



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE REVESTIMENTO
ALIMENTÍCIO FORMULADO A PARTIR DO COLÁGENO EXTRAÍDO
DO RESÍDUO PESQUEIRO (BEXIGA NATATÓRIA) DE TAMBAQUI
(*Colossoma macropomum*)

THALISSA BIANCA ROSÁRIO SOARES
MESTRADO

Manaus/AM
Julho/2026

THALISSA BIANCA ROSÁRIO SOARES

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE REVESTIMENTO
ALIMENTÍCIO FORMULADO A PARTIR DO COLÁGENO EXTRAÍDO
DO RESÍDUO PESQUEIRO (BEXIGA NATATÓRIA) DE TAMBACUI
(*Colossoma macropomum*)

Dissertação de Mestrado ao Programa de
Pós-Graduação em Química da
Universidade Federal do Amazonas
exigida para o título de Mestre em
Química, com ênfase na Linha de
Pesquisa de Química de Materiais e
Interfaces.

DR. RAIMUNDO RIBEIRO PASSOS

Orientador

DR. LIZANDRO MANZATO

Coorientador

Manaus/AM

Julho/2026

Ficha Catalográfica

Elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

-
- S676d Soares, Thalissa Bianca Rosário
Desenvolvimento e caracterização de revestimento alimentício
formulado a partir do colágeno extraído do resíduo pesqueiro (bexiga
natatória) de tambaqui (*Colossoma macropomum*) / Thalissa Bianca
Rosário Soares. - 2026.
116 f. : il., color. ; 31 cm.
- Orientador(a): Raimundo Ribeiro Passos.
Coorientador(a): Lizandro Manzato.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Amazonas, Programa
de Pós-Graduação em Química, Manaus-AM, 2026.
1. Colágeno. 2. Bexiga natatória. 3. Tambaqui. 4. Filmes . 5.
Revestimentos alimentícios. I. Passos, Raimundo Ribeiro. II. Manzato,
Lizandro. III. Universidade Federal do Amazonas. Programa de Pós-
Graduação em Química. IV. Título
-

THALISSA BIANCA ROSÁRIO SOARES

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE REVESTIMENTO ALIMENTÍCIO
FORMULADO A PARTIR DO COLÁGENO EXTRAÍDO DO RESÍDUO PESQUEIRO
(BEXIGA NATATÓRIA) DE TAMBAQUI (*Colossoma macropomum*)

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Química da
Universidade Federal do Amazonas, como
requisito parcial para obtenção do título de
Mestre em Química.

Aprovada em: 29/07/2026

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Lizandro Manzato

Presidente

Universidade Federal do Amazonas

Prof. Dr. Paulo Rogério da Costa Couceiro

Membro Interno

Universidade Federal do Amazonas

Prof. Dr. Sajjad Hussain

Membro Externo

Ghulam Ishaq Khan Institute of Engineering Sciences and Technology

À minha avó e mãe, Raimunda de Oliveira
Miranda, que partiu ao longo desta
caminhada, mas se mantém presente no
coração e no pensamento.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Marcela Miranda, e à minha irmã gêmea Thalia Beatriz, por todo apoio nos últimos meses, pelo zelo e olhar atento que me foram oferecidos nos momentos de recuperação.

Às minhas irmãs Yasmim e Marcelle, pelo cuidado quando precisei, e também à Thaíssa.

Ao José Neto, pelo incentivo e pelo apoio, em todas as suas formas, que foi fundamental para que eu chegasse até aqui.

À Vittoria Guedes, por todo o suporte oferecido em momentos extremamente desafiadores, e pela convivência com o Joaquim.

Aos meus amigos mais do que queridos Semíra e Erison, pela parceria, incentivo, apoio e torcida.

Ao meu orientador, Dr Raimundo Passos, por auxiliar na resolução de muitos imbróglios, sendo essencial para que eu permanecesse nesta caminhada, e pela compreensão.

Ao meu coorientador, Dr Lizandro Manzato, pela oportunidade de trabalhar com uma matéria-prima tão importante, por viabilizar a execução deste trabalho quase que inteiramente, pelas oportunidades e incentivo ao longo desses anos.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM), pela concessão de bolsa de mestrado.

À rede SisNANO pela viabilização das análises que constam neste trabalho, no Laboratório de Síntese e Caracterização de Nanomaterias, enquanto sob coordenação do Dr Lizandro Manzato.

Ao Laboratório de Eletroquímica e Energia, e à Brenda, pela realização dos ensaios termogravimétricos de parte do meu material.

Aos meus colegas de laboratório pela companhia e pelo incentivo no dia-a-dia de pesquisa.

Aos Drs. Paulo Couceiro e Sajjad Hussain pelo tempo e disponibilidade ao aceitarem contribuir com este trabalho.

Parecendo uma verdadeira sobrevivente
[...]
Depois de todo esse tempo, eu ainda estou
de pé.

Bernie Taupin, *I'm Still Standing*

RESUMO

O aproveitamento de resíduos da indústria pesqueira representa uma alternativa para a obtenção de materiais de maior valor agregado e para a redução dos impactos associados ao seu descarte. Neste trabalho, a bexiga natatória de tambaqui (*Colossoma macropomum*) foi utilizada como matéria-prima para a extração de colágeno e o desenvolvimento de filmes e revestimentos alimentícios. O colágeno foi obtido por método ácido-enzimático, seguido de precipitação salina, diálise, liofilização e moagem. O material apresentou rendimento de 47%, solubilidade em ácido acético de $93,0 \pm 0,8\%$ e pH de 2,83. A análise por FTIR-ATR evidenciou as bandas características das amidas A, I, II e III, indicando a preservação da estrutura do colágeno, enquanto a análise termogravimétrica apresentou comportamento compatível com materiais colagênicos. Foram desenvolvidas seis formulações filmogênicas contendo 1,5%, 2,0% e 2,5% de colágeno, sendo três sem plastificante e três com adição de glicerol a 30% em relação à massa de colágeno. Os filmes foram avaliados quanto à formação, espessura, opacidade, estrutura e estabilidade térmica. A presença do glicerol influenciou principalmente a espessura e o comportamento térmico, sem comprometer a integridade estrutural do colágeno nas formulações. As soluções correspondentes aos filmes A2 e B1 foram aplicadas como revestimentos em bananas e morangos. Nas bananas, os tratamentos contribuíram para a manutenção da forma e da firmeza aparente por maior período, embora não tenham impedido o escurecimento da casca. Nos morangos, os revestimentos reduziram numericamente a perda de massa e retardaram o aparecimento de crescimento fúngico visível em comparação ao controle. De modo geral, os resultados demonstraram o potencial da bexiga natatória de tambaqui como fonte de colágeno para o desenvolvimento de materiais biodegradáveis com possibilidade de aplicação na conservação pós-colheita de alimentos.

Palavras-chave: colágeno; bexiga natatória; tambaqui; filmes; revestimentos alimentícios; conservação pós-colheita.

ABSTRACT

The utilization of waste from the fishing industry offers an alternative for obtaining materials with higher added value and for reducing the impacts associated with their disposal. In this study, the swim bladder of the tambaqui (*Colossoma macropomum*) was used as a raw material for collagen extraction and the development of food films and coatings. Collagen was obtained using an acid-enzymatic method, followed by salt precipitation, dialysis, freeze-drying, and grinding. The material exhibited a yield of 47%, a solubility in acetic acid of $93.0 \pm 0.8\%$, and a pH of 2.83. FTIR-ATR analysis revealed the characteristic bands of amides A, I, II, and III, indicating the preservation of the collagen structure, while thermogravimetric analysis showed behavior consistent with collagen-based materials. Six film-forming formulations were developed containing 1.5%, 2.0%, and 2.5% collagen, with three formulations without a plasticizer and three with the addition of glycerol at 30% relative to the collagen mass. The films were evaluated for film formation, thickness, opacity, structure, and thermal stability. The presence of glycerol mainly influenced the thickness and thermal behavior, without compromising the structural integrity of the collagen in the formulations. The solutions corresponding to films A2 and B1 were applied as coatings to bananas and strawberries. In bananas, the treatments helped maintain shape and apparent firmness for a longer period, although they did not prevent the skin from browning. In strawberries, the coatings numerically reduced mass loss and delayed the onset of visible fungal growth compared to the control. Overall, the results demonstrated the potential of the tambaqui swim bladder as a source of collagen for the development of biodegradable materials that could be applied in post-harvest food preservation.

Keywords: collagen; swim bladder; tambaqui; films; food coatings; postharvest preservation.

LISTA DE ABREVIATURAS

A1 – Formulação contendo 1,5% (m/V) de colágeno, sem glicerol
A2 – Formulação contendo 2,0% (m/V) de colágeno, sem glicerol
A3 – Formulação contendo 2,5% (m/V) de colágeno, sem glicerol
ATR – Reflectância Total Atenuada
B1 – Formulação contendo 1,5% (m/V) de colágeno e 30% (m/m) de glicerol em relação à massa de colágeno
B2 – Formulação contendo 2,0% (m/V) de colágeno e 30% (m/m) de glicerol em relação à massa de colágeno
B3 – Formulação contendo 2,5% (m/V) de colágeno e 30% (m/m) de glicerol em relação à massa de colágeno
CSA – Colágeno Solúvel em Ácido
DP – Desvio-padrão
DTG – Derivada da curva termogravimétrica
FAO – Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura
FAPEAM – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas
FTIR – Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier
FTIR-ATR – Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier por Reflectância Total Atenuada
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFAM – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas
IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
LSCN – Laboratório de Síntese e Caracterização de Nanomateriais
MWCO – Limite de corte de massa molecular, do inglês *Molecular Weight Cut-Off*
ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU – Organização das Nações Unidas
pH – Potencial hidrogeniônico
PPM – Pesquisa da Pecuária Municipal
PS – Poliestireno
rpm – Rotações por minuto
SisNANO – Sistema Nacional de Laboratórios em Nanotecnologias
T1 – Tratamento 1, correspondente à aplicação da solução filmogênica A2
T2 – Tratamento 2, correspondente à aplicação da solução filmogênica B1
TG – Termogravimetria ou curva termogravimétrica
UV-Vis – Ultravioleta-visível

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tambaqui (<i>Colossoma macropomum</i>)	22
Figura 2 - Localização da bexiga natatória do tambaqui, identificada pela letra “B”	22
Figura 3 – Representação esquemática da estrutura molecular do colágeno tipo I	23
Figura 4 – Processo de obtenção de filmes de colágeno por <i>casting</i>	28
Figura 5 (a e b) – Bexigas natatórias de tambaqui para extração de colágeno	32
Figura 6 – (a) Membranas interna e externa das bexigas natatórias sendo separadas e (b) filetadas para extração	32
Figura 7 – (a) Material em solução extratora e (b) sob agitação	33
Figura 8 – (a) Filtração de extrato e (b) floculação de colágeno após adição de sal	34
Figura 9 – (a) Material em frasco para centrifugação e (b) sedimentado obtido	34
Figura 10 – (a) Pellets redissolvidos e (b) sob agitação mecânica	35
Figura 11 - Sistema de diálise: Tubo contendo extrato, imerso em solução de AcOH 0,1 mol.L ⁻¹	36
Figura 12 – Aspecto macroscópico do colágeno após purificação por diálise	36
Figura 13 – Colágeno liofilizado e moído após extração e purificação	37
Figura 14 - Soluções filmogênicas vertidas, sob secagem em estufa com circulação de ar	38
Figura 15 - Medição da espessura dos filmes com especímetro digital	41
Figura 16 – Aplicação (a) e secagem (b) de revestimento em bananas	45
Figura 17 - Aplicação e secagem de revestimento em morangos	45
Figura 18 - Espectro de FTIR-ATR do colágeno obtido por extração ácido-enzimática	53
Figura 19 - Curvas TG e DTG do colágeno purificado e seco	55
Figura 20 - (a) destacamento do filme da superfície da placa e (b) filme íntegro após remoção	56
Figura 21 – Fragmentação do filme de colágeno durante a remoção da placa de vidro (a e b)	57
Figura 22 – (a) Soluções B1 e (b) B3 vertidas, respectivamente	60
Figura 23 - Espectro FTIR-ATR filmes de colágeno A1, A2 e A3	65
Figura 24 – Espectro FTIR-ATR filmes de colágeno B1, B2 e B3	67
Figura 25 - Curvas de TG e DTG do filme A1 contendo 1,5% (m/V) de colágeno puro seco	70
Figura 26 - Curvas de TG e DTG do filme A2 contendo 2,0% (m/V) de colágeno puro seco	70
Figura 27 - Curvas de TG e DTG do filme A3 contendo 2,5% (m/V) de colágeno puro seco	71
Figura 28 – Curvas TG e DTG do filme B1 contendo 1,5% (m/V) de colágeno puro seco e 30% (m/m) de glicerol	74
Figura 29 - Curvas TG e DTG do filme B2 contendo 2,0% (m/V) de colágeno puro seco e 30% (m/m) de glicerol	74
Figura 30 - Curvas TG e DTG do filme B3 contendo 2,5% (m/V) de colágeno puro seco e 30% (m/m) de glicerol	75
Figura 31 – Aspecto das bananas dos grupos controle, T1 e T2 no início do armazenamento	81
Figura 32 - Aspecto das bananas dos grupos controle, T1 e T2 no 2º dia de armazenamento	82
Figura 33 – Aspecto das bananas dos grupos controle, T1 e T2 no 4º dia de armazenamento	83
Figura 34 - Aspecto das bananas dos grupos de controle, T1 e T2 no 6º dia de armazenamento	84
Figura 35 - Detalhes do aspecto das bananas do grupo controle no 6º dia de armazenamento	84

Figura 36 – Aspecto das bananas dos grupos controle, T1 e T2 no 8º dia de armazenamento	85
Figura 37 - Aspecto das bananas dos grupos de controle, T1 e T2 no 10º dia de armazenamento	86
Figura 38 – Aspecto das bananas dos grupos de controle, T1 e T2 no 12º dia de armazenamento	87
Figura 39 – Aspecto dos morangos dos grupos controle, T1 e T2 no início do armazenamento	93
Figura 40 – Aspecto dos morangos dos grupos controle, T1 e T2 no 1º dia de armazenamento	94
Figura 41 – Aspecto dos morangos dos grupos controle, T1 e T2 no 2º dia de armazenamento	95
Figura 42 - Detalhes do aspecto dos morangos do grupo controle no 3º dia de armazenamento	96
Figura 43 - Aspecto dos morangos dos grupos controle, T1 e T2 no 3º dia de armazenamento	96
Figura 44- Detalhes do aspecto dos morangos do grupo controle no 4º dia de armazenamento	97
Figura 45 - Aspecto dos morangos dos grupos controle, T1 e T2 no 4º dia de armazenamento	97
Figura 46 - Crescimento fúngico visível nos morangos do grupo controle no 5º dia de armazenamento	98
Figura 47 – Aspecto dos morangos dos grupos controle, T1 e T2 no 5º dia de armazenamento	99
Figura 48 – Aspecto dos morangos dos grupos T1 e T2 no 6º dia de armazenamento.....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Formulação das soluções filmogênicas, considerando-se um volume final de 50 mL.....	38
Tabela 2 - Solubilidade do colágeno em ácido 0,5 mol.L ⁻¹ (n = 3).....	52
Tabela 3 - Espessura dos filmes do tipo A (n = 3).....	58
Tabela 4 - Espessura dos filmes do tipo B (n=3).....	59
Tabela 5 - Opacidade dos filmes A.....	61
Tabela 6 – Opacidade dos Filmes B.....	62
Tabela 7 - Parâmetros térmicos dos filmes A.....	71
Tabela 8 – Parâmetros térmicos dos filmes B.....	75
Tabela 9 – Perda de massa em bananas in natura do grupo controle durante armazenamento.....	78
Tabela 10 – Perda de massa em bananas com aplicação de Tratamento 1 durante armazenamento.....	78
Tabela 11 - Perda de massa em bananas com aplicação de Tratamento 2.....	79
Tabela 12 - Comparação da perda de massa das bananas controle e submetidas aos tratamentos T1 e T2 até o 8º dia de armazenamento.....	79
Tabela 13- Perda de massa em morangos in natura sem aplicação de nenhum revestimento.....	89
Tabela 14 – Perda de massa em morangos com aplicação de Tratamento 1.....	90
Tabela 15 - Perda de massa em morangos com aplicação de Tratamento 2.....	90
Tabela 16 - Comparação da perda de massa dos morangos controle e submetidos aos tratamentos T1 e T2 até o 4º dia de armazenamento.....	91

