender a requisitos específicos (Chen *et al.*, 2021).

Essa capacidade de modificação é crucial, pois permite que as propriedades mecânicas e a taxa de degradação dos biomateriais sejam ajustadas para diferentes finalidades. Um estudo de Aderibigbe e Naki (2022) reforça como a combinação da proteína de soja isolada com outros polímeros pode otimizar seu desempenho para aplicações biomédicas.

A mistura de proteína de soja isolada com polímeros naturais ou sintéticos tem se mostrado uma estratégia eficaz para desenvolver biomateriais com propriedades mecânicas aprimoradas, estabilidade e funcionalidade versátil. Esses compósitos são promissores para o tratamento de feridas e liberação controlada de fármacos, onde a sinergia entre os componentes resulta em um desempenho superior ao dos materiais individuais (Aderibigbe; Naki, 2022).

#### 5.4.3.1 Curativos para Feridas

No tratamento de feridas, os curativos modernos devem ir além da simples proteção, participando ativamente do processo de cicatrização. Os hidrogéis de proteína de soja isolada são ideais para essa função, pois mantêm um ambiente úmido, essencial para a migração celular, e podem ser carregados com agentes terapêuticos. A pesquisa de Maleki *et al.* (2023) evidencia o potencial desses materiais como curativos bioativos.

Curativos à base de hidrogel de proteína de soja isolada, carregados com extratos de plantas como a curcumina, demonstraram excelentes propriedades antibacterianas e de promoção da cicatrização. Esses curativos não apenas protegem a ferida, mas também liberam compostos bioativos que aceleram o fechamento da lesão e a regeneração do tecido epitelial (Maleki *et al.*, 2023).

#### 5.4.3.2 Sistemas de Liberação Controlada de Fármacos

A estrutura anfifílica da proteína de soja isolada a torna uma excelente carreadora para uma vasta gama de fármacos, tanto hidrofílicos quanto hidrofóbicos. A matriz polimérica protege a molécula do fármaco da degradação prematura no organismo e permite sua liberação de forma sustentada, o que é crucial para tratamentos crônicos ou localizados. Qi *et al.* (2022) descrevem essa vantagem.

As nanopartículas e micropartículas baseadas em proteína de soja isolada funcionam como veículos eficientes para a entrega de fármacos e nutrientes. Sua alta capacidade de encapsulamento e perfil de liberação controlada por pH as tornam adequadas para administração oral, onde protegem a carga bioativa da degradação gástrica e a liberam no intestino, aumentando a biodisponibilidade (Qi *et al.*, 2022, p. 9).

#### 5.4.3.3 Engenharia de Tecidos

Na engenharia de tecidos, o objetivo é criar arcabouços (scaffolds) que sirvam de molde para o crescimento de novas células e a formação de tecido. A proteína de soja isolada pode ser processada em estruturas porosas tridimensionais que mimetizam a matriz extracelular. A biodegradabilidade do material é uma vantagem central, pois o arcabouço é gradualmente reabsorvido pelo corpo à medida que o

novo tecido se regenera, eliminando a necessidade de uma segunda cirurgia para remoção do implante.

Arcabouços porosos fabricados a partir de isolado de proteína de soja isolada demonstraram suportar a adesão e proliferação de vários tipos de células, incluindo fibroblastos e osteoblastos. A possibilidade de modificar quimicamente a superfície da proteína para incluir sequências de adesão celular melhora ainda mais a interação célula-material (Wang *et al.*, 2019, p. 4).

Além disso, a combinação da proteína com minerais bioativos, como a hidroxiapatita, pode direcionar a regeneração de tecidos específicos, como o osso. (Ramos-Cruz *et al.*, 2021)

Compósitos de proteína de soja isolada e nano cristais de hidroxiapatita foram desenvolvidos como arcabouços para a engenharia de tecido ósseo. Esses materiais apresentaram porosidade interconectada e resistência mecânica adequada, além de promoverem a adesão e proliferação de células osteoblásticas, indicando alto potencial para aplicações em regeneração óssea (Ramos-Cruz *et al.*, 2021)

## 5.5 Síntese, multifuncionalidade e novas fronteiras

A fronteira entre embalagens "ativas", "inteligentes" e estruturalmente reforçadas está se tornando cada vez mais tênue, com uma forte tendência para o desenvolvimento de sistemas multifuncionais. Aditivos como os extratos de plantas ricos em polifenóis podem atuar simultaneamente como antioxidantes (função ativa), reticulantes (melhora mecânica) e, no caso das antocianinas, como indicadores de pH (função inteligente) (Gonzalez-Rios *et al.*, 2024).