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS.....	19
2.1	Objetivo Geral	19
2.2	Objetivos Específicos.....	19
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	19
3.1	Resíduos da Indústria Pesqueira: Dimensão Ambiental e Desafios Sustentáveis.....	19
3.2	Valorização de Subprodutos e Economia Circular na Cadeia do Pescado	20
3.3	Tambaqui (<i>Colossoma macropomum</i>) e Potencial de Aproveitamento da Bexiga Natatória	21
3.4	Colágeno de Origem Pesqueira: Estrutura, Propriedades e Aplicações.....	23
3.5	Métodos de Extração de Colágeno de Matrizes Pesqueiras.....	24
3.6	Revestimentos Alimentícios à Base de Biopolímeros	25
3.7	Formulação de Soluções Filmogênicas e Desenvolvimento de Filmes de Colágeno.....	27
3.8	Técnicas de Caracterização Físico-Química e Térmica de Filmes Biopoliméricos.....	28
3.9	Estado da Arte, Desafios e Lacuna Científica.....	29
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
4.1	Matéria-prima	31
4.2	Preparo das Soluções	31
4.3	Pré-tratamento da Matéria-prima.....	31
4.4	Obtenção do Colágeno a partir de Bexiga Natatória	33
4.4.1	Extração Ácido-enzimática.....	33
4.4.2	Purificação do Colágeno por Diálise	35
4.5	Formulações das Soluções Filmogênicas	37
4.6	Obtenção dos filmes.....	38
4.7	Análises das Características do Colágeno	39
4.7.1	Potencial Hidrogeniônico	39
4.7.2	Rendimento	39
4.7.3	Solubilidade em ácido.....	39
4.7.4	Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier por Reflectância Total Atenuada.....	39
4.7.5	Análise Termogravimétrica	40
4.8	Análises das Características Físicas dos Filmes.....	40
4.8.1	Formulação, Secagem e Remoção dos Filmes	40
4.8.2	Espessura dos Filmes.....	41

4.8.3	Opacidade dos Filmes.....	41
4.8.4	Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier por Reflectância Total Atenuada dos Filmes.....	42
4.8.5	Análise Termogravimétrica	42
5	Definição de frutos, aplicação de filmes e avaliação da vida útil	42
5.1	Seleção dos frutos	42
5.2	Seleção de filmes para uso	43
5.3	Aplicação do revestimento.....	44
5.4	Avaliação da vida útil.....	45
5.4.1	Perda de massa	46
5.4.2	Avaliação visual.....	47
5.4.3	Deterioração microbiológica visível.....	47
5.5	Delineamento experimental e tratamento dos dados.....	48
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
6.1	Das Características do Colágeno.....	49
6.1.1	Potencial Hidrogeniônico	49
6.1.2	Rendimento	50
6.1.3	Solubilidade em ácido.....	51
6.1.4	Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier por Reflectância Total Atenuada.....	53
6.1.5	Análise Termogravimétrica	55
6.2	Das Características do Filme	56
6.2.1	Formação, Secagem e Remoção dos Filmes.....	56
6.2.2	Espessura dos Filmes	58
6.2.3	Opacidade dos Filmes.....	61
6.2.4	Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier por Reflectância Total Atenuada.....	64
6.2.5	Análise Termogravimétrica	69
7	RESULTADOS DE APLICAÇÃO.....	78
7.1	Aplicação das coberturas selecionadas em bananas.....	78
7.1.1	Perda de massa	78
7.1.2	Aparência geral.....	80
7.1.3	Deterioração microbiológica visível.....	89
7.2	Aplicação das coberturas selecionadas em morangos.....	89
7.2.1	Perda de massa	89
7.2.2	Aparência geral.....	92
7.2.3	Deterioração microbiológica visível.....	101

8	Síntese de resultados	102
9	CONCLUSÃO	103
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO, 2024), a produção global de aquicultura e pesca comercializou cerca de 185,4 milhões de toneladas de animais aquáticos em 2022, arrecadando um recorde de 195 bilhões de dólares.

Segundo o Anuário da Piscicultura (PeixeBR, 2025), no ano de 2024, foram produzidas 968.745 toneladas de peixes, número que representa um aumento de 9,2% em relação ao ano anterior, que registrou 887.029 toneladas.

A Pesquisa Pecuária Municipal – PPM (2024) relatou que, no Brasil, a produção da espécie tambaqui (*Colossoma macropomum*) saltou de 112.853.025 para 120.849.541 kg/ano entre os anos de 2021 e 2024. No ano de 2023, foram produzidas 6.475 toneladas em cativeiro na região metropolitana de Manaus, Amazonas (Silva e colaboradores, 2024).

À medida que a produção e o consumo de pescado aumentam, estima-se que, no Brasil, até 60% da massa de peixes beneficiados em plantas de processamento se tornam resíduos sólidos ou líquidos, comumente descartados de maneira inadequada (Costa e colaboradores, 2019; Bezerra e colaboradores, 2023).

O descarte desses resíduos em corpos d'água contribui para processos de eutrofização, proliferação de algas, redução do oxigênio dissolvido e consequente mortandade de organismos aquáticos (Boyd e colaboradores, 2020; Costa e colaboradores, 2019). Além disso, sua decomposição anaeróbica em aterros libera gases como sulfeto de hidrogênio (H_2S), metano (CH_4) e amônia (NH_3), intensificando impactos atmosféricos e riscos à saúde pública (Bezerra e colaboradores, 2023).

Assim, os resíduos da indústria pesqueira configuram não apenas um risco ecológico, mas também um desafio estrutural à sustentabilidade, exigindo o desenvolvimento de alternativas tecnológicas capazes de mitigar impactos ambientais por meio de estratégias de reaproveitamento e valorização de subprodutos (Oliveira e colaboradores, 2022).

Nesse contexto, a conversão de resíduos do processamento pesqueiro — como vísceras, peles, cabeças, escamas e órgãos internos — em materiais de maior valor agregado configura estratégia viável de mitigação de impactos ambientais, abrangendo a obtenção de colágeno, gelatina, óleos, farinha de peixe, biodiesel e biofertilizantes (Coppola e colaboradores, 2021; Oliveira e colaboradores, 2022).

Dentre os resíduos descartados, destaca-se a bexiga natatória, reconhecida como fonte promissora de colágeno tipo I, proteína estrutural cuja organização em tripla hélice confere propriedades funcionais adequadas à formação de géis e filmes. Estudos recentes indicam que o colágeno extraído dessa matriz apresenta elevada pureza, boa solubilidade e capacidade de formar redes tridimensionais estáveis, ampliando seu potencial de aplicação em biomateriais e revestimentos alimentícios (Coppola e colaboradores, 2021; Silva e colaboradores, 2022).

Embora estudos anteriores demonstrem o potencial das bexigas natatórias de peixes como fontes de colágeno e relatem sua utilização na obtenção de biomateriais, ainda permanecem pouco esclarecidas algumas questões relacionadas ao aproveitamento da bexiga natatória de tambaqui. Entre elas, destacam-se: se o processo de extração ácido-enzimática permite obter colágeno com estrutura helicoidal preservada e características adequadas à formação de filmes; de que maneira a concentração de colágeno e a incorporação de glicerol influenciam as propriedades físicas, ópticas, estruturais e térmicas das películas produzidas; e se essas formulações apresentam potencial para retardar alterações pós-colheita quando aplicadas a frutos com diferentes padrões fisiológicos de amadurecimento.

Dessa forma, a lacuna científica identificada não se limita à escassez de estudos sobre a obtenção de colágeno da bexiga natatória de tambaqui, mas envolve principalmente a ausência de uma abordagem integrada que conecte a extração e a purificação do biopolímero, sua caracterização estrutural e térmica, o desenvolvimento de diferentes formulações filmogênicas e sua aplicação em sistemas alimentares reais. A originalidade deste trabalho reside, portanto, na integração dessas etapas e na avaliação dos revestimentos em banana e morango, utilizados como modelos de fruto climatérico e não climatérico, respectivamente.

Diante desse cenário, marcado pelo aumento da produção e do consumo de pescado e, consequentemente, pela intensificação da geração de resíduos, o presente trabalho propõe avaliar a viabilidade do aproveitamento das bexigas natatórias de tambaqui para o desenvolvimento de revestimentos alimentícios do tipo filme, por meio da extração do colágeno e sua aplicação em soluções filmogênicas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver revestimentos alimentícios a partir do aproveitamento do colágeno extraído da bexiga natatória de tambaqui (*Colossoma macropomum*).

2.2 Objetivos Específicos

- I. Extrair colágeno da bexiga natatória de tambaqui por método ácido-enzimático;
- II. Caracterizar físico-quimicamente o colágeno obtido quanto a rendimento, solubilidade, estrutura química e estabilidade térmica;
- III. Desenvolver formulações filmogênicas contendo o colágeno extraído;
- IV. Avaliar as propriedades físicas e térmicas dos filmes produzidos;
- V. Investigar o desempenho dos revestimentos na conservação pós-colheita de um fruto climatérico e um não climatérico.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Resíduos da Indústria Pesqueira: Dimensão Ambiental e Desafios Sustentáveis

Nas últimas décadas, a produção pesqueira e aquícola tem apresentado crescimento expressivo, impulsionado pela expansão demográfica, aumento da demanda por proteínas de origem animal e avanço tecnológico no setor (Coppola e colaboradores, 2021). Como consequência direta desse aumento produtivo, observa-se a intensificação da geração de resíduos ao longo da cadeia de processamento do pescado.

Esses resíduos configuram importante passivo ambiental, sobretudo quando descartados de forma inadequada (Ingabire e colaboradores, 2023), tendo como destinos frequentes terrenos abertos e aterros sanitários (Ivanovs e Blumbega, 2018). Esse descarte pode resultar na degradação de habitats, contaminação de corpos hídricos e comprometimento de ecossistemas aquáticos e terrestres (Bezerra e colaboradores, 2023).

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2021), o Brasil produz aproximadamente 1,34 Mt anuais de pescado, considerando a produção aquícola e a pesca extrativista. Estima-se que entre 40% e 50% da massa processada

corresponda a resíduos sólidos orgânicos (Oliveira e colaboradores, 2017), evidenciando a magnitude do desafio ambiental associado ao setor.

No contexto regional, o Estado do Amazonas produziu, em 2021, aproximadamente 128.677 toneladas de pescado provenientes da pesca extrativista (IBGE, 2021). Considerando que a literatura estima que 50% da massa processada corresponde a resíduos sólidos orgânicos (Oliveira e colaboradores, 2017), esse volume produtivo implica geração expressiva de resíduos no setor. Em Manaus, estima-se que cerca de 90% desses resíduos sejam descartados no Rio Negro ou em lixões, prática associada a riscos ambientais e sanitários (Barbosa, 2022; Costa e colaboradores, 2019).

Diante desse cenário, os resíduos da indústria pesqueira representam não apenas um problema ambiental, mas também um desafio estratégico à sustentabilidade da cadeia produtiva. A necessidade de mitigar esses impactos impulsiona a busca por alternativas tecnológicas capazes de transformar tais resíduos em subprodutos de maior valor agregado, promovendo inovação, desenvolvimento regional e alinhamento aos princípios da economia circular.

3.2 Valorização de Subprodutos e Economia Circular na Cadeia do Pescado

A sustentabilidade refere-se à capacidade de integrar as dimensões econômica, social e ambiental, atendendo às necessidades da geração atual sem comprometer a capacidade das futuras gerações, por meio da preservação de processos ecológicos, biodiversidade e produtividade ambiental (Martinell, 2024; Chirch e colaboradores, 2023).

No contexto brasileiro, a Agenda 2030 estabelece metas alinhadas aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU). Dentre eles, o ODS nº 12 — que visa assegurar padrões sustentáveis de produção e consumo — destaca a necessidade de gestão adequada de resíduos industriais oriundos de processos produtivos, incluindo aqueles provenientes da cadeia do pescado (IPEA, 2018).

A literatura descreve a economia circular como modelo estratégico que busca equilibrar sistema econômico, sociedade e meio ambiente, promovendo a reinserção de materiais no ciclo produtivo por meio do reaproveitamento e da agregação de valor (Gonçalves e Barroso, 2019).

A literatura evidencia que resíduos da indústria pesqueira podem ser convertidos em subprodutos com aplicação em diferentes segmentos industriais. Ferreira (2016) destaca o potencial de desenvolvimento de biomateriais aplicáveis à indústria de alimentos, perspectiva corroborada por Silva e colaboradores (2017). De modo semelhante, Jesus e colaboradores (2015) demonstraram a obtenção de proteína hidrolisada a partir desses materiais.

Outros estudos relatam a produção de *fishburgers* (Lima, 2019), farinha para preparo de bolos (Goes e colaboradores, 2016), suplementos para nutrição de suínos (Oribhabor e Ansa, 2006) e farinha para alimentação de alevinos (Boscolo e colaboradores, 2006), entre outras aplicações. Esses trabalhos reforçam a viabilidade técnica do aproveitamento de resíduos pesqueiros na obtenção de subprodutos de valor agregado, contribuindo para redução do desperdício e mitigação de impactos ambientais.

Em conjunto, esses estudos demonstram que os resíduos pesqueiros apresentam ampla versatilidade tecnológica, podendo ser direcionados tanto à alimentação humana e animal quanto à obtenção de biomateriais. Entretanto, a diversidade de matérias-primas, processos e produtos dificulta a comparação direta entre as alternativas propostas. Além da viabilidade técnica, a escolha da rota de aproveitamento deve considerar o valor agregado do produto obtido, a complexidade do processamento e as características específicas do resíduo disponível. Nesse contexto, a extração de colágeno da bexiga natatória representa uma alternativa de valorização direcionada à obtenção de materiais com maior especialização tecnológica.

3.3 Tambaqui (*Colossoma macropomum*) e Potencial de Aproveitamento da Bexiga Natatória

De acordo com Araújo e colaboradores (2024), o tambaqui — Figura 1 — é uma espécie amazônica de grande relevância econômica, amplamente explorada na piscicultura e na pesca extrativista. Trata-se de um peixe teleósteo de água doce, com peso médio aproximado de 5.410 g e comprimento médio de 68 cm. Apresenta dentes robustos, espinhos branquiais longos e finos, além de nadadeira adiposa curta, características que contribuem para sua adaptação ao ambiente amazônico (Vieira e colaboradores, 2010; Araújo e colaboradores, 2024).

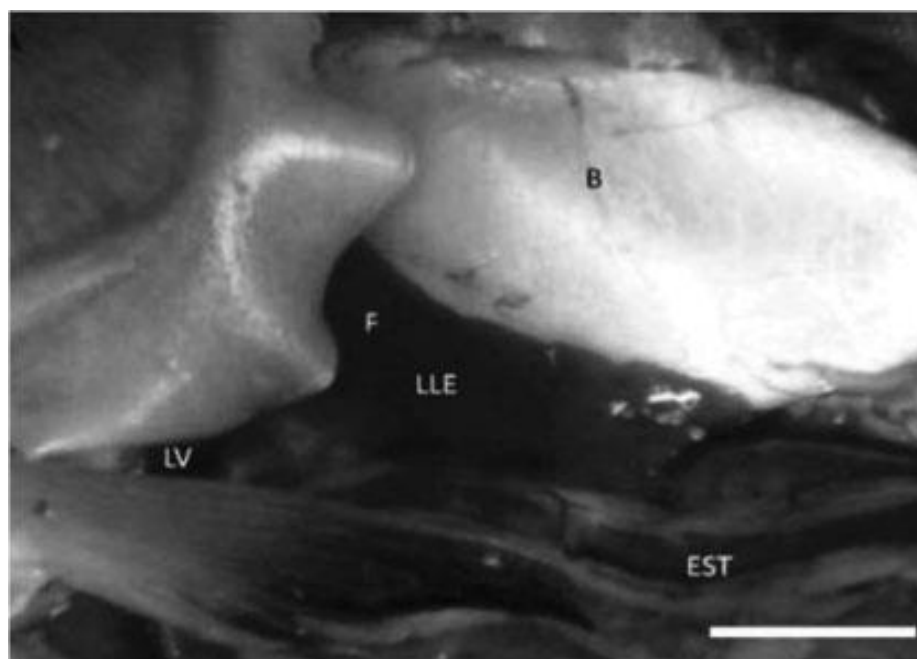
Figura 1 – Tambaqui (*Colossoma macropomum*)



Fonte: Autoria própria (2025)

O tambaqui possui a bexiga natatória, órgão localizado dorsalmente ao estômago e ventralmente ao fígado (Figura 2), cuja principal função está relacionada à regulação da flutuabilidade (Sá e colaboradores, 2012; Silva e Santos, 2022).