Além disso, as tecnologias desenvolvidas para embalagens têm aplicabilidade direta em áreas de alto valor, como a biomedicina. Um filme de SPI com nanofibras para liberação controlada de antimicrobianos é, conceitualmente, um curativo avançado para feridas, e um hidrogel de SPI impresso em 3D pode servir como um andaime para engenharia de tecidos, aproveitando a biocompatibilidade e biodegradabilidade da proteína (Purewal *et al.*, 2024; Mohamed *et al.*, 2020).

### 5.5.1 Desafios e perspectivas futuras

Apesar dos avanços significativos, desafios importantes persistem para a aplicação comercial dos biofilmes de soja em larga escala. A sensibilidade à umidade continua sendo a principal limitação, restringindo o uso em produtos com alta atividade de água. As propriedades mecânicas, embora aprimoradas por estratégias de reforço, ainda são geralmente inferiores às dos plásticos sintéticos convencionais, o que desafia sua adoção em aplicações que exigem alta resistência e flexibilidade (Chen *et al.*, 2019; Zhao *et al.*, 2021).

Além disso, o custo de produção e a escalabilidade dos processos de modificação, bem como a variabilidade da matéria-prima, representam barreiras econômicas e industriais significativas. A extrusão, por exemplo, é uma tecnologia escalável, mas as altas temperaturas e o cisalhamento exigem um controle rigoroso para evitar a degradação da proteína e a perda de propriedades mecânicas do filme (López *et al.*, 2020).

Já o método de *casting*, embora simples para o laboratório, é inviável para a produção industrial devido ao longo tempo de secagem e ao alto consumo de energia. O custo dos bioplásticos em geral, estimado entre US\$ 2.5 e 15/kg, permanece mais alto que o dos plásticos de petróleo, que ficam entre US\$ 1 e 5/kg, embora essa diferença se reduza em cenários de alta no preço do petróleo (Walker; Rothman, 2020). O custo da proteína de soja isolada (SPI) é, na verdade, o fator mais crítico para a lucratividade do biofilme, superando até mesmo os custos de energia.

Outro obstáculo crítico é o complexo e oneroso cenário regulatório para Materiais em Contato com Alimentos (MCA), muitas vezes referido como o "Vale da Morte" regulatório. As formulações mais avançadas, que incluem novos nanocompósitos ou reticulantes mais eficazes, enfrentam as maiores e mais custosas barreiras regulatórias para obter aprovação de agências como ANVISA, FDA e EFSA (Anvisa, 2024; Fda, 2022; European Food Safety Authority, 2024). Isso tende a pressionar o mercado a focar em inovações incrementais de mais fácil aprovação, limitando o avanço de soluções verdadeiramente disruptivas.

Contudo, os avanços contínuos na funcionalização demonstram que, embora a substituição completa dos plásticos tradicionais não seja iminente, os biofilmes de soja estão se consolidando como materiais de alto desempenho para nichos de mercado específicos, desempenhando um papel crucial na construção de sistemas de embalagem mais sustentáveis e inteligentes (Chen *et al.*, 2021; Purewal *et al.*, 2024).

A inovação deve ser orientada pela regulamentação, direcionando esforços para o uso de aditivos e modificadores que já constam nas listas positivas de agências, a fim de acelerar o ciclo de aprovação de novos produtos. Adicionalmente, há uma necessidade premente de mais estudos de Análise de Ciclo de Vida (ACV), que são essenciais para quantificar os benefícios ambientais de forma holística e entender os trade-offs relacionados ao uso da terra e da água (Walker; Rothman, 2020).

Finalmente, o potencial dos biofilmes de SPI deve ser mais explorado em aplicações de alto valor agregado, como no setor biomédico (curativos, liberação de fármacos) e na agricultura de precisão, onde suas propriedades de biocompatibilidade e funcionalidade justificam custos de produção mais elevados (Mihalca *et al.*, 2021).

## 6 PERSPECTIVAS DE MERCADO E CENÁRIO REGULATÓRIO

A transição de uma inovação laboratorial para um produto comercialmente viável depende da atratividade do mercado e da conformidade com as regulamentações vigentes.

### 6.1 ANÁLISE DE MERCADO E VIABILIDADE TECNO-ECONÔMICA

O mercado global de embalagens sustentáveis está em franca expansão. O mercado específico de filmes de proteína foi avaliado em aproximadamente US\$ 2.49 bilhões em 2024, com uma projeção de crescimento para US\$ 4.40 bilhões até 2034, a uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de cerca de 6% (Zion Market Research, 2025; Global Growth Insights, 2025).

O setor de alimentos e bebidas é o principal consumidor (Zion Market Research, 2025). Grandes corporações como IFF, Cargill, DuPont e Archer Daniels Midland (ADM) dominam o fornecimento de SPI, indicando uma cadeia de suprimentos robusta e um forte interesse industrial na matéria-prima (Global Growth Insights, 2025; Zion Market Research, 2025).

A viabilidade econômica depende do custo final do biofilme. Uma Análise Tecno-Econômica (TEA) é a ferramenta utilizada para estimar esses custos (Walker; Rothman, 2020). Um estudo de caso de um revestimento à base de SPI/CNC (Nanocristais de celulose) estimou um preço mínimo de venda de US\$0.59 por kg da solução, um valor competitivo (Rajendran *et al.*, 2024). A análise de sensibilidade revelou que o custo da proteína de soja isolada (SPI) é o fator mais crítico para a lucratividade, superando os custos de energia (Rajendran *et al.*, 2024).

De forma geral, os bioplásticos (US\$ 2.5-15/kg) ainda são mais caros que os plásticos de petróleo (US\$ 1-5/kg), mas essa diferença diminui significativamente quando os preços do petróleo estão altos, tornando os biopolímeros mais competitivos (Medika, 2024; Globe Newswire, 2025). A atratividade do investimento em P & D de biopolímeros é, portanto, parcialmente ditada por fatores geopolíticos e macroeconômicos externos ao setor (Market.Us, 2024).

## 6.2 BARREIRAS REGULATÓRIAS À COMERCIALIZAÇÃO DE MATERIAIS EM CONTATO COM ALIMENTOS (MCA)

O maior desafio para a comercialização de biofilmes de SPI funcionalizados é a navegação no complexo cenário regulatório para Materiais em Contato com Alimentos (MCA). A premissa fundamental, compartilhada globalmente, é que qualquer substância que possa migrar do material para o alimento e representar um risco à saúde humana deve ser rigorosamente avaliada e autorizada antes de sua comercialização (Pires *et al.*, 2024; Sarantópoulos; Rego, 2012). Embora o princípio seja o mesmo, cada região possui seu próprio arcabouço jurídico, criando um mosaico de exigências que os desenvolvedores precisam atender.

No Brasil, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) rege o setor com base em listas positivas, principalmente a RDC nº 56/2012 e suas atualizações. Isso significa que todos os componentes do biofilme — a proteína, os plastificantes e quaisquer aditivos funcionais — devem constar nas listas de substâncias permitidas. A inclusão de um novo aditivo inovador exige a submissão de um dossiê toxicológico completo para avaliação e aprovação, um processo longo e custoso (Hadidi *et al.*, 2022; Sarantópoulos; Rego, 2012; Infoalimentario, 2025). A atual Agenda Regulatória 2024-2025 da ANVISA, que prevê a revisão dessas listas, pode, contudo, abrir caminho para a incorporação de novas tecnologias (ANVISA, 2024).

Nos Estados Unidos, o sistema operado pela Food and Drug Administration (FDA) oferece rotas de conformidade mais diversificadas. A aprovação pode ser obtida pelo uso de substâncias já listadas no Código de Regulamentações Federais (21 CFR), por meio do programa de Notificação de Contato com Alimentos (FCN) — um processo de 120 dias no qual o fabricante submete um dossiê de segurança para um uso específico — ou através de isenções para substâncias Geralmente Reconhecidas como Seguras (GRAS), categoria na qual a própria proteína de soja isolada e plastificantes comuns como o glicerol se enquadram, facilitando sua utilização como base (FDA, 2022).