Figura 2 - Localização da bexiga natatória do tambaqui, identificada pela letra “B”



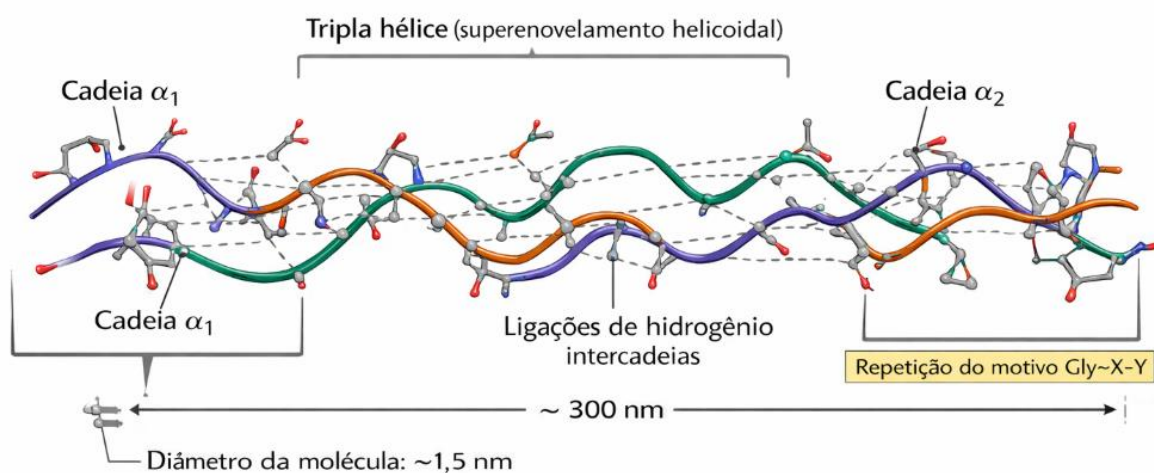
Fonte: Sá e colaboradores (2012)

Segundo Lan e colaboradores (2024), a bexiga natatória apresenta elevado teor de colágeno tipo I, proteína estrutural cuja organização molecular favorece propriedades mecânicas e capacidade de formação de redes tridimensionais. Essas características indicam potencial de aplicação na produção de biomateriais, incluindo filmes e revestimentos alimentícios (Le e colaboradores, 2024).

3.4 Colágeno de Origem Pesqueira: Estrutura, Propriedades e Aplicações

O colágeno é uma proteína estrutural caracterizada por três cadeias polipeptídicas organizadas em uma conformação de tripla hélice estável, que se associa formando fibrilas com diâmetro entre 10 e 300 nanômetros (nm), posteriormente organizadas em feixes fibrilares. Essa arquitetura molecular constitui a base estrutural de tecidos como pele, tendões e cartilagens em mamíferos (Berisio e colaboradores, 2003; Shoichen e colaboradores, 2019; Ye e colaboradores, 2023). Conforme ilustrado na Figura 3, a estrutura, estabilizadas por ligações de hidrogênio intercadeias. A sequência característica Gly–X–Y contribui para a estabilidade estrutural da molécula.

Figura 3 – Representação esquemática da estrutura molecular do colágeno tipo I



Fonte: Adaptado de Berisio e colaboradores (2003)

Devido às suas propriedades mecânicas, biocompatibilidade e biodegradabilidade, o colágeno é amplamente empregado nas áreas de engenharia de tecidos, indústria alimentícia, desenvolvimento de materiais e embalagens (Ye e colaboradores, 2023). Essas características favorecem sua aplicação como matriz estrutural em sistemas poliméricos naturais.

No contexto alimentar, o colágeno tem sido utilizado como matéria-prima na produção de filmes e revestimentos comestíveis, em razão de sua capacidade de formação de redes tridimensionais e propriedades filmogênicas (Le e colaboradores, 2024). Hashim e colaboradores (2015) destacam que a elasticidade conferida pelo colágeno pode tornar os filmes mais resistentes, contribuindo para a preservação da textura dos alimentos e agregação de valor funcional.

Tradicionalmente, as principais fontes terrestres de colágeno incluem pele, tendões e ossos bovinos e suínos, além de subprodutos como pés de frango e mocotó bovino. Entretanto, fontes marinhas, como peixes e medusas, têm ganhado destaque devido ao bom rendimento de extração e menor risco de restrições sanitárias associadas a doenças de origem animal (Gulevsky e Shcheniavsky, 2020; Cherim e colaboradores, 2016; Farooq e colaboradores, 2024).

Jesus e colaboradores (2024) compararam o rendimento de colágeno extraído de mocotó bovino, pés de frango e bexiga natatória de tambaqui, obtendo valores de 1,79%, 3,49% e 39,97%, respectivamente. Os autores evidenciam que o elevado rendimento e a qualidade do colágeno proveniente da bexiga natatória de tambaqui indicam seu potencial como fonte alternativa viável para aplicações industriais.

3.5 Métodos de Extração de Colágeno de Matrizes Pesqueiras

Existem quatro métodos principais para a extração de colágeno a partir de matrizes pesqueiras, incluindo pele, escamas e bexigas natatórias de organismos aquáticos: extração ácida, extração enzimática, método combinado e extração térmica (Liu e colaboradores, 2015; Silva e colaboradores 2014; Wang e colaboradores 2014; Schrieber e Gareis, 2007).

O método de Colágeno Solúvel em Ácido (CSA) baseia-se na solubilização do colágeno por meio do rompimento de interações não covalentes promovido por ácidos orgânicos ou inorgânicos diluídos (Sripriya e colaboradores, 2015). Esse processo preserva parcialmente a estrutura da tripla hélice, dependendo das condições de extração.

Na extração enzimática, a clivagem seletiva das regiões telopeptídicas, predominantemente por ação da pepsina, promove a solubilização do colágeno nativo com preservação da estrutura helicoidal central, razão pela qual esse método é amplamente empregado devido ao maior rendimento e à manutenção das propriedades estruturais da proteína (Ahmad e Benjakul, 2011).

O método combinado envolve um pré-tratamento ácido da matéria-prima, seguido de digestão enzimática, promovendo maior eficiência de solubilização e remoção de impurezas (Liu e colaboradores, 2015).

Por sua vez, a extração térmica não resulta na obtenção de colágeno nativo, mas na produção de gelatina, proteína derivada da desnaturação parcial e hidrólise controlada da estrutura colagênica. Nesse processo, a tripla hélice é convertida em

cadeias polipeptídicas parcialmente desorganizadas, formando gelatina (Jeevithan e colaboradores, 2014).

Diversos estudos têm aplicado principalmente a extração enzimática de colágeno a partir de bexigas natatórias de diferentes espécies de peixes, conforme sintetizado no Quadro 1.

Quadro 1 - Estudos que realizaram extração de colágeno a partir de bexigas natatórias de diferentes espécies de peixes

Matéria-prima	Método de extração	Referência
Bexigas natatórias de corvina-gigante-chinesa (<i>Megalonibea fusca</i>)	Enzimático (pepsina)	Mo e colaboradores, 2023
Bexigas natatórias de goete (<i>Nibea japonica</i>)	Enzimático (pepsina, tripsina, neutrase, alcalase e papaína)	Zheng e colaboradores, 2020
Bexigas natatórias de robalo (<i>Lates calcarifer</i>)	Enzimático (pepsina)	Sinthusamran e colaboradores 2013
Bexiga natatória da enguia-marinha (<i>Muraenesox cinereus</i>)	Enzimático (pepsina)	Li e colaboradores, 2023
Bexiga natatória da carpa indiana rohu (<i>Labeo rohita</i>)	Enzimático (pepsina)	Kumar e colaboradores, 2017

Fonte: Elaboração própria (2025)

Comparativamente, a extração ácida apresenta menor complexidade operacional, enquanto os métodos enzimático e combinado tendem a favorecer a solubilização do colágeno e a preservação de sua região helicoidal. A predominância da pepsina nos estudos apresentados no Quadro 1 evidencia uma convergência metodológica para a extração de colágeno de bexigas natatórias. Entretanto, diferenças entre espécies, proporções de matéria-prima e solvente, concentração enzimática e tempo de extração dificultam a comparação direta dos rendimentos reportados. Assim, a escolha do método deve considerar conjuntamente eficiência de extração, preservação estrutural e viabilidade operacional (Ahmad e Benjakul, 2011; Liu e colaboradores, 2015).

3.6 Revestimentos Alimentícios à Base de Biopolímeros

O termo “revestimento alimentício” é frequentemente empregado para designar a aplicação de uma camada fina sobre a superfície de alimentos, com finalidade de preservação ou melhoria de atributos sensoriais, como brilho e aparência (Pavlath e Orts, 2014). Contudo, é necessário distinguir filmes de coberturas. Filmes — ou

películas — são estruturas autônomas obtidas a partir de solução filmogênica ou por processamento termoplástico (extrusão), sendo posteriormente aplicados ao alimento (Galus e colaboradores 2025). Já as coberturas são formadas *in situ* diretamente sobre a superfície do alimento, por meio de técnicas como imersão, pincelamento ou pulverização (Han e colaboradores, 2018).

Materiais utilizados para envolver alimentos e que podem ser consumidos juntamente com eles, sem necessidade de remoção prévia, são classificados como revestimentos comestíveis. Segundo Pavlath e Orts (2014), esses sistemas podem contribuir para a extensão da vida útil ao promover barreira seletiva à troca gasosa e redução da perda de umidade.

De acordo com Le e colaboradores (2024), as formulações de revestimentos alimentícios incluem, de modo geral, hidrocoloides, proteínas e lipídeos, isoladamente ou em combinação, com o objetivo de ajustar propriedades mecânicas e de barreira. Esses materiais são classificados como biopolímeros por se tratar de macromoléculas de origem biológica capazes de formar redes tridimensionais estruturadas (Avérous e Poletto, 2016).

A literatura tem reportado diversas aplicações de biopolímeros em revestimentos alimentícios comestíveis, conforme exemplificado no Quadro 2.

Quadro 2 – Aplicação de biopolímeros a revestimentos alimentícios comestíveis

Insumo	Categoria	Aplicação	Objetivo	Referência
Quitosana com nanocelulose	Hidrocoloide	Morangos <i>in natura</i>	Atividade antimicrobiana	Roy e Rhim, 2021
Proteína de arroz com óleo essencial de cravo	Proteína	Maçã fatiada	Atividade antioxidante	Feng e colaboradores 2022
Cera de carnaúba com óleo de andiroba	Lipídeo	Manga	Redução de perda de massa	Oliveira e colaboradores, 2023

Fonte: Elaboração própria (2025)

Roy e Rhim (2021) reportaram redução de aproximadamente 90% no crescimento de *Botrytis cinerea* em morangos armazenados a 4 °C, com extensão da vida útil em até 15 dias. Feng e colaboradores (2022) observaram inibição da oxidação e manutenção da firmeza de maçãs fatiadas após 12 dias de armazenamento a 4 °C. Oliveira e colaboradores (2023) relataram redução de 40% na perda de massa de mangas e controle da antracnose após 15 dias sob armazenamento a 12 °C.

Apesar de convergirem quanto ao potencial dos revestimentos para retardar alterações pós-colheita, esses estudos utilizaram materiais, componentes ativos, frutos e condições de armazenamento distintos. Dessa forma, os resultados não permitem estabelecer uma formulação universalmente superior, pois o desempenho do revestimento depende da interação entre sua composição, a superfície do alimento e as condições de conservação. Essa heterogeneidade reforça a necessidade de avaliar cada formulação diretamente no sistema alimentar ao qual se destina.

3.7 Formulação de Soluções Filmogênicas e Desenvolvimento de Filmes de Colágeno

A literatura descreve que filmes podem ser obtidos exclusivamente a partir do colágeno solubilizado. Fernandes e colaboradores (2007) produziram filmes utilizando extratos de bexigas natatórias das espécies tropicais gurijuba (*Arius parkeri*), pescada amarela (*Cynoscion acoupa*) e pescada branca (*Cynoscion leiarchus*). De modo semelhante, Sripriya e Kumar (2015) desenvolveram filmes empregando colágeno extraído da bexiga natatória de rohu (*Labeo rohita*).

Além do colágeno solubilizado, as soluções filmogênicas podem incluir plastificantes comestíveis, como glicerol ou sorbitol, em proporções variando entre 10% e 50% da massa de colágeno, com o objetivo de modificar propriedades mecânicas, especialmente flexibilidade e resistência (Fan e colaboradores, 2020; Liu e colaboradores, 2021).

O Quadro 3 apresenta exemplos de formulações reportadas na literatura para produção de filmes comestíveis à base de colágeno proveniente de bexigas natatórias.

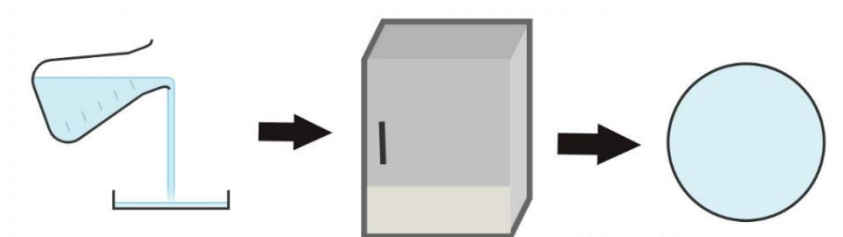
Quadro 3. Formulações de filmes comestíveis à base de colágeno obtido de bexigas natatórias de peixes

Espécie	Solvente da mistura	Plastificante	Referência
Carpa-do-limo (<i>Ctenopharyngodon idella</i>)	Ácido acético (CH ₃ COOH) 0,5 mol.L-1	Glicerol 30% (m/m do colágeno)	Liu e colaboradores 2021
Carpa indiana rohu (<i>Labeo rohita</i>)	Água destilada (45°C)	Sorbitol 30% (m/m do biopolímero)	Govindaswamy e colaboradores, 2018

Fonte: Elaboração própria (2025)

Segundo Fernandes e colaboradores (2007), as soluções filmogênicas são vertidas em placas de Petri ou superfícies acrílicas e submetidas à secagem em temperatura ambiente ou sob aquecimento moderado (25–30 °C), até formação de camada contínua, de acordo com a Figura 4.

Figura 4 – Processo de obtenção de filmes de colágeno por *casting*



Fonte: Elaboração própria, no Chemix® (2025)

Liu e colaboradores (2021) relataram que os filmes obtidos apresentaram características como transparência, coesão estrutural e propriedades de barreira moderadas a gases e umidade.

De modo geral, os estudos demonstram que o colágeno solubilizado apresenta capacidade própria de formação de filmes, enquanto a incorporação de plastificantes é empregada para modificar sua flexibilidade e facilitar o manuseio. Entretanto, o aumento da mobilidade das cadeias promovido por glicerol ou sorbitol também pode alterar propriedades como espessura, transparência, comportamento térmico e capacidade de barreira. Portanto, os benefícios da plastificação devem ser avaliados em conjunto com seus possíveis efeitos sobre as demais características do material, justificando a comparação entre formulações com diferentes concentrações de colágeno e com ou sem glicerol (Fernandes e colaboradores, 2007; Sripriya e Kumar, 2015; Fan e colaboradores, 2020; Liu e colaboradores, 2021).

3.8 Técnicas de Caracterização Físico-Química e Térmica de Filmes Biopoliméricos

A literatura descreve que a avaliação de revestimentos alimentícios envolve diferentes ensaios de caracterização físico-química, térmica e biológica, incluindo determinação de espessura, solubilidade, comportamento termogravimétrico, análise espectroscópica no Infravermelho por transformada de Fourier por Reflectância Total Atenuada (FTIR-ATR) e testes de atividade antimicrobiana e antioxidante (Suput e colaboradores, 2024; Pamukovic, 2017; Mojo-Quisani e colaboradores, 2024).

A espessura de filmes biopoliméricos está diretamente relacionada às propriedades mecânicas e de barreira, influenciando a permeabilidade a gases e vapor d'água. Sua determinação pode ser realizada por métodos micrométricos, enquanto propriedades mecânicas, como resistência à tração e alongação, são avaliadas por ensaios mecânicos padronizados (Nguyễn e colaboradores, 2024; colaboradores, 2021).

A solubilidade em água constitui parâmetro relevante na caracterização de filmes comestíveis, pois está associada ao comportamento de barreira e estabilidade em contato com umidade. Ensaios gravimétricos são amplamente empregados para essa finalidade (Gomez-Guillén e colaboradores, 2011). Liu e colaboradores (2015) relatam que, no caso de filmes obtidos a partir de colágeno de bexigas natatórias, adaptações metodológicas podem ser necessárias devido às características estruturais específicas desse biopolímero.

A análise termogravimétrica (TG) é utilizada para avaliar a estabilidade térmica e o perfil de perda de massa em função da temperatura, permitindo identificar eventos associados à evaporação de água residual e degradação térmica do material (Cao e colaboradores, 2023).

A caracterização estrutural do colágeno incorporado às formulações pode ser realizada por FTIR-ATR, técnica que permite identificar bandas características associadas à estrutura da tripla hélice e aos grupos funcionais do biopolímero (Gomez-Guillén e colaboradores, 2011; Lee e colaboradores, 2013).

No que se refere à avaliação biológica, estudos relatam a investigação de atividade antimicrobiana e antioxidante em filmes comestíveis, parâmetros associados à conservação de alimentos e à segurança microbiológica (Suput e colaboradores, 2024).