Na União Europeia, a abordagem é igualmente rigorosa, regida pelo Regulamento-Quadro (CE) nº 1935/2004 e, para materiais plásticos e biopolímeros, pelo Regulamento (UE) nº 10/2011. Este último estabelece uma "Lista da União" de substâncias autorizadas e define Limites de Migração Específicos (SML) para

substâncias individuais, além de um Limite de Migração Global (OML) para a migração total de componentes. A inclusão de uma nova substância na lista demanda uma avaliação de segurança criteriosa pela Autoridade Europeia para a Segurança dos Alimentos (EFSA), um processo conhecido por seu alto nível de exigência (Hadidi *et al.*, 2022; EFSA, 2024; União Europeia, 2011).

Essa estrutura regulatória rigorosa, presente nas três principais jurisdições, cria um paradoxo fundamental para a inovação. As formulações mais avançadas e funcionalmente superiores, como aquelas com novos nanocompósitos ou reticulantes mais eficazes como a genipina, são justamente as que enfrentam as maiores e mais custosas barreiras regulatórias. Isso gera uma pressão de mercado para que a pesquisa e o desenvolvimento se concentrem em formulações "subótimas" que utilizam apenas aditivos já aprovados, arriscando sufocar a inovação disruptiva em favor de melhorias incrementais, mas de mais fácil aprovação (Sarantópoulos; Rego, 2012; EFSA, 2024).

## 7 CONCLUSÃO

Os biofilmes de proteína de soja isolada consolidam-se como uma alternativa promissora e multifacetada aos plásticos convencionais, impulsionados por sua biodegradabilidade, origem renovável, boas propriedades de barreira a gases e pela vasta disponibilidade da matéria-prima. Esta revisão da literatura, focada no período de 2018 a 2025, demonstrou que a pesquisa na área transcende a simples fabricação de filmes básicos, evoluindo para o desenvolvimento de materiais de alta performance com funcionalidades avançadas.

A narrativa central da pesquisa atual é a superação das limitações intrínsecas da SPI — principalmente sua fragilidade mecânica e sensibilidade à umidade — por meio de estratégias sofisticadas de modificação. Os avanços mais significativos incluem o reforço com nanocompósitos, a reticulação química e enzimática e, notavelmente, a criação de estruturas hierárquicas biomiméticas que resultam em melhorias drásticas na tenacidade. Simultaneamente, o desenvolvimento de embalagens ativas e inteligentes representa uma mudança de paradigma, transformando a embalagem de uma barreira passiva para um sistema dinâmico e interativo.

Apesar desses progressos notáveis, a aplicação comercial em larga escala ainda enfrenta desafios consideráveis. A resistência à umidade, embora melhorada, continua a ser um ponto crítico que restringe a aplicação em produtos com alta atividade de água. O custo de produção e a escalabilidade dos processos mais avançados também são barreiras significativas. Além disso, o complexo e dispendioso cenário regulatório para materiais em contato com alimentos representa um obstáculo pragmático que não pode ser ignorado.

Com base nos achados desta revisão, as direções para pesquisas futuras devem ser estratégicas e multidisciplinares, focando em preencher a lacuna entre o laboratório e o mercado. Primeiramente, é crucial investir na otimização de processos e custos, focando em métodos contínuos e escaláveis como a extrusão e a moldagem por compressão, para tornar os biofilmes de SPI economicamente competitivos (Tian *et al.*, 2018; Flórez *et al.*, 2023).

Em segundo lugar, a inovação deve ser orientada pela regulamentação, direcionando esforços para o uso de aditivos e modificadores que já constam nas listas positivas de agências como ANVISA, FDA e EFSA, a fim de acelerar o ciclo de aprovação de novos produtos. Adicionalmente, há uma necessidade premente de mais estudos de Análise de Ciclo de Vida (ACV), que são essenciais para quantificar os benefícios ambientais de forma holística e entender os trade-offs relacionados ao uso da terra e da água (Walker; Rothman, 2020; Gonzalez-Rios *et al.*, 2024).

Finalmente, o potencial dos biofilmes de SPI deve ser mais explorado em aplicações de alto valor agregado, como no setor biomédico (curativos, liberação de fármacos) e na agricultura de precisão, onde suas propriedades de biocompatibilidade e funcionalidade justificam custos de produção mais elevados (Hadidi *et al.*, 2022; Purewal *et al.*, 2024; Mohamed *et al.*, 2020).

Em suma, os biofilmes de proteína de soja isolada representam uma plataforma tecnológica versátil com potencial para gerar uma nova geração de materiais sustentáveis e funcionais. A superação dos desafios remanescentes exigirá uma colaboração contínua entre a academia e a indústria, com um foco integrado na excelência científica, na viabilidade econômica e na conformidade regulatória, pavimentando o caminho para que esses materiais desempenhem um papel cada vez mais importante na construção de um futuro mais sustentável.

## REFERÊNCIAS

- ADERIBIGBE, B. A.; NAKI, T. Soy protein in combination with natural and synthetic polymers for wound healing and drug delivery. **Polymers**, v. 14, n. 15, p. 3065, 2022.
- AHMADZADEH, S. *et al.* Effects of polyphenol-rich grape seed and green tea extracts on the physicochemical properties of 3D-printed edible soy protein films. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 40, p. 101184, 2023.
- AKRAMI, S.; HOSSAEINII, S. M. M. Application of soy protein-based films and coatings on the shelf life of food products: a mini-review of recent publications with emphasis on nanotechnology. **Journal of Food Measurement and Characterization**, [S. l.], 2022. DOI: 10.1007/s11694-022-01707-x.
- ALIZADEH SANI, M. *et al.* Bionanocomposite active packaging material based on soy protein isolate/Persian gum/silver nanoparticles: fabrication and characteristics. **Colloids and Interfaces**, v. 6, n. 4, p. 57, 2022.
- ANVISA. **Agenda Regulatória 2024-2025**. Brasília, DF, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anvisa/pt-br/assuntos/regulamentacao/agenda-regulatoria/2024-2025>. Acesso em: 03 set. 2025.
- BAGNANI, M. *et al.* From soy waste to bioplastics: industrial proof of concept. **ACS Publications**, 2024.
- BRENTIN, R. P. Soy-based chemicals and materials: growing the value chain. *In*: ACS SYMPOSIUM SERIES. Washington, DC: American Chemical Society, v. 1178, cap. 1, p. 1-23, 2014.
- CALDEIRA, L. A. *et al.* Enhancing protein extraction from soybean expeller: exploring the impact of precipitating agents and flour-to-water ratios on functional properties. **Acta Alimentaria**, v. 53, n. 1, p. 79–92, 2024.
- CHEN, H. *et al.* Application of protein-based films and coatings for food packaging: a review. **Polymers**, v. 11, n. 12, p. 2039, 2019.
- CHEN, H. *et al.* Effects of two fatty acids on soy protein isolate/sodium alginate edible films: structures and properties. **LWT - Food Science and Technology**, v. 159, p. 113221, 2022.
- CHEN, F. *et al.* Soy protein-based materials: a review of synthesis, properties, and applications. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 20, n. 3, p. 2883-2915, 2021.
- CHOO, K. W.; MAO, L.; MUSTAPHA, A. Novel soy protein isolate films incorporated with phage CAM-21 show strong antimicrobial effects against *E. coli* O157:H7. **Food Control**, v. 164, p. 110588, 2024.

DAS, S. *et al.* A systematic study of the impact of the isoelectric precipitation process on the physical properties and protein composition of soy protein isolates. **Food Research International**, v. 163, p. 112177, 2023.

DIRPAN, A.; AINANI, A. F.; DJALAL, M. A review on biopolymer-based biodegradable film for food packaging: trends over the last decade and future research. **Polymers**, v. 15, n. 13, p. 2781, 2023.

EUROPEAN FOOD SAFETY AUTHORITY (EFSA). **Food contact materials: regulations and guidance**. Parma, 2024. Disponível em: <https://www.efsa.europa.eu/en/topics/topic/food-contact-materials>. Acesso em: 05 set. 2025.

FDA (Food and Drug Administration). **FDA Circular No. 2022-011**: Guidelines on the Application and Issuance of Voluntary Certification of Food Contact Articles (FCA) Used for Prepackaged Processed Food Products. [S. I.], 2022. Disponível em: <https://www.fda.gov/ph/wp-content/uploads/2022/05/FDA-Circular-No.-2022-011.pdf>. Acesso em: 03 set. 2025.

FLÓREZ, M.; CAZÓN, P.; VÁZQUEZ, M. Selected biopolymers' processing and their applications: a review. **Polymers**, v. 15, n. 3, p. 641, 2023.