3.9 Estado da Arte, Desafios e Lacuna Científica

O tambaqui é descrito na literatura como uma das principais espécies da piscicultura amazônica, com relevância econômica regional e nacional. Estudos recentes relatam que a bexiga natatória dessa espécie apresenta elevado teor de colágeno tipo I, sendo utilizada como matriz alternativa para obtenção desse biopolímero (Araújo e colaboradores, 2020; Nascimento e colaboradores, 2021).

A literatura também descreve a aplicação de métodos enzimáticos, especialmente a hidrólise com pepsina, na extração de colágeno a partir de matrizes

pesqueiras, com relatos de rendimentos elevados e preservação da integridade estrutural da proteína (Araújo e colaboradores, 2020; Nascimento e colaboradores, 2021). Além disso, estudos reportam a utilização do colágeno isolado da bexiga natatória de tambaqui na produção de biomateriais e filmes biodegradáveis (Silva e colaboradores, 2022).

Entretanto, observa-se que os trabalhos disponíveis se concentram predominantemente na etapa de extração e caracterização do colágeno, havendo número reduzido de publicações que integrem, de forma sistemática, a extração, a formulação de soluções filmogênicas e a avaliação tecnológica dos filmes obtidos em aplicações alimentícias. Também são limitados os estudos que correlacionam propriedades estruturais, térmicas e mecânicas do colágeno proveniente da bexiga natatória de tambaqui com seu desempenho funcional como revestimento alimentício.

A partir da literatura consultada, identifica-se que as etapas de obtenção do colágeno, produção de filmes e aplicação em alimentos são frequentemente investigadas de forma isolada. Permanecem escassos os estudos que relacionem, em uma mesma investigação, as condições de extração e purificação do colágeno proveniente da bexiga natatória de tambaqui, a preservação de sua estrutura molecular, o efeito da concentração proteica e da adição de plastificante sobre as propriedades dos filmes e o desempenho dessas formulações quando aplicadas em frutos.

Nesse sentido, a contribuição original deste trabalho consiste na construção de uma sequência experimental integrada, iniciada pelo aproveitamento de um resíduo pesqueiro amazônico e concluída com a avaliação tecnológica dos revestimentos desenvolvidos. Além da produção e caracterização dos filmes, sua aplicação em banana e morango permite avaliar o comportamento das formulações em frutos com padrões respiratórios distintos, contribuindo para ampliar o conhecimento sobre a relação entre composição, estrutura e desempenho funcional de revestimentos à base de colágeno de pescado.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo experimental foi conduzido utilizando como matéria-prima a bexiga natatória de tambaqui (*Colossoma macropomum*), obtida a partir de resíduos do processamento do pescado. As etapas de extração do colágeno, formulação das soluções filmogênicas e a caracterização dos filmes obtidos foram realizadas no

Laboratório de Síntese e Caracterização de Nanomateriais (LSCN), do Instituto Federal do Amazonas (IFAM), vinculado ao Sistema Nacional de Laboratórios em Nanotecnologias (SisNANO).

Para os procedimentos experimentais foram utilizados equipamentos como incubadores *shaker*, ultra freezer, centrífuga de bancada, pHmetro de bancada, estufa de secagem, moinho de facas, liofilizador, vidrarias e materiais auxiliares adequados às análises propostas.

4.1 Matéria-prima

As bexigas natatórias de tambaqui (*Colossoma macropomum*) foram obtidas como resíduo da evisceração durante o beneficiamento do pescado em um estabelecimento comercial fixado no bairro Novo Aleixo, que se localiza na região norte do município de Manaus/AM. Após a coleta, o material foi acondicionado em recipientes térmicos sob refrigeração e transportado ao LSCN/IFAM.

No laboratório, as bexigas natatórias foram lavadas com água destilada para remoção de impurezas superficiais, submetidas à limpeza manual e armazenadas sob congelamento a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ até seu pré-tratamento e extração do colágeno.

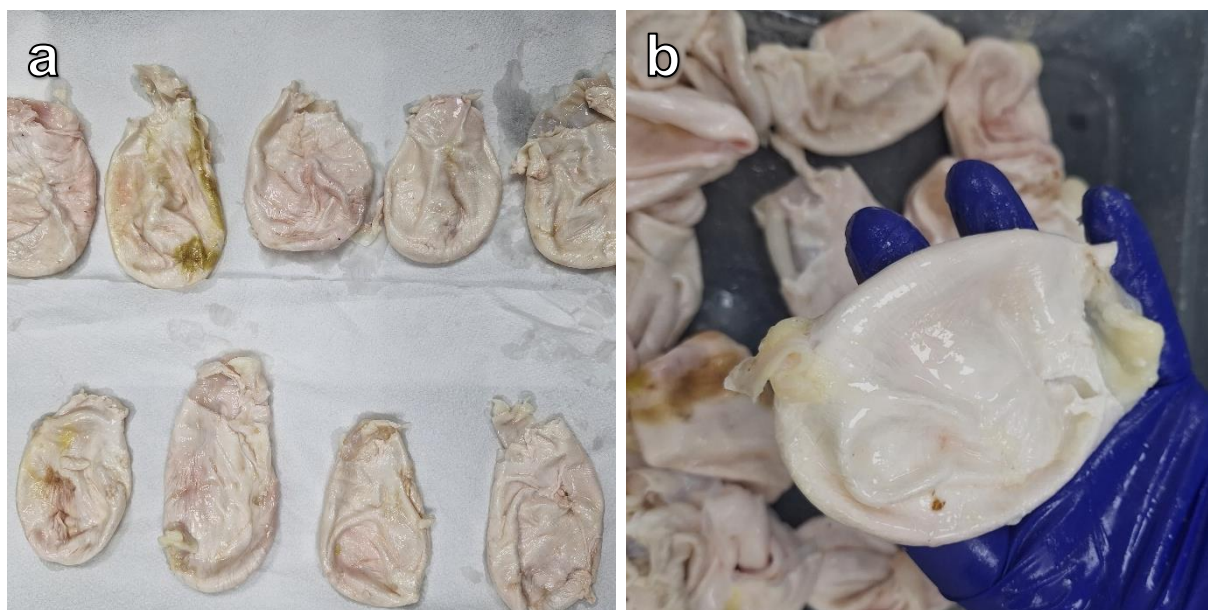
4.2 Preparo das Soluções

Foram preparadas soluções de hidróxido de sódio (NaOH) $0,1\text{ mol.L}^{-1}$, cloreto de sódio (NaCl) $0,8\text{ mol.L}^{-1}$ e $1,2\text{ mol.L}^{-1}$, e ácido acético (CH_3COOH) $0,5\text{ mol.L}^{-1}$ para serem utilizadas ao longo do procedimento experimental. Para a extração, a solução de ácido acético $0,5\text{ mol.L}^{-1}$ foi enriquecida em 2% (m/V) com a enzima pepsina. Todas as soluções foram preparadas com água destilada e reagentes de grau analítico.

4.3 Pré-tratamento da Matéria-prima

As bexigas natatórias de tambaqui (*Colossoma macropomum*), ilustradas na Figura 5 (a e b), foram inicialmente submetidas à lavagem com água deionizada para remoção de sujidades e impurezas provenientes do processo de evisceração.

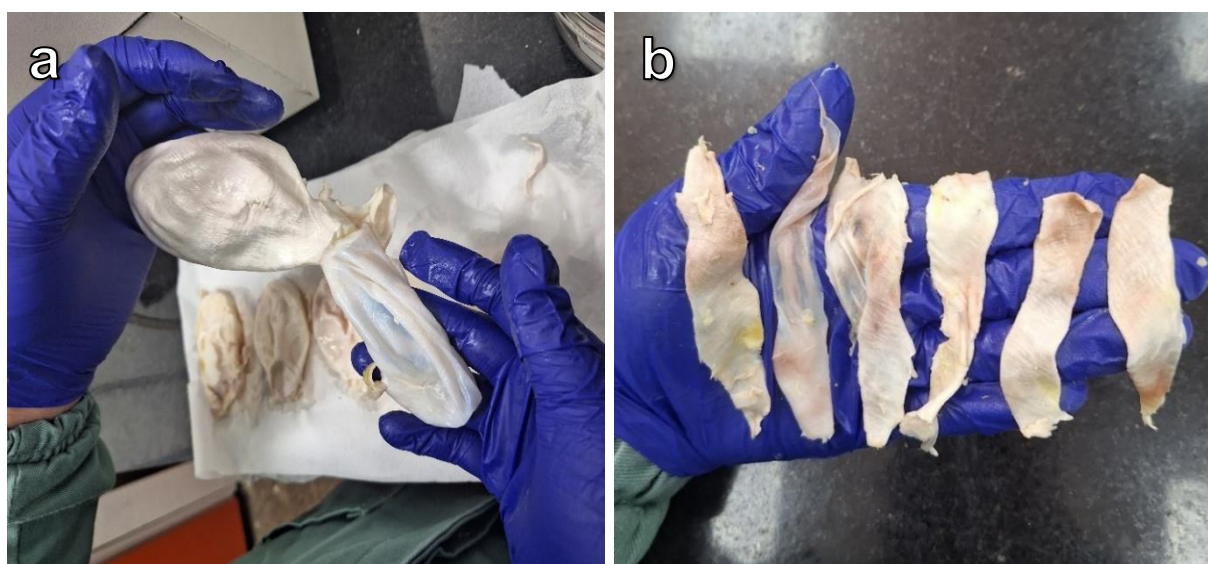
Figura 5 (a e b) – Bexigas natatórias de tambaqui para extração de colágeno



Fonte: Autoria própria (2025)

Posteriormente, as membranas interna e externa foram separadas manualmente e submetidas à filetagem para obtenção de fragmentos menores, ilustradas na Figura 6 (a e b), facilitando o tratamento químico subsequente.

Figura 6 – (a) Membranas interna e externa das bexigas natatórias sendo separadas e (b) filetadas para extração



Fonte: Autoria própria (2025)

O material foi imerso em solução de hidróxido de sódio (NaOH) 0,1 mol.L⁻¹, na proporção de 1:20 (m/V), sob agitação leve e temperatura ambiente por 24 h, com a finalidade de remover proteínas não colagênicas.

Após essa etapa, as amostras foram lavadas com água deionizada até atingirem pH neutro (~7,0), monitorado com pHmetro de bancada previamente calibrado.

Em seguida, o material foi submetido a tratamento com solução de cloreto de sódio (NaCl) 0,8 mol.L⁻¹, na proporção de 1:20 (m/V), sob agitação leve por 24 h, visando à remoção adicional de impurezas solúveis.

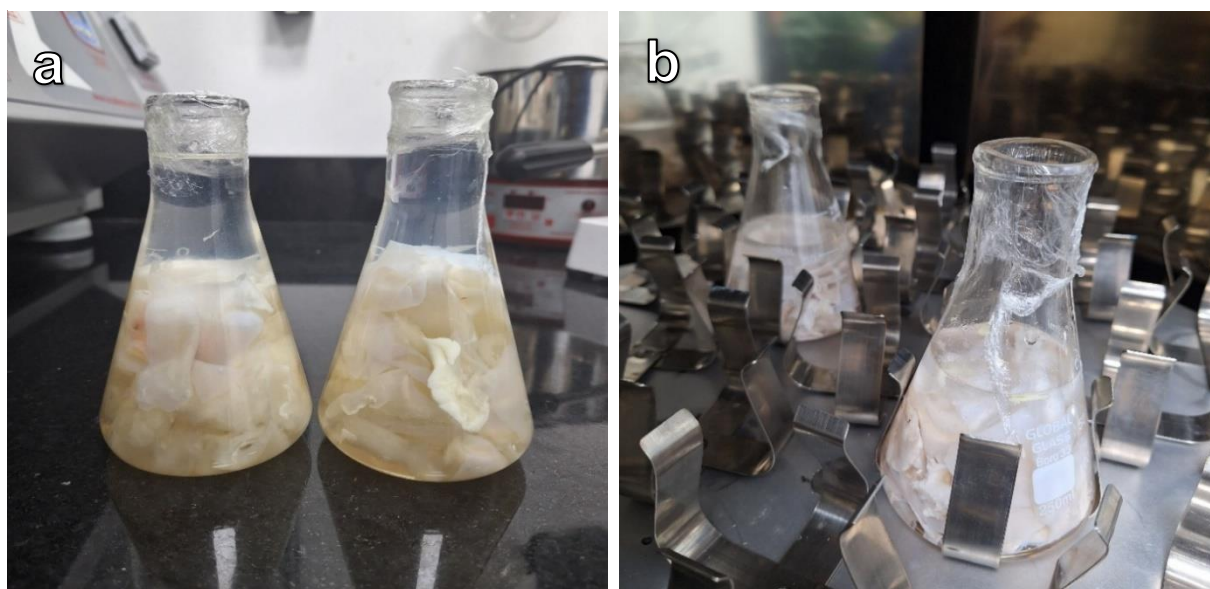
4.4 Obtenção do Colágeno a partir de Bexiga Natatória

4.4.1 Extração Ácido-enzimática

A extração enzimática do colágeno foi realizada com pepsina, conforme metodologia adaptada de Zhao e colaboradores (2018).

Após o pré-tratamento, a extração do colágeno foi realizada em solução de ácido acético 0,5 mol.L⁻¹ (AcOH) contendo pepsina a 2% (m/V). A extração foi conduzida sob agitação de 170 rpm por 24 h, em incubadora shaker de bancada, conforme demonstrado na Figura 7 (a e b).

Figura 7 – (a) Material em solução extratora e (b) sob agitação

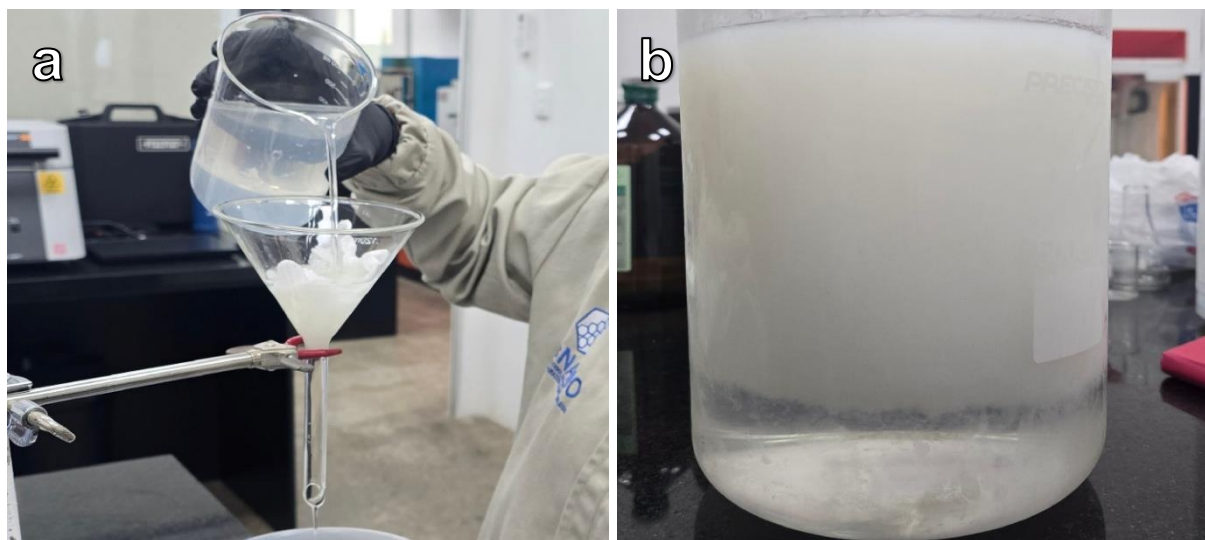


Fonte: Autoria própria (2025)

Após a extração, o material foi filtrado em duas camadas de gaze para remoção de resíduos sólidos, conforme a Figura 8 (a). Em seguida, foi adicionado NaCl 1,2

mol.L⁻¹, com a finalidade de promover a floculação (*salting-out*) do colágeno presente no meio ácido, de acordo com a Figura 8 (b).

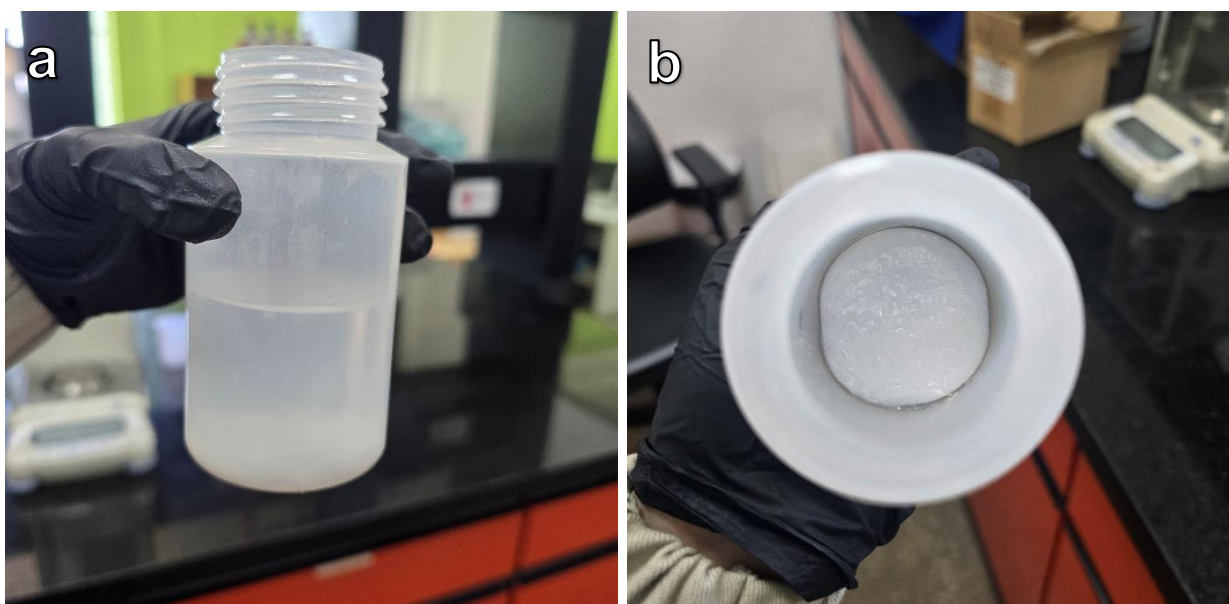
Figura 8 – (a) Filtração de extrato e (b) floculação de colágeno após adição de sal



Fonte: Autoria própria (2025)

A mistura foi distribuída em frascos de 200 mL, como na Figura 9 (a) e submetida à centrifugação a 5.500 rpm por 1 hora, para obtenção do precipitado, como na Figura 9 (b).

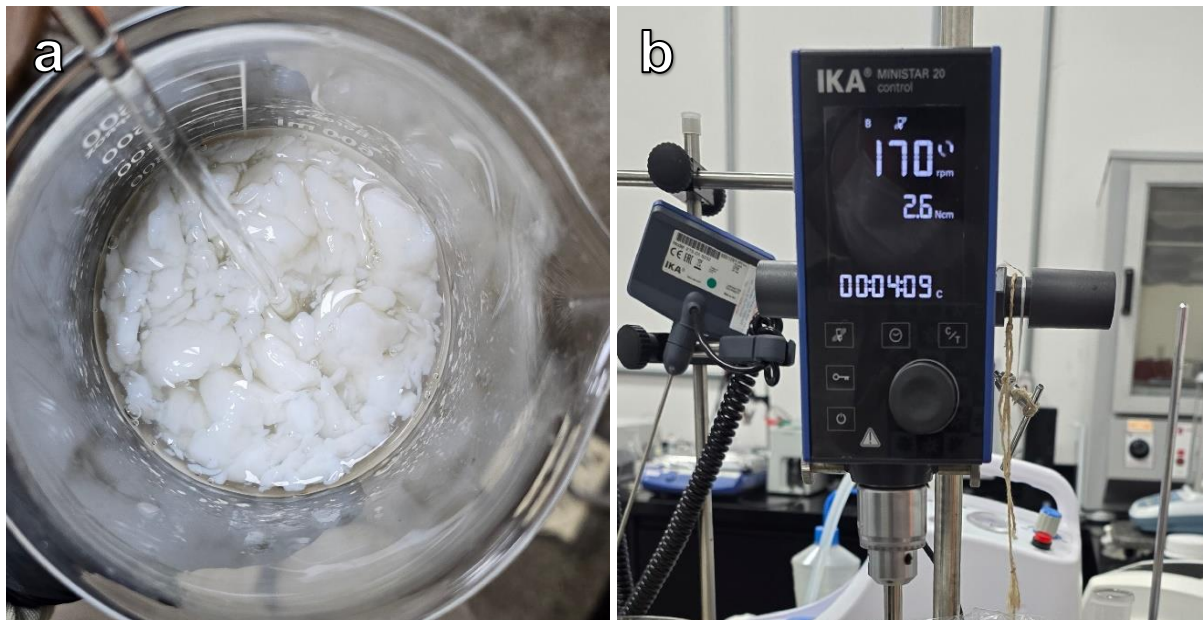
Figura 9 – (a) Material em frasco para centrifugação e (b) sedimentado obtido



Fonte: Autoria própria (2025)

Os pellets foram redissolvidos em ácido acético 0,5 mol.L⁻¹, sob agitação mecânica (170 rpm) até completa solubilização, como observado na Figura 10 (a e b).

Figura 10 – (a) Pellets redissolvidos e (b) sob agitação mecânica



Fonte: Autoria própria (2025)

4.4.2 Purificação do Colágeno por Diálise

O colágeno foi submetido à diálise para purificação, com uso de membrana MWCO 12–14 kDa (50 milímetros), previamente hidratada em água deionizada por 30 minutos. O extrato foi transferido para o tubo de diálise e vedado com presilhas apropriadas, para imersão em banho, conforme a Figura 11.

Figura 11 - Sistema de diálise: Tubo contendo extrato, imerso em solução de AcOH 0,1 mol.L⁻¹



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 12 – Aspecto macroscópico do colágeno após purificação por diálise

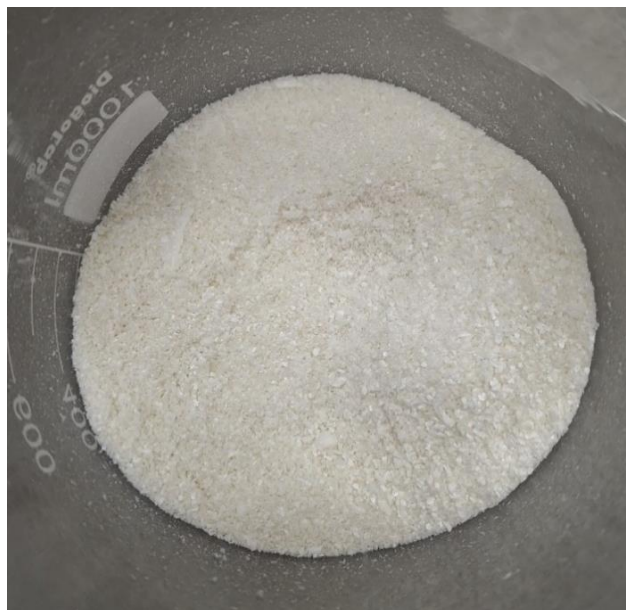


Fonte: Autoria própria (2025)

Após essa etapa, o colágeno purificado foi acondicionado tubos falcon, sendo submetido a congelamento rápido em *ultrafreezer* a -80°C , seguido por secagem em liofilizador.

Após a liofilização, o colágeno sólido foi submetido à moagem em moinho de facas, utilizando-se peneira de 18 *mesh*, com o objetivo de promover a redução e padronização do tamanho das partículas, obtendo-se um pó fino e homogêneo, conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13 – Colágeno liofilizado e moído após extração e purificação



Fonte: Autoria própria (2025)

4.5 Formulações das Soluções Filmogênicas

Foram desenvolvidas seis formulações, divididas em dois tipos de solução, sendo: tipo A, composta exclusivamente por colágeno solubilizado em meio ácido, e tipo B, constituída por colágeno, plastificante glicerol e solução ácida. A incorporação dos componentes foi realizada sob agitação leve até a obtenção de soluções visualmente homogêneas (Tongnuanchan e colaboradores, 2012 e Arfat e colaboradores, 2014).

As soluções filmogênicas do tipo A foram preparadas variando-se a concentração de colágeno purificado seco em 1,5%, 2,0% e 2,5% (m/V), em relação ao volume final da solução, utilizando-se ácido acético 0,5 mol.L⁻¹ como solvente.

Para as soluções do tipo B, foram mantidas as concentrações de colágeno (1,5%, 2,0% e 2,5% m/V), com adição de glicerol na proporção fixa de 30% (m/m) em relação à massa de colágeno. Após a incorporação do plastificante, as formulações foram solubilizadas em ácido acético 0,5 mol.L⁻¹.

A concentração de soluções ajustadas para 2% (m/V) é amplamente utilizada na literatura para a produção de filmes proteicos de colágeno e gelatina de peixe, assegurando fluidez e formação de película uniforme após a secagem (Kittiphattanabawon e colaboradores, 2005; Tongnuanchan e colaboradores, 2012). Assim, as formulações propostas alternaram em 0,5% acima e abaixo deste teor.

As formulações das soluções filmogênicas tipo A e tipo B são descritas na Tabela 1.

Tabela 1 - Formulação das soluções filmogênicas, considerando-se um volume final de 50 mL

Solução	Colágeno (g)	Glicerol (g)
A1	0,75	0,00
A2	1,00	0,00
A3	1,25	0,00
B1	0,75	0,23
B2	1,00	0,30
B3	1,25	0,38

Fonte: Elaboração própria (2025)

4.6 Obtenção dos filmes

As soluções filmogênicas previamente preparadas, apresentando aspecto homogêneo, foram utilizadas para a obtenção dos filmes por *casting*. Aliquotas de 5 mL foram vertidas em placas de Petri de poliestireno (PS), com dimensões de 60 mm × 15 mm, em triplicata. Para fins comparativos, também foram utilizadas placas de vidro borossilicato 3.3.

Após o vertimento, as soluções foram submetidas à secagem em estufa com circulação de ar, conforme demonstrado na Figura 14, à temperatura de 25 °C, até completa evaporação do solvente.

Figura 14 - Soluções filmogênicas vertidas, sob secagem em estufa com circulação de ar



Fonte: Autoria própria (2025)

4.7 Análises das Características do Colágeno

Após a obtenção e purificação, o colágeno foi submetido a análises físico-químicas, estrutural e térmica, com o objetivo de avaliar a preservação de sua integridade molecular e adequação para aplicação em filmes biodegradáveis.

4.7.1 Potencial Hidrogeniônico

A determinação do potencial hidrogeniônico (pH) foi realizada utilizando peagâmetro modelo Q400N, da marca Quimis, Brasil, previamente calibrado com soluções padrão de pH 4,00 e 7,00, à temperatura de 25 °C. A leitura foi efetuada diretamente na solução de colágeno solubilizada em ácido acético 0,5 mol.L⁻¹ (Jongjareonrak e colaboradores, 2005).

4.7.2 Rendimento

O rendimento do processo de extração do colágeno foi determinado pela razão entre a massa seca de colágeno obtida após liofilização e a massa úmida inicial do tecido (bexiga natatória limpa), sendo o resultado expresso em porcentagem, conforme a Equação 1 (Silva e colaboradores, 2014).

$$\text{Rendimento (\%)} = \frac{m_f}{m_0} 100 \quad (1)$$

onde m_0 corresponde à massa inicial do material e m_f à massa seca de colágeno obtida.

4.7.3 Solubilidade em ácido

A solubilidade do colágeno foi determinada em solução de ácido acético 0,5 mol.L⁻¹. Amostras de colágeno liofilizado, com massa previamente conhecida, foram dissolvidas sob agitação a 4 °C por 24 h e, posteriormente, centrifugadas a 10 000 rpm por 20 min, também a 4 °C. O conteúdo proteico presente no sobrenadante foi quantificado para estimar a fração solúvel em relação à massa total.

Essa análise permite avaliar o grau de integridade estrutural do colágeno, considerando que cadeias mais longas e menos desnaturadas tendem a apresentar maior solubilidade em meio ácido (Muyonga e colaboradores 2004).

4.7.4 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier por Reflectância Total Atenuada

A caracterização estrutural do colágeno foi realizada por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier utilizando acessório de reflectância total

atenuada (FTIR-ATR), em espectrômetro modelo Cary 630, da marca Agilent Technologies, equipado com cristal ATR de seleneto de zinco (ZnSe). As amostras de colágeno previamente liofilizadas e moídas foram analisadas diretamente sobre o cristal, sem preparo adicional.

Os espectros foram registrados na faixa de 4000 a 500 cm^{-1} , com resolução de 4 cm^{-1} e acúmulo de 32 varreduras por amostra. Antes de cada leitura, foi obtido o espectro de fundo sob as mesmas configurações instrumentais adotadas para as amostras. Os dados obtidos foram empregados para identificação das bandas características do colágeno, com ênfase nas regiões correspondentes às amidas I, II e III.

4.7.5 Análise Termogravimétrica

A estabilidade térmica do colágeno foi avaliada por análise termogravimétrica (TG) e sua derivada (DTG). As análises foram realizadas em equipamento modelo TG-50H, da marca Shimadzu Corporation. Sob atmosfera inerte de nitrogênio de pureza 5.0.

As amostras de colágeno liofilizado e moído foram acondicionadas em cadinhos apropriados, com massa aproximada de 6,0 mg, e submetidas a aquecimento na faixa de temperatura de 25 a 800 °C, com razão de aquecimento de 10 °C min^{-1} . As curvas de perda de massa (TG) e sua derivada (DTG) foram utilizadas para avaliar os eventos de decomposição térmica e a estabilidade do material.

4.8 Análises das Características Físicas dos Filmes

Após a obtenção dos filmes pelo método de *casting*, foram realizadas análises de espessura, opacidade e estabilidade térmica, com o objetivo de avaliar suas propriedades físicas, ópticas e térmicas. A espessura foi determinada por influenciar diretamente as demais propriedades, a opacidade foi medida para caracterizar o comportamento óptico dos materiais.

4.8.1 Formulação, Secagem e Remoção dos Filmes

Os filmes de colágeno foram obtidos pelo método de *casting*, a partir de soluções filmogênicas preparadas com colágeno purificado solubilizado em ácido acético 0,5 mol.L⁻¹, nas concentrações de 1,5%, 2,0% e 2,5% (m/V). As soluções foram vertidas em placas de Petri de poliestireno (PS) e placas de vidro, sendo

posteriormente submetidas à secagem até completa evaporação do solvente e formação das películas.

Após a secagem, os filmes foram removidos manualmente a partir das bordas da placa, avaliando-se qualitativamente a facilidade de destacamento e a integridade estrutural das películas formadas.

4.8.2 Espessura dos Filmes

A espessura dos filmes foi determinada utilizando especímetro modelo Digimatic (0–12,7 mm; resolução 0,001 mm), da marca Mitutoyo *Corporation*, Japão. Para cada formulação, preparada em triplicata, foram realizadas cinco medições em pontos distintos de cada amostra, evitando-se as bordas, conforme ilustrado na Figura 15. Os resultados foram expressos como média $\pm$ desvio padrão, em micrômetros (μm). O procedimento foi conduzido conforme metodologia descrita por Tongnuanchan e colaboradores (2012).

Figura 15 - Medição da espessura dos filmes com especímetro digital



Fonte: Autoria própria (2025)

4.8.3 Opacidade dos Filmes

A opacidade dos filmes foi determinada por espectrofotometria na região do ultravioleta-visível (UV-Vis), por meio da medição da absorbância a 600 nm. Os valores obtidos foram normalizados pela espessura do filme (mm), conforme a Equação 2. Valores mais elevados de opacidade indicam menor transparência do material. Essa análise permite avaliar o potencial de aplicação dos filmes como

revestimentos comestíveis ou embalagens biodegradáveis. O procedimento foi realizado de acordo com as metodologias descritas por Arfat e colaboradores (2014) e Tongnuanchan e colaboradores (2012).

$$Opacidade = \frac{Abs_{600}}{Espessura\ (mm)} \quad (2)$$

4.8.4 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier por Reflectância Total Atenuada dos Filmes

A caracterização estrutural dos filmes foi realizada por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier utilizando Acessório de Reflectância Total atenuada (FTIR-ATR), conforme procedimento descrito no item 4.7.4.

4.8.5 Análise Termogravimétrica

A estabilidade térmica dos filmes foi avaliada por análise termogravimétrica (TG) e sua derivada (DTG), no equipamento e condições detalhadas na seção 4.7.5.

Isto para identificar os eventos térmicos característicos e avaliar a influência da composição das formulações sobre a estabilidade térmica da matriz filmogênica.

5 Definição de frutos, aplicação de filmes e avaliação da vida útil

5.1 Seleção dos frutos

Os frutos selecionados para os ensaios de aplicação dos filmes e avaliação da vida de prateleira foram banana (*Musa* spp.) e morango (*Fragaria* × ananassa), um fruto climatérico e um fruto não climatérico, respectivamente. De acordo com Kader e Hussain (2022), frutos climatéricos são aqueles que apresentam aumento acentuado da taxa respiratória e da produção de etileno após a colheita, resultando na continuidade do amadurecimento mesmo após serem destacados da planta. Já os frutos não climatéricos não apresentam esse pico respiratório, sendo seu amadurecimento dependente principalmente dos processos ocorridos antes da colheita.