GLOBAL GROWTH INSIGHTS. **Soy protein ingredients market size, share, trends, 2032**. Fortune Business Insights. [S. I.], 2025.

GLOBE NEWSWIRE. **Bioplastics market report 2025 - 2034**: growth. The Business Research Company. [S. I.], 2025.

GONZÁLEZ-LÓPEZ, M. E. *et al.* Current trends in biopolymers for food packaging: a review. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 7, 2023.

GONZALEZ-RIOS, H. *et al.* Edible films based on soy protein: a review. **Journal of Food Science and Technology**, v. 61, n. 3, p. 1025-1037, 2024.

GRANADOS-CARRERA, C. M. *et al.* Reinforcement of soy protein-based bioplastics as potential substitutes for conventional petroleum-based packaging: a comprehensive review. **ScienceDirect**, 2025.

GUERRERO, P. *et al.* Characterization of bio-inspired electro-conductive soy protein films. **Polymers**, v. 13, n. 3, p. 416, 2021.

HADIDI, M. *et al.* Plant protein-based food packaging films: recent advances in fabrication, characterization, and applications. **Trends in Food Science & Technology**, v. 120, p. 154-173, 2022.

HU, J. *et al.* Development and characterization of soy protein isolate-based emulsion films with green sichuan pepper essential oil: functional and structural insights. **Food Research International**, v. 171, p. 116365, 2025.

HU, J. *et al.* Development and evaluation of soybean protein isolate-based antibacterial nanocomposite films containing nano-TiO<sub>2</sub>. **Carbohydrate Polymers**, v. 310, p. 121023, 2023.

HUANG, X. *et al.* Antibacterial, antioxidation, UV-blocking, and biodegradable soy protein isolate food packaging film with mangosteen peel extract and ZnO nanoparticles. **Nanomaterials**, v. 11, n. 12, p. 3337, 2021.

INFOALIMENTARIO. **Brazil - ANVISA publishes modification to the regulation of plastic packaging and equipment in contact with food**. InfoAlimentario, [S. l.], 5 mar. 2025. Disponível em: <https://infoalimentario.com/en/brazil-anvisa-publishes-modification-to-the-regulation-of-plastic-packaging-and-equipment-in-contact-with-food/>. Acesso em: 03 set. 2025.

JIANG, S. *et al.* Differences in the film-forming properties and intermolecular interactions of soy protein isolate 7S and 11S globulins. **Journal of Food Science**, v. 84, n. 6, p. 1415-1422, 2019.

KANG, H. *et al.* High-performance and fully renewable soy protein isolate-based film from microcrystalline cellulose via bio-inspired poly(dopamine) surface modification. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 4, n. 8, p. 4354-4360, 2016.

KHAYRULLIN, M.; NEVEROVA, O.; ZININA, O. Crosslinking methods for improving the properties of soy-protein based films for meat packaging: a review. **Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences**, v. 17, p. 635-648, 2023.

KUMAR, S.; KISHORE, K.; SARKAR, A. Recent advances in the modification of soy protein isolate-based films/coatings. **Food Hydrocolloids**, v. 127, p. 107521, 2022.

LI, F. *et al.* Facile fabrication of self-healable and antibacterial soy protein-based films with high mechanical strength. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 11, n. 17, p. 16107-16116, 2019.

LI, K. *et al.* Preparation and characterization of chitosan/soy protein isolate nanocomposite film reinforced by Cu nanoclusters. **Polymers**, v. 9, n. 7, p. 247, 2017.

LI, L. *et al.* pH triggered on-demand tannic acid release via "open-close" of soybean isolate proteins spatial structure for shrimp preservation. **Food Control**, v. 167, p. 110892, 2025.

LI, Z.; DENG, S.; CHEN, J. Surface modification via dielectric barrier discharge atmospheric cold plasma (DBD-ACP): improved functional properties of soy protein film. **Foods**, v. 11, n. 9, p. 1196, 2022.

LÓPEZ, O. V. *et al.* Development of thermoplastic corn starch/talc nanocomposites via melt mixing. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 25, p. 100523, 2020.

MAŁECKI, J.; MUSZYŃSKI, S.; SOŁOWIEJ, B. G. Proteins in food systems—bionanomaterials, conventional and unconventional sources, functional properties, and development opportunities. **Polymers**, v. 13, n. 15, p. 2506, 2021.

MALEKI, S.; AZARMEHR, N.; GHOLIZADEH, M. Development of a soy protein isolate-based hydrogel loaded with curcumin for wound dressing applications. **Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition**, v. 34, n. 1, p. 1-18, 2023.

MARKET.US. **Soy protein concentrate market to expand at 11.2% CAGR - 2034**. [S. I.], 2024.

MEDIKA. **Bioplastic packaging market size, share & forecast report – 2032**. [S. I.], 2024.

MIHALCA, V. *et al.* Protein-based films and coatings for food industry applications. **Polymers**, v. 13, n. 5, p. 769, 2021.

MILANI, J. M.; TIRGARIAN, B. J. An overview of edible protein-based packaging: main sources, advantages, drawbacks, recent progressions and food applications. **Journal of Packaging Technology and Research**, v. 4, n. 2, p. 103-115, 2020.

MOHAMED, S. A.; EL-SAKHAWY, M.; EL-SAKHAWY, M. A. M. Polysaccharides, protein and lipid-based natural edible films in food packaging: a review. **Carbohydrate Polymers**, v. 238, p. 116178, 2020.

MOOSAVI, M. H. *et al.* Modifications of protein-based films using cold plasma. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 142, p. 769-777, 2020.

OLAWADE, D. B.; WADA, O. Z.; IGE, A. O. Advances and recent trends in plant-based materials and edible films: a mini-review. **Frontiers in Chemistry**, v. 12, 2024.

PIRES, A. F. *et al.* A review of recent developments in edible films and coatings-focus on whey-based materials. **Foods**, v. 13, n. 16, p. 2638, 2024.

PRAJAPATI, R. A.; JADEJA, G. C. Red dragon fruit-soy protein isolate biofilm: UV-blocking, antioxidant & improved mechanical properties for sustainable food packaging. **Journal of Food Science and Technology**, v. 61, n. 9, p. 1686-1700, 2024.

PUREWAL, S. S. *et al.* Protein-based films and coatings: an innovative approach. **Coatings**, v. 14, n. 1, p. 32, 2024.

QI, G.; LI, Y.; HUANG, Q. Soy protein-based nanoparticles and microparticles for the delivery of bioactive compounds: a review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 121, p. 1-14, 2022.

QIN, Z. *et al.* Preparation and characterization of soy protein isolate-based nanocomposite films with cellulose nanofibers and nano-silica via silane grafting. **Polymers**, v. 11, n. 11, p. 1835, 2019.

RAEISI, M. *et al.* Physicochemical and antibacterial effect of soy protein isolate/gelatin electrospun nanofibres incorporated with *Zataria multiflora* and *Cinnamon zeylanicum* essential oils. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 15, n. 2, p. 1116-1126, 2021.

RAJENDRAN, N. *et al.* Economic and environmental analysis of producing soy protein-cellulose-based bionanocomposite fruit coating. **Industrial Crops & Products**, v. 211, p. 118213, 2024.

RAMOS-CRUZ, D. P. *et al.* Soy protein isolate/hydroxyapatite composite scaffolds for bone tissue engineering: synthesis and *in vitro* characterization. **Materials Today Communications**, v. 26, p. 101968, 2021.

RANI, P. *et al.* Biodegradation studies and material properties of quercetin incorporated soy protein isolate films. **Biopolymers**, v. 116, n. 3, p. e70018, 2025.

RANI, S.; KUMAR. A review on material and antimicrobial properties of soy protein isolate film. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 27, n. 8, p. 1613-1628, 2019.

SARANTOPOULOS, C. I. G. L.; REGO, R. A. (Ed.). **Brasil pack trends 2020**. Campinas, SP: ITAL, 2012.

SUN, Y. *et al.* Active packaging film developed by incorporating starch aldehyde-quercetin conjugate into SPI matrix. **Antioxidants**, v. 13, n. 7, p. 810, 2024.

SUN, Z. *et al.* Intelligent pH-sensitive films from whole arrowroot powder and soy protein isolate incorporating red cabbage anthocyanin: monitoring freshness of shrimps and ammonia in fish farming ponds. **New Journal of Chemistry**, v. 46, n. 20, p. 9578-9591, 2022.