Essa escolha permite a avaliação do desempenho dos revestimentos em produtos com diferentes padrões respiratórios e mecanismos de deterioração (Kader e Hussain, 2022).

Além disso, ambos os frutos apresentam elevada importância comercial e são frequentemente empregados em estudos de conservação utilizando revestimentos

biodegradáveis devido à sua alta perecibilidade e sensibilidade às condições de armazenamento (Kumar e colaboradores, 2021; Benítez e colaboradores, 2022).

Os frutos foram adquiridos em estabelecimentos comerciais da cidade de Manaus-AM e selecionados de acordo com critérios de uniformidade de tamanho, coloração e estágio de maturação, unidades que apresentaram danos mecânicos, deformações, defeitos superficiais ou sinais visíveis de deterioração microbiológica foram descartados. Após a seleção, os frutos passaram para a aplicação dos revestimentos.

5.2 Seleção de filmes para uso

As formulações dos filmes biodegradáveis produzidos a partir do colágeno extraído foram previamente caracterizadas quanto às suas propriedades físicas, estruturais e térmicas através das análises de espessura, opacidade, espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e análise termogravimétrica (TG). Estas análises permitiram avaliar a integridade estrutural dos filmes, sua estabilidade térmica e características relacionadas à sua aplicação como revestimentos biodegradáveis (Roy e Rhim, 2021; Benítez e colaboradores, 2022; Motta e colaboradores, 2023).

Filmes e revestimentos comestíveis são amplamente estudados como alternativas para reduzir trocas de umidade e gases, retardar processos de deterioração e contribuir para o aumento da vida útil de alimentos perecíveis (Díaz-Montes e Castro-Muñoz, 2021; Matloob e colaboradores, 2023).

A partir dos resultados obtidos, foram selecionadas duas formulações, sendo uma do grupo A e outra do grupo B, para aplicação nos frutos escolhidos. Para o Tratamento 1 (T1), dentre os filmes do tipo A, optou-se pela formulação A2, uma vez que esta apresentou espessura intermediária e menor opacidade em comparação às demais formulações do mesmo grupo. Esse comportamento indica melhor equilíbrio físico-visual da matriz, aspecto desejável para aplicações em frutos, uma vez que propriedades como espessura, transparência e opacidade influenciam diretamente a aparência, a aceitabilidade visual e o desempenho dos filmes e revestimentos aplicados em alimentos (Díaz-Montes e Castro-Muñoz, 2021).

Para o Tratamento 2 (T2), dentre os filmes do tipo B, a formulação B1 foi selecionada por apresentar a menor espessura dentro do grupo, associada à baixa opacidade. A incorporação de plastificantes, como o glicerol, pode favorecer a

flexibilidade da matriz filmogênica, característica importante para a formação de revestimentos mais adaptáveis à superfície dos frutos (Ciurzyńska e colaboradores, 2024).

Dessa forma, as soluções filmogênicas correspondentes aos filmes A2 e B1 foram selecionadas para aplicação direta sobre a superfície dos frutos, visando avaliar sua influência sobre a perda de massa, aparência geral e ocorrência de crescimento microbiano visível durante o armazenamento.

5.3 Aplicação do revestimento

Para uso dos revestimentos, os frutos foram selecionados visualmente quanto à ausência de injúrias mecânicas, sinais aparentes de deterioração e crescimento microbiano visível. Foram escolhidos frutos com grau de maturação, tamanho e aparência semelhantes, a fim de reduzir a variabilidade experimental. Em seguida, os frutos passaram por rápida lavagem com água destilada e foram distribuídos em três grupos experimentais: controle, sem aplicação de revestimento; T1, com aplicação da solução filmogênica A2; e T2, com aplicação da solução filmogênica B1. Cada tratamento foi conduzido em triplicata, totalizando três unidades de fruto por tratamento.

A aplicação dos revestimentos foi realizada por imersão dos frutos nas soluções filmogênicas A2 e B1, conforme descrito por Suhag e colaboradores (2020), que indicam a imersão como uma das técnicas empregadas para a deposição de revestimentos comestíveis sobre a superfície de alimentos. Esse método foi adotado por favorecer, de acordo com Priya e colaboradores (2023), o contato uniforme da solução filmogênica com a superfície dos frutos, possibilitando a formação de uma camada contínua após a secagem superficial, uma vez que, em tentativa prévia de aplicação dos filmes prontos, foi observada dificuldade de aderência à superfície dos frutos. Após a imersão, os frutos foram mantidos sobre grades sanitizadas, em temperatura ambiente, para escoamento do excesso de solução e secagem superficial até ausência de escoamento visível. Em seguida, foram realizados a pesagem inicial e o registro fotográfico dos frutos, considerados como tempo zero do armazenamento.

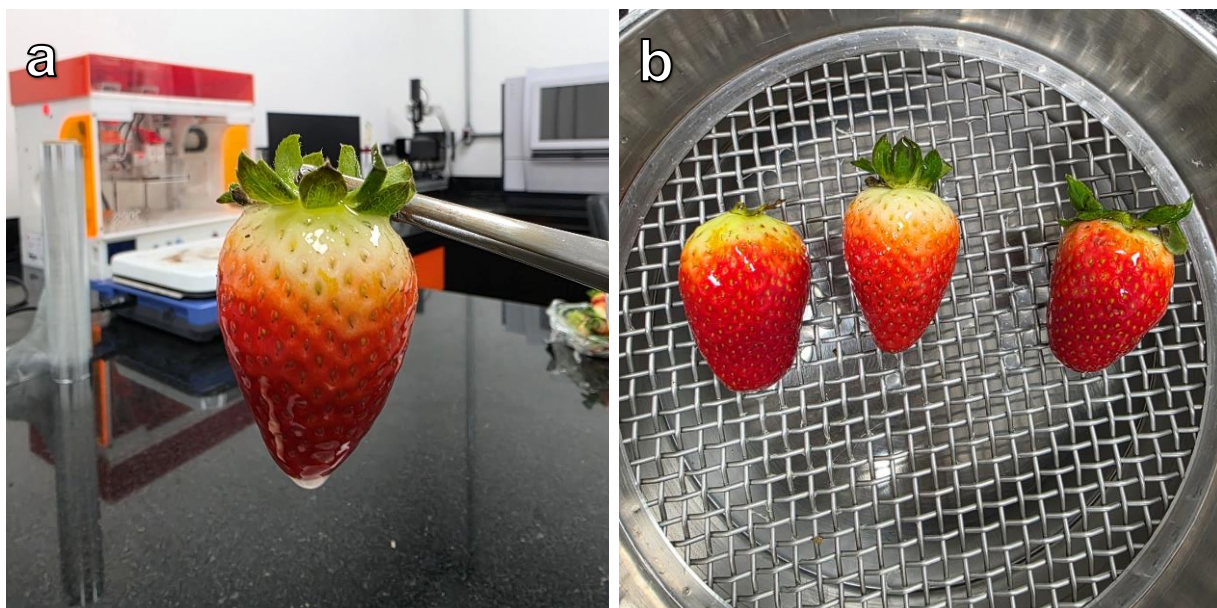
A Figura 16 (a e b) demonstra a aplicação e secagem das coberturas nas superfícies de bananas, enquanto a Figura 17 (a e b), em morangos.

Figura 16 – Aplicação (a) e secagem (b) de revestimento em bananas



Fonte: Autoria própria (2026)

Figura 17 - Aplicação e secagem de revestimento em morangos



Fonte: Autoria própria (2026)

5.4 Avaliação da vida útil

A avaliação da vida útil dos frutos foi realizada a partir do acompanhamento das amostras controle e revestidas durante o período de armazenamento. Para isso, foram considerados os tratamentos controle, A2 e B1, conduzidos em triplicata para cada fruto avaliado. As mesmas unidades experimentais foram acompanhadas ao

longo dos dias, permitindo observar a evolução das alterações físicas e visuais em cada amostra.

Durante o período experimental, os frutos dos grupos controle, T1 e T2 foram armazenados sob temperatura de 25 °C e umidade relativa de 60%, sem incidência direta de radiação solar. Essas condições foram adotadas para avaliar o desempenho dos revestimentos durante o armazenamento em ambiente não refrigerado. Condições semelhantes são relatadas em estudos de aplicação de revestimentos em bananas, armazenadas a 28 ± 2 °C e umidade relativa entre 50% e 60%, e em morangos, mantidos a 25 °C e umidade relativa entre 55% e 60% (Roidoung e colaboradores, 2025; Li e colaboradores, 2025). Todos os tratamentos permaneceram submetidos às mesmas condições ambientais durante o período de acompanhamento.

Foram avaliados os parâmetros de perda de massa, qualidade aparente e crescimento microbiano durante o armazenamento, a fim de verificar a eficiência dos revestimentos na manutenção da qualidade e no prolongamento da vida útil (Khan e colaboradores, 2019; Pérez-Vázquez e colaboradores, 2023).

As observações foram iniciadas após a secagem superficial dos revestimentos, momento considerado como tempo zero do experimento. Para as bananas, as avaliações foram realizadas nos dias 0, 2, 4, 6, 8, 10 e 12 de armazenamento. Para os morangos, devido à sua maior perecibilidade, as avaliações foram realizadas diariamente, nos dias 0, 1, 2, 3, 4, 5 e 6 de armazenamento.

5.4.1 Perda de massa

A perda de massa dos frutos foi determinada por meio da pesagem individual das amostras ao longo do período de armazenamento. Cada fruto foi identificado e pesado inicialmente após a secagem superficial dos revestimentos, sendo essa massa considerada como massa inicial no tempo zero. As pesagens subsequentes foram realizadas nos dias estabelecidos para cada fruto, conforme descrito no item 5.4.

A perda de massa foi expressa em porcentagem, considerando a diferença entre a massa inicial e a massa obtida em cada dia de avaliação. Esse parâmetro foi utilizado por estar diretamente relacionado à perda de água e à desidratação dos frutos durante o armazenamento, sendo um importante indicativo da manutenção da qualidade pós-colheita e da eficiência dos revestimentos na redução das trocas de

umidade com o ambiente (Khan e colaboradores, 2019; Pérez-Vázquez e colaboradores, 2023).

A perda de massa foi calculada de acordo com a Equação 3, conforme Khan e colaboradores (2019).

$$\text{Perda de massa (\%)} = \frac{M_i - M_t}{M_i} \times 100 \quad (3)$$

Onde,

M_i corresponde à massa inicial do fruto;

M_t massa do fruto no dia de avaliação.

5.4.2 Avaliação visual

A qualidade aparente dos frutos foi avaliada visualmente ao longo do período de armazenamento, considerando alterações externas relacionadas à aparência geral das amostras. Foram observados aspectos como mudança de coloração, perda de brilho, murchamento, presença de manchas, escurecimento superficial e alterações na integridade da casca ou superfície dos frutos.

As avaliações foram realizadas nos mesmos dias estabelecidos para cada fruto, conforme descrito no item 5.4. Em cada dia, os frutos foram fotografados individualmente, a fim de permitir o acompanhamento visual da evolução das alterações ao longo do armazenamento.

A avaliação da qualidade aparente foi utilizada como parâmetro complementar à perda de massa, pois o aspecto visual dos frutos é um dos principais indicativos de qualidade durante o armazenamento. Isso porque, de acordo com Khan e colaboradores (2019), alterações como murchamento, escurecimento, manchas superficiais e sinais de deterioração influenciam diretamente a aceitabilidade do produto. Dessa forma, a comparação entre os frutos controle e os frutos revestidos permitiu verificar a possível influência das soluções filmogênicas A2 e B1 na manutenção da aparência dos frutos ao longo do armazenamento.

5.4.3 Deterioração microbiológica visível

A deterioração microbiológica visível dos frutos foi avaliada por observação direta ao longo do período de armazenamento, juntamente com os registros de perda de massa e avaliação visual. Foram considerados sinais aparentes de crescimento microbiano, como presença de colônias visíveis, bolores, pontos esbranquiçados,

esverdeados ou escurecidos, além de alterações superficiais associadas à deterioração dos frutos.

As avaliações foram realizadas nos mesmos dias estabelecidos para cada fruto, conforme descrito no item 5.4. Em cada dia de observação, foi registrada a presença ou ausência de sinais visíveis de crescimento microbiano em cada unidade experimental, permitindo acompanhar a evolução da deterioração durante o armazenamento.

A observação da deterioração microbiológica visível foi utilizada como parâmetro complementar à perda de massa e à avaliação visual, uma vez que o desenvolvimento de microrganismos na superfície dos frutos está diretamente associado à redução da qualidade e ao comprometimento da vida útil. De acordo com Pérez-Vázquez e colaboradores (2023), os revestimentos comestíveis podem contribuir para a proteção dos alimentos contra contaminantes microbianos, reduzindo os efeitos da deterioração e favorecendo o aumento da vida útil.

De acordo com Khan e colaboradores (2019), a avaliação da deterioração microbiológica visível em frutos revestidos permite verificar a eficiência dos revestimentos na manutenção da qualidade durante o armazenamento. Dessa forma, a comparação entre os tratamentos controle, A2 e B1 permitiu verificar se as soluções filmogênicas aplicadas contribuíram para retardar o aparecimento de sinais visíveis de deterioração.

5.5 Delineamento experimental e tratamento dos dados

O estudo foi organizado em três etapas experimentais: obtenção e caracterização do colágeno, desenvolvimento e caracterização dos filmes e aplicação das soluções filmogênicas em frutos. Na primeira etapa, a extração foi conduzida a partir de um lote de 100 g de bexiga natatória. As determinações de rendimento, pH, FTIR-ATR e TG/DTG foram realizadas utilizando o colágeno obtido desse lote, enquanto a solubilidade em ácido foi determinada em três réplicas analíticas ($n = 3$).

Para o desenvolvimento dos filmes, foi adotada uma estrutura experimental composta por dois fatores: concentração de colágeno, nos níveis de 1,5%, 2,0% e 2,5% (m/V), e presença de glicerol, nos níveis de 0% e 30% (m/m) em relação à massa de colágeno. A combinação desses fatores originou seis formulações: A1, A2, A3, B1, B2 e B3. Cada formulação foi vertida em três placas, constituindo três unidades de filme por tratamento. Para a espessura, foram realizadas cinco medições técnicas em

pontos distintos de cada unidade de filme. A média dessas medições representou cada unidade experimental, totalizando três unidades de filme por formulação ($n = 3$). As variáveis independentes foram a concentração de colágeno e a presença de glicerol, enquanto as variáveis resposta incluíram formação e integridade dos filmes, espessura, opacidade, características espectroscópicas e parâmetros térmicos.

Os ensaios de aplicação foram realizados separadamente para bananas e morangos, considerando três tratamentos: controle, sem revestimento; T1, correspondente à aplicação da formulação A2; e T2, correspondente à aplicação da formulação B1. Cada tratamento foi constituído por três frutos, sendo cada fruto considerado uma unidade experimental independente ($n = 3$). As variáveis independentes foram o tipo de tratamento e o tempo de armazenamento, sendo as mesmas unidades acompanhadas ao longo dos dias de avaliação. As variáveis resposta foram perda de massa, aparência geral e ocorrência de deterioração microbiológica visível.

Os resultados quantitativos foram tratados por estatística descritiva e apresentados como média e desvio-padrão. Em razão do caráter exploratório do estudo e do número de unidades experimentais, não foram aplicados testes estatísticos inferenciais. Portanto, as diferenças entre os tratamentos foram interpretadas como tendências numéricas e descritivas, sem atribuição de significância estatística.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Das Características do Colágeno

6.1.1 Potencial Hidrogeniônico

O potencial hidrogeniônico pH da solução de colágeno foi determinado com o objetivo de avaliar a acidez do meio após o processo de extração e posterior redissolução do material purificado em solução de ácido acético $0,5 \text{ mol.L}^{-1}$. O valor de pH obtido foi de 2,83.

Em processos de extração de colágeno utilizando ácido acético, é comum que o colágeno purificado seja redissolvido no mesmo solvente ácido antes das etapas subsequentes de caracterização ou secagem. Estudos envolvendo a extração de colágeno a partir da bexiga natatória utilizando soluções de ácido acético entre $0,1$ e $0,5 \text{ mol.L}^{-1}$, como os descritos por Dong e Dai (2022) e Kumar e colaboradores (2017),

relatam que o pH final da solução é predominantemente governado pelo equilíbrio ácido-base do ácido acético presente no meio.

Considerando que a concentração do ácido acético utilizado ($0,5 \text{ mol.L}^{-1}$) é significativamente superior à concentração de proteína em solução (tipicamente na ordem de mg.mL^{-1}), a contribuição das propriedades anfotéricas do colágeno para a variação do pH é mínima. Nessas condições, o sistema apresenta predominância de espécies protonadas, mantendo o meio em faixa fortemente ácida. (He e colaboradores, 2011; Yan e colaboradores, 2010)

O valor de pH observado (2,83) está de acordo com essa condição experimental e indica que a amostra permaneceu em meio ácido adequado para a manutenção da solubilidade do colágeno. Ambientes ácidos favorecem a protonação de grupos funcionais presentes nas cadeias polipeptídicas, reduzindo interações intermoleculares que poderiam levar à agregação proteica e contribuindo para a estabilidade da estrutura helicoidal característica do colágeno antes do processo de secagem.

Essa condição de estabilidade estrutural em meio ácido é corroborada posteriormente pelos resultados de FTIR-ATR, apresentados na Seção 6.1.4, nos quais foram observadas bandas características associadas à preservação da estrutura helicoidal do colágeno.

6.1.2 Rendimento

A partir de 100 g de bexiga natatória fresca, foram obtidos 47 g de colágeno extraído, purificado e seco, correspondendo a rendimento de 47%. Esse valor indica eficiência satisfatória do protocolo adotado, considerando as etapas sucessivas de pré-tratamento, extração enzimática, precipitação salina, diálise e liofilização. O rendimento obtido posiciona-se na faixa intermediária-superior dos valores reportados na literatura para colágeno de pescado.

Kumar e colaboradores (2017) reportaram rendimento de 46,5% para colágeno extraído da bexiga natatória de *Labeo rohita*, valor praticamente equivalente ao observado neste estudo, sugerindo consistência metodológica e eficiência comparável do processo. Em contraste, Dong e Dai (2022) relataram rendimentos variando entre 10,35% e 38,98% para diferentes espécies, incluindo *Ctenopharyngodon idella*, *Aristichthys nobilis*, *Epinephelus* sp. e representantes da ordem *Lophiiformes*, evidenciando a influência de fatores biológicos, estruturais e

composicionais na eficiência da extração. Quando comparado a esse intervalo, o rendimento de 47% obtido neste trabalho supera o limite superior reportado por esses autores, indicando desempenho técnico satisfatório do método aplicado à matéria-prima utilizada.

Estudos que reportaram rendimentos mais elevados, entre 63,35% e 69%, como os descritos para *Congresox talabon* (Djailani e colaboradores, 2016), *Cynoscion othonopterus* (Cruz-López e colaboradores, 2021) e *Totoaba macdonaldi* (Cruz-López e colaboradores 2023), geralmente envolvem espécies com elevado teor proteico na bexiga natatória ou condições operacionais otimizadas, incluindo ajustes na concentração de ácido, proporção enzima/substrato e tempo de extração. Dessa forma, as diferenças observadas entre os estudos podem ser atribuídas tanto às características intrínsecas das espécies quanto às variáveis experimentais adotadas.

Após a liofilização, o colágeno seco foi submetido à moagem para padronização granulométrica por limitação de tamanho máximo (18 *mesh* = 1.000 μm = 1,0 mm), etapa na qual ocorreu perda operacional de aproximadamente 2 g, resultando em 45 g de material disponível para a preparação das soluções filmogênicas. Essa redução corresponde a cerca de 4,3% da massa seca obtida e está associada à retenção de partículas nas superfícies internas do equipamento e à dispersão de frações finas durante o processamento mecânico. Ressalta-se que essa perda está associada à retenção de partículas nas superfícies internas do equipamento e à dispersão de frações finas durante o processamento mecânico, sendo característica de operações de moagem em escala laboratorial e não comprometendo a viabilidade do material para as etapas subsequentes.

De maneira geral, o rendimento de 47% associado à baixa perda operacional pós-moagem demonstra que o processo empregado apresentou eficiência adequada e controle satisfatório das etapas de processamento, garantindo quantidade suficiente de material com qualidade apropriada para o desenvolvimento e avaliação dos filmes biodegradáveis.

6.1.3 Solubilidade em ácido

A solubilidade do colágeno foi avaliada em solução de AcOH 0,5 mol.L⁻¹, com o objetivo de verificar a capacidade de dispersão da proteína em meio ácido e inferir sobre sua integridade estrutural após o processo de extração. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Solubilidade do colágeno em ácido 0,5 mol.L⁻¹ (n = 3)

Parâmetro	Valor (média ± desvio padrão)
Proteína solúvel (%)	93,0 ± 0,8
Fração insolúvel (%)	7,0 ± 0,8

Fonte: Elaboração própria (2026)

O conteúdo proteico presente no sobrenadante foi quantificado após centrifugação da solução, permitindo estimar a fração solúvel do colágeno em relação à massa total da amostra. A solubilidade em meio ácido é considerada um importante indicador da integridade molecular do colágeno, uma vez que cadeias polipeptídicas longas e estruturalmente preservadas apresentam maior capacidade de hidratação, dispersão e estabilização em soluções diluídas de ácidos orgânicos (Muyonga e colaboradores, 2004).

Conforme descrito por Muyonga e colaboradores (2004), colágenos extraídos por métodos ácidos ou ácido-enzimáticos tendem a apresentar elevada solubilidade em ácido acético, resultado associado à manutenção da organização estrutural da proteína e à preservação das interações intermoleculares responsáveis pela estabilidade da tripla hélice característica do colágeno.

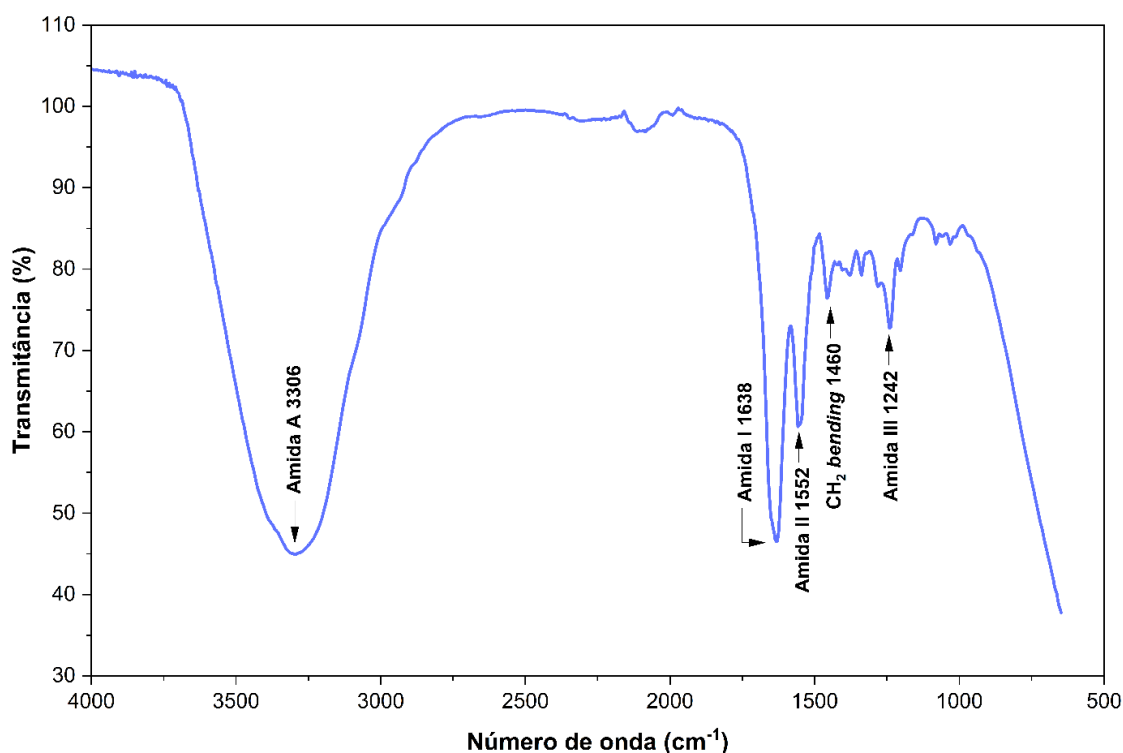
No presente estudo, a amostra apresentou 93,0 ± 0,8% de fração solúvel, indicando elevada capacidade de dispersão em meio ácido e sugerindo que o processo de extração empregado não promoveu degradação significativa das cadeias polipeptídicas do colágeno. A baixa fração insolúvel (7,0 ± 0,8%) pode estar associada à presença residual de agregados proteicos ou de pequenas porções de material estruturalmente mais compacto, que apresentam menor interação com o solvente ácido.

A elevada solubilidade observada também se mostra consistente com os resultados obtidos nas demais análises de caracterização realizadas neste estudo. O pH ácido da solução (Seção 6.1.1) favorece a protonação de grupos funcionais das cadeias polipeptídicas, reduzindo interações intermoleculares que poderiam levar à agregação proteica e, conseqüentemente, aumentando a solubilidade do colágeno em solução.

6.1.4 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier por Reflectância Total Atenuada

O colágeno obtido após o processo de purificação foi caracterizado por espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier por Reflectância Total Atenuada (FTIR-ATR), com o objetivo de identificar os grupos funcionais presentes e avaliar a integridade estrutural da proteína. A Figura 18 apresenta o espectro obtido na faixa espectral de 4000 a 500 cm^{-1} .

Figura 18 - Espectro de FTIR-ATR do colágeno obtido por extração ácido-enzimática.



Fonte: Autoria própria (2025)

A análise espectral evidenciou bandas características do colágeno tipo I, associadas às regiões de Amida A, Amida I, Amida II e Amida III, que são atribuídas às vibrações das ligações peptídicas presentes na estrutura proteica. Essas bandas são amplamente utilizadas como indicadores estruturais em proteínas fibrosas, particularmente no colágeno.

De acordo com Muyonga e colaboradores (2004), a banda correspondente à Amida A ocorre tipicamente entre 3400 e 3440 cm^{-1} e está relacionada ao estiramento das ligações N–H, sendo sensível à presença de ligações de hidrogênio. No espectro obtido neste estudo, essa banda foi observada em 3306 cm^{-1} , sugerindo a ocorrência

de interações intermoleculares por ligações de hidrogênio, características da organização estrutural do colágeno.

A banda de Amida I, observada em 1638 cm^{-1} , encontra-se dentro da faixa relatada na literatura ($1600\text{--}1700\text{ cm}^{-1}$) (Muyonga e colaboradores, 2004) e é atribuída principalmente ao estiramento da ligação C=O das ligações peptídicas. Essa região espectral é considerada a mais sensível à conformação da estrutura secundária das proteínas, sendo frequentemente utilizada para avaliar a organização da tripla hélice característica do colágeno. Valores próximos de $1630\text{--}1650\text{ cm}^{-1}$ são comumente associados à estrutura helicoidal típica do colágeno, indicando que a organização molecular da proteína foi preservada durante o processo de extração (Muyonga e colaboradores, 2004; Ahmad e Benjakul, 2011).

A banda de Amida II foi identificada em 1552 cm^{-1} , valor compatível com o intervalo descrito por Ahmad e Benjakul (2011) e Duan e colaboradores (2009) ($1550\text{--}1600\text{ cm}^{-1}$). Essa banda está associada às vibrações combinadas de deformação do grupo N-H e estiramento da ligação C-N das cadeias polipeptídicas.

A região correspondente à Amida III foi observada em 1245 cm^{-1} , dentro da faixa de $1220\text{--}1320\text{ cm}^{-1}$ descrita por Ahmad e Benjakul (2011), Benjakul e colaboradores (2010) e Heu e colaboradores (2010). Essa banda está relacionada às vibrações combinadas de estiramento C-N e deformação N-H, sendo frequentemente associada à preservação da estrutura helicoidal do colágeno.

Além disso, a razão entre as intensidades das bandas de Amida III e da banda próxima de 1450 cm^{-1} é frequentemente utilizada como um indicador da integridade da estrutura de tripla hélice do colágeno. Valores próximos de 1 sugerem que a conformação helicoidal característica da proteína foi preservada após o processo de extração (Silva Junior e colaboradores, 2015), e ainda, que valores iguais ou menores do 0,5 indicam comprometimento estrutural. Neste caso, o valor desta razão é de 0,86, indicando proximidade com a unidade e, portanto, sugerindo a preservação da estrutura helicoidal do colágeno extraído.

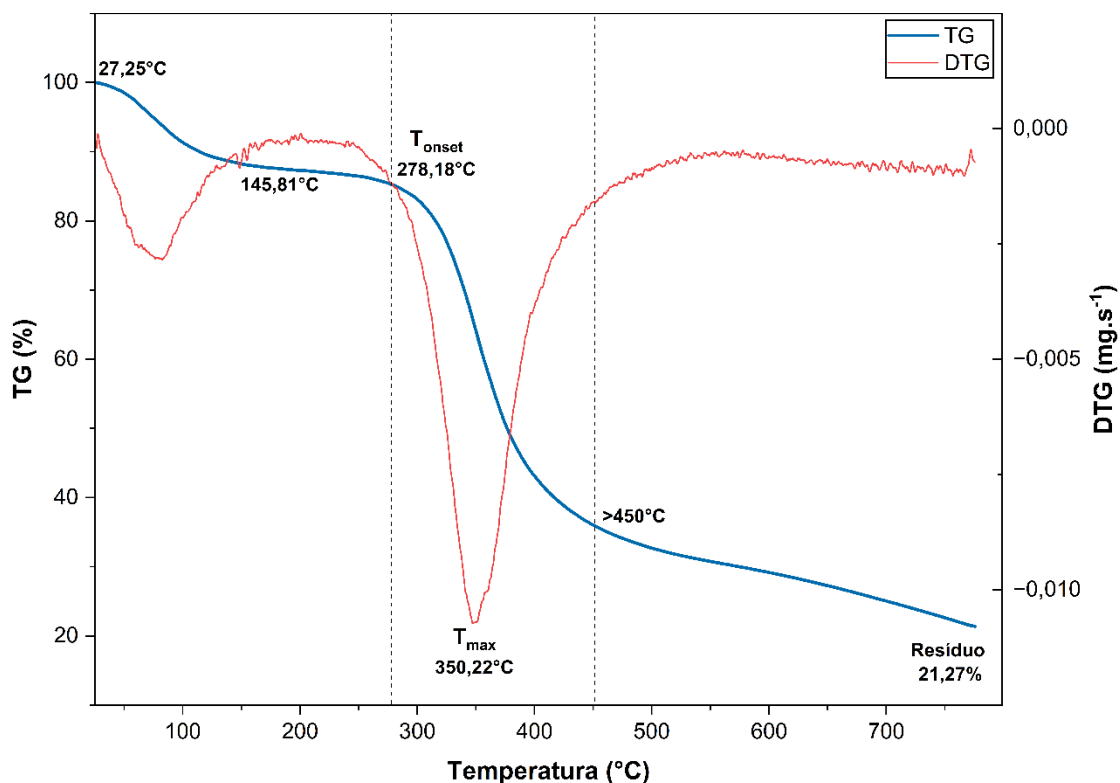
Além dessas bandas características, foi observada uma absorção em 1460 cm^{-1} atribuída à deformação angular de grupos CH_2 presentes nas cadeias laterais de aminoácidos da proteína, reforçando a integridade da matriz proteica (Barth, 2007).

De modo geral, a presença e a posição das bandas características de Amida A, Amida I, Amida II e Amida III indicam que o colágeno obtido por extração ácido-

enzimática manteve sua estrutura molecular típica. Esses resultados sugerem que o processo de extração empregado foi eficaz na obtenção de colágeno preservando sua organização estrutural, especialmente a conformação helicoidal característica dessa proteína fibrosa.

6.1.5 Análise Termogravimétrica

Figura 19 - Curvas TG e DTG do colágeno purificado e seco



Fonte: Autoria própria (2025)

Conforme a Figura 19, é possível observar três eventos de perda de massa no colágeno purificado e seco. O primeiro, ocorrendo entre 27 e 146°C, sendo atribuído à perda de massa úmida, quando a água é evaporada. A principal etapa, de degradação térmica, iniciou sob temperatura de 278,18 °C (T_{onset}) e apresentou taxa máxima de decomposição em 350,22 °C (T_{max}), conforme evidenciado pela curva DTG, sendo atribuída à ruptura das ligações peptídicas e à decomposição das cadeias polipeptídicas que constituem a estrutura helicoidal do colágeno. Valores semelhantes são relatados na literatura para colágeno isolado de diferentes fontes biológicas, nos quais a degradação principal ocorre geralmente entre 300 e 370 °C, com picos de DTG próximos de 330–360 °C (Zhang e colaboradores, 2013; Duan e colaboradores, 2009).

Ao final da análise termogravimétrica, realizada até 800 °C, o colágeno apresentou resíduo final de 21,27%, este valor é semelhante ao reportado para o colágeno extraído de bexiga natatória de carpa-capim (*Ctenopharyngodon idella*), cuja formação de resíduo final foi de aproximadamente 20 %, após aquecimento em atmosfera inerte, associado à carbonização da matriz colagênica durante a degradação térmica (Shen e colaboradores, 2022). De acordo com Gómez-Guillén e colaboradores (2011), este comportamento térmico é típico de materiais colagênicos.