TANG, S. *et al.* Ecofriendly and biodegradable soybean protein isolate films incorporated with ZnO nanoparticles for food packaging. **ACS Applied Bio Materials**, v. 2, n. 5, p. 2202-2207, 2019.

TIAN, H. *et al.* Fabrication, properties and applications of soy-protein based materials: a review. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 120, p. 475-490, 2018.

TIAN, R. *et al.* Recent advances in soy protein extraction technology. *In*: AOCS ANNUAL MEETING & EXPO, 2022. [S. I.]. (Resumo de Conferência).

TKACZEWSKA, J. Peptides and protein hydrolysates as food preservatives and bioactive components of edible films and coatings-a review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 106, p. 298-311, 2020.

UNIÃO EUROPEIA. **Regulamento (UE) N.º 10/2011 da Comissão de 14 de Janeiro de 2011** relativo aos materiais e objectos de matéria plástica destinados a entrar em contacto com os alimentos. [S. I.], 2011.

VERSINO, F. *et al.* Sustainable and bio-based food packaging: a review on past and current design innovations. **Foods**, v. 12, n. 5, p. 1057, 2023.

WALKER, S.; ROTHMAN, R. Life cycle assessment of bio-based and fossil-based plastic: a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 261, p. 121158, 2020.

WANG, R. *et al.* Fabrication and characterization of soy protein isolate scaffolds for bone tissue engineering. **Materials Science and Engineering: C**, v. 99, p. 1-9, 2019.

WU, J. *et al.* Enhanced physico-mechanical, barrier and antifungal properties of soy protein isolate film by incorporating both plant-sourced cinnamaldehyde and facile synthesized zinc oxide nanosheets. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 180, p. 31-38, 2019.

XIAO, Y. *et al.* Development and evaluation of soy protein isolate-based antibacterial nanocomposite films containing cellulose nanocrystals and zinc oxide nanoparticles. **Food Hydrocolloids**, v. 106, p. 105898, 2020.

XU, Y. *et al.* A soy protein-based film by mixed covalent cross-linking and flexibilizing networks. **Industrial Crops and Products**, v. 183, p. 114952, 2022.

XUE, F. *et al.* Encapsulation of essential oil in emulsion based edible films prepared by soy protein isolate-gum acacia conjugates. **Food Hydrocolloids**, v. 96, p. 178-189, 2019.

YAN, Q-J. *et al.* Coating of fruit with an edible soybean protein isolate film doped with hydroxypropyl methyl cellulose for improved preservation. **BioResources**, v. 17, n. 2, p. 2388-2403, 2022.

ZAREIE, Z.; YAZDI, F. T.; MORTAZAVI, S. A. Development and characterization of antioxidant and antimicrobial edible films based on chitosan and gamma-aminobutyric acid-rich fermented soy protein. **Carbohydrate Polymers**, v. 244, p. 116491, 2020.

ZENG, Z. *et al.* Preparation and characterization of soy protein isolate films with improved mechanical properties by crosslinking with citric acid. **Journal of Food Engineering**, v. 341, p. 111290, 2023.

ZHANG, B. *et al.* A soy protein-based film based on chemical treatment and microcrystalline cellulose reinforcement obtained from corn husk byproducts. **ACS Omega**, v. 9, n. 14, p. 15845-15853, 2024.

ZHANG, Z.; ZHOU, X.; FANG, C.; WANG, D. Characterization of the antimicrobial edible film based on grasshopper protein/soy protein isolate/cinnamaldehyde blend crosslinked with xylose. **Frontiers in Nutrition**, v. 9, p. 796356, 2022.

ZHAO, G.; ZHOU, C.; FAN, F. Preparation and properties of soy protein isolate/cotton nanocrystalline cellulose films. **International Journal of Polymer Science**, v. 2021, p. 5518136, 2021.

ZHAO, Y. *et al.* Enhancing the properties of soy protein isolate and dialdehyde starch films for food packaging applications through tannic acid crosslinking. **Carbohydrate Polymers**, v. 332, p. 121903, 2024.

ZION MARKET RESEARCH. **Global soy protein concentrate market size, share, and trends analysis report** – industry overview and forecast to 2032. [S. l.], 2025.

ZUBAIR, M.; ULLAH, A. Recent advances in protein derived bionanocomposites for food packaging applications. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 60, n. 3, p. 406-434, 2020.