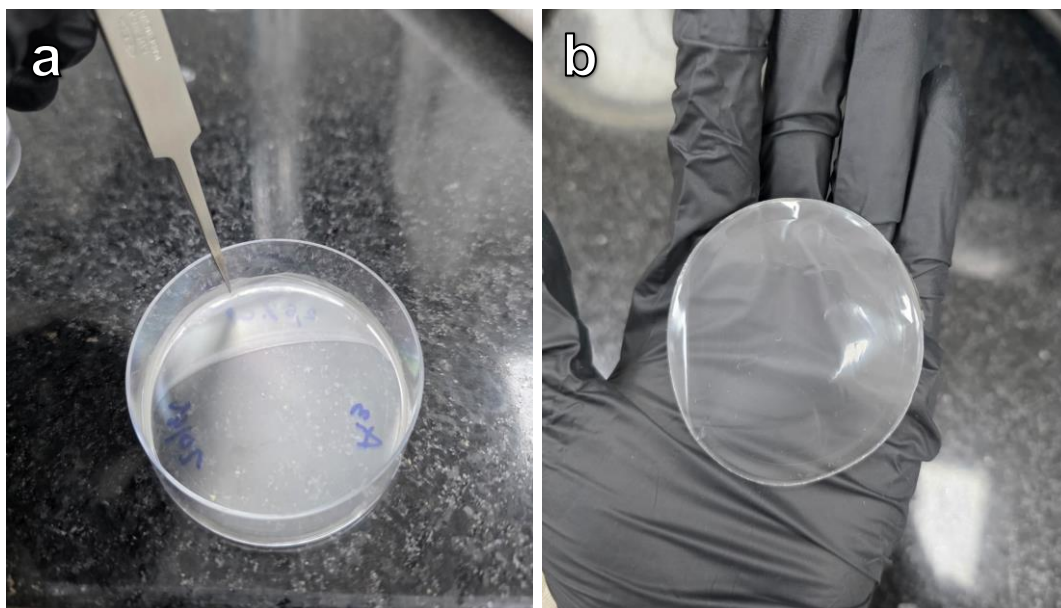
6.2 Das Características do Filme

6.2.1 Formação, Secagem e Remoção dos Filmes

Todas as formulações do tipo A, contendo concentrações de colágeno puro e seco de 1,5%, 2,0% e 2,5% (m/v) nas soluções filmogênicas, resultaram na formação de películas contínuas após o processo de secagem, independentemente do tipo de substrato utilizado para a moldagem.

Entretanto, diferenças evidentes foram observadas no comportamento de desprendimento dos filmes em função do material das placas utilizadas como molde. Os filmes vertidos em placas de poliestireno (PS) apresentaram remoção mais fácil e preservaram sua integridade estrutural, sendo obtidos na forma de películas contínuas, sem ocorrência de fissuras ou fragmentação, conforme ilustrado na Figura 20 (a e b).

Figura 20 - (a) destacamento do filme da superfície da placa e (b) filme íntegro após remoção

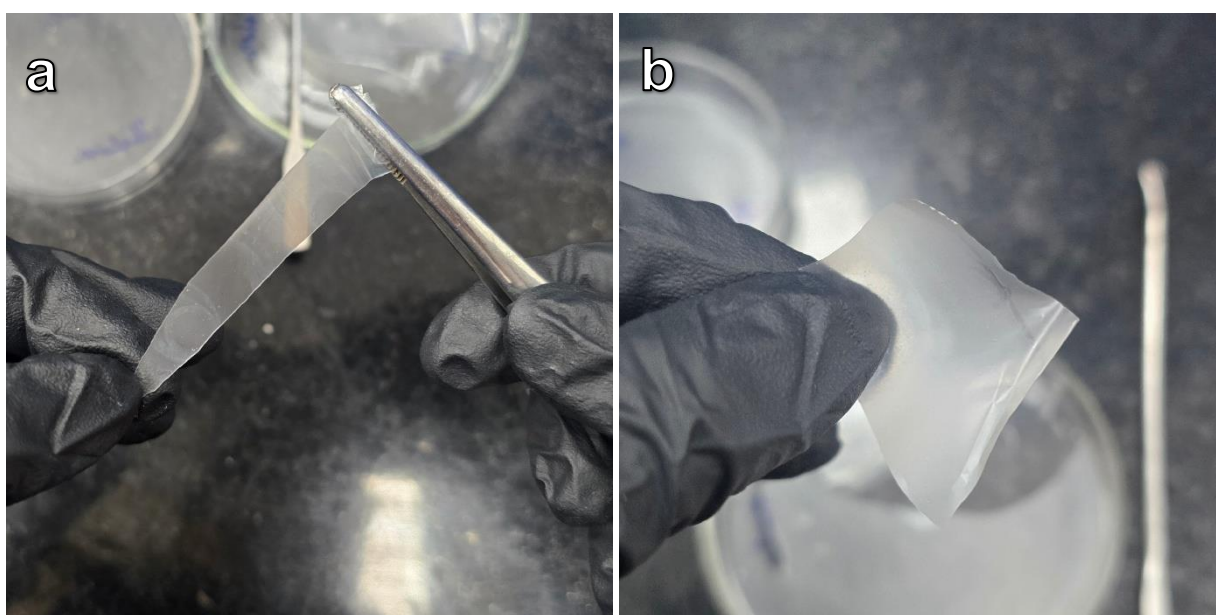


Fonte: Autoria própria (2025)

Em contraste, os filmes moldados sobre placas de vidro apresentaram elevada adesão à superfície do substrato, dificultando significativamente o processo de remoção. Durante a tentativa de destacamento, observou-se ruptura das películas, impedindo a obtenção de filmes íntegros, como evidenciado na Figura 21 (a e b).

Como consequência dessa forte interação interfacial, os filmes preparados sobre vidro somente puderam ser removidos de forma fragmentada, sem padronização de tamanho ou forma. Esse comportamento inviabilizou a utilização dessas amostras para etapas posteriores de caracterização físico-química.

Figura 21 – Fragmentação do filme de colágeno durante a remoção da placa de vidro (a e b)



Fonte: Autoria própria (2025)

A diferença observada no comportamento de desprendimento dos filmes está associada às propriedades de energia superficial e à natureza química dos substratos utilizados. O vidro apresenta elevada energia superficial e caráter polar devido à presença de grupos silanol ($-\text{Si}-\text{OH}$) em sua superfície, os quais favorecem interações intermoleculares com componentes polares da solução filmogênica durante o processo de secagem. Essas interações aumentam a adesão interfacial entre o filme formado e o molde (Sansão e colaboradores, 2021).

Por outro lado, o poliestireno apresenta menor energia superficial e caráter predominantemente apolar, resultando em menor energia de adesão entre o filme e o substrato. Essa característica reduz as interações intermoleculares na interface filme–

molde e facilita o destacamento das películas após o processo de secagem (Zeng e colaboradores, 2016).

Dessa forma, os resultados indicam que o poliestireno constitui um substrato mais adequado para a moldagem de filmes à base de colágeno, permitindo a obtenção de películas contínuas e estruturalmente íntegras, adequadas para a realização das análises físico-químicas subsequentes.

6.2.2 Espessura dos Filmes

As espessuras apresentadas na Tabela 3 correspondem às dos filmes A moldados em placas de poliestireno (PS). Não foi possível determinar a espessura dos filmes vertidos em placas de vidro, uma vez que a integridade estrutural dessas películas foi comprometida durante o processo de remoção da superfície, dificultando sua manipulação e medição.

a) Filmes A

As espessuras médias obtidas para os filmes A formados estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Espessura dos filmes do tipo A (n = 3)

Formulação	Teor de colágeno (%)	Espessura média (µm)	Desvio padrão
A1	1,5	10,1	1,41
A2	2,0	15,6	1,96
A3	2,5	19,1	4,39

Fonte: Elaboração própria (2026)

Observa-se que as espessuras médias aumentaram progressivamente com o aumento da concentração de colágeno nas formulações filmogênicas. Os valores médios obtidos foram $10,1 \pm 1,41 \mu\text{m}$, $15,6 \pm 1,96 \mu\text{m}$ e $19,1 \pm 4,39 \mu\text{m}$ para as formulações contendo 1,5%, 2,0% e 2,5% de colágeno, respectivamente.

De modo geral, esse comportamento evidencia uma relação diretamente proporcional entre a concentração de colágeno na solução filmogênica e a espessura do filme seco formado, desde que o volume da solução vertida sobre a superfície de secagem seja mantido constante (Sousa e colaboradores, 2020; Bama e colaboradores, 2010).

Segundo Bama e colaboradores (2010), esse efeito ocorre porque o aumento da concentração proteica resulta em um maior teor de sólidos após a evaporação do

solvente, favorecendo a formação de uma rede tridimensional mais densa e volumosa na matriz do filme.

Além disso, o aumento da concentração de colágeno também provoca elevação da viscosidade da solução filmogênica, o que reduz o espalhamento espontâneo do material sobre o suporte durante a etapa de moldagem (Bama e colaboradores, 2010). Consequentemente, a menor capacidade de espalhamento contribui para a formação de filmes com maior espessura macroscópica, especialmente nas formulações contendo maiores teores de colágeno.

b) Filmes B

A Tabela 4 contém as médias para os valores de espessura dos filmes B.

Tabela 4 - Espessura dos filmes do tipo B (n=3)

Formulação	Teor de colágeno (%)	Espessura média (µm)	Desvio padrão
B1	1,5	51,0	4,15
B2	2,0	58,6	9,60
B3	2,5	107,0	11,52

Fonte: Elaboração própria (2026)

Observa-se que as espessuras médias aumentaram progressivamente com o aumento da concentração de colágeno nas formulações filmogênicas. Os valores médios obtidos foram $51,0 \pm 4,15 \mu\text{m}$, $58,6 \pm 9,60 \mu\text{m}$ e $107,0 \pm 11,52 \mu\text{m}$ para os filmes B1, B2 e B3, que contém 1,5 %, 2,0% e 2,5% de colágeno, respectivamente, todas possuindo em suas formulações 30% do plastificante glicerol adicionado em relação à massa de colágeno purificado e seco.

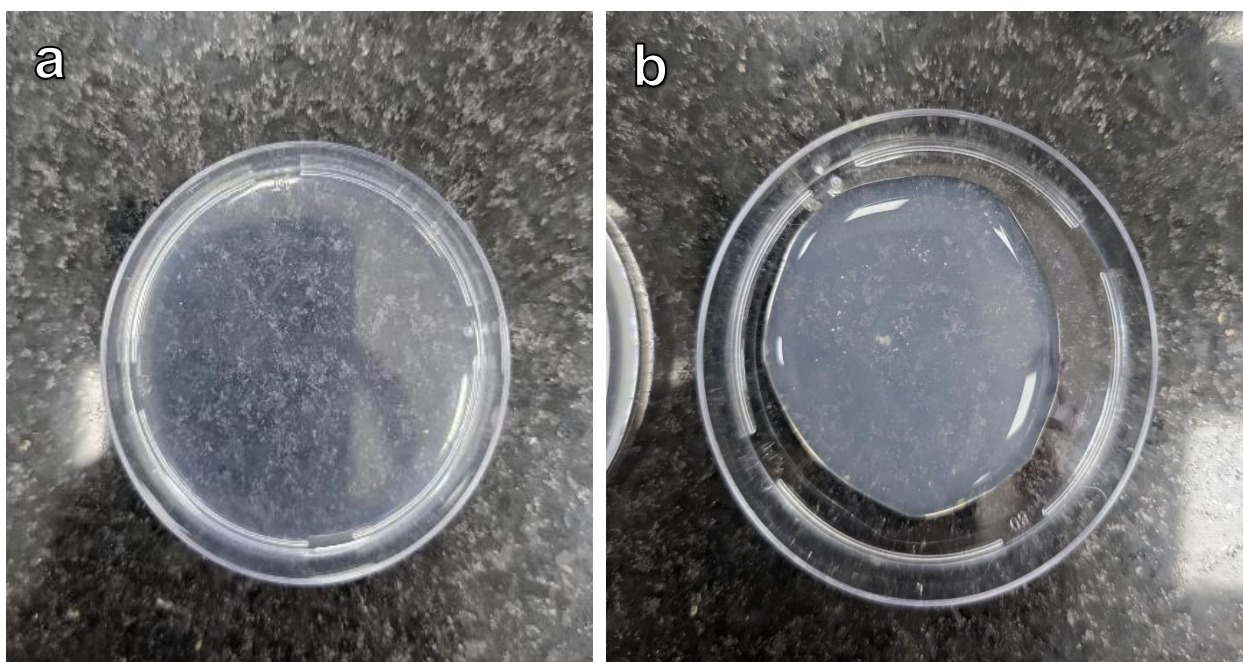
Nota-se que as medidas de espessura, apesar de crescentes, não apresentaram aumento estritamente proporcional, isto porque a formulação B2 apresentou espessura aproximadamente 14,9% superior à de B1, enquanto B3 apresentou aumento de 82,6% em relação a B2.

Esse comportamento pode estar relacionado ao aumento simultâneo da concentração de colágeno e da quantidade absoluta de glicerol, uma vez que o plastificante foi adicionado de maneira proporcional à massa da proteína. Maiores concentrações proteicas aumentam a viscosidade da solução filmogênica e reduzem seu espalhamento durante a moldagem, conforme observado por Sancakli e colaboradores (2021) em filmes à base de gelatina.

O glicerol também modifica as interações entre as cadeias proteicas e a organização da matriz filmogênica. Rivero e colaboradores (2010) verificaram que muitas propriedades de filmes de gelatina apresentam forte dependência da concentração desse plastificante.

Na Figura 22 (a e b) é possível observar o vertimento das soluções B1 e B3, respectivamente, nas placas de PS.

Figura 22 – (a) Soluções B1 e (b) B3 vertidas, respectivamente



Fonte: Autoria própria (2026)

A solução B3, que apresentava maior teor de colágeno e, consequentemente, maior quantidade de glicerol, demonstrou espalhamento mais lento e menos uniforme, concentrando-se inicialmente na região de deposição. Por esse motivo, foi necessário distribuir a solução sobre a superfície da placa com o auxílio de uma espátula.

Assim, a maior espessura de B3 pode estar associada à maior quantidade de matéria seca depositada durante a moldagem, resultante do aumento simultâneo das quantidades de colágeno e glicerol, bem como à maior viscosidade da solução filmogênica, que influencia a formação e as propriedades físicas da matriz (Qiang e colaboradores, 2018; Sancakli e colaboradores, 2021).

Ao comparar as formulações dos diferentes tipos, mas com o mesmo teor de colágeno, observa-se que os filmes B apresentaram espessuras superiores às dos filmes A em todas as concentrações avaliadas. A espessura aumentou de 10,1 μm

para 51,0 μm quando consideramos A1 e B1, de 15,6 μm para 58,6 μm quando consideramos A2 e B2, e de 19,1 μm para 107,0 μm quando consideramos A3 e B3. Esses resultados sugerem que, além da concentração de colágeno, a presença do plastificante exerceu influência sobre a espessura final das películas.

Esse comportamento está de acordo com Said e colaboradores (2016), que, ao avaliarem filmes produzidos com extrato de colágeno e diferentes concentrações de glicerol, observaram aumento evidente da espessura com a elevação da quantidade do plastificante. De maneira semelhante, Putri e colaboradores (2025) verificaram que a espessura de filmes de gelatina aumentou com a concentração de glicerol, atribuindo esse comportamento ao aumento do volume livre da matriz e à retenção de umidade promovida pelo caráter higroscópico do plastificante. Dessa forma, as maiores espessuras apresentadas pelos filmes B podem estar relacionadas à incorporação do glicerol, que aumentou a quantidade de componentes não voláteis e modificou a organização da matriz proteica.

6.2.3 Opacidade dos Filmes

a) Filmes A

A opacidade dos filmes, que foi determinada através da Equação 2, considerando-se a absorvância medida sob 600 nm (A_{600}) e a espessura dos filmes A, em milímetros, está apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 - Opacidade dos filmes A

Amostra	Espessura (mm)	Absorvância A_{600}	Opacidade (u.a. mm^{-1})
A1	0,0101	0,370	36,63
A2	0,0156	0,281	18,01
A3	0,0191	0,565	29,58

Fonte: Elaboração própria (2026)

Os filmes A1, A2 e A3 apresentaram valores de opacidade de 36,63, 18,01 e 29,58 u.a. mm^{-1} , respectivamente. Dessa forma, considerando a opacidade em ordem crescente, observa-se a seguinte sequência: $A2 < A3 < A1$.

Conforme discutido anteriormente para a espessura dos filmes, o aumento da concentração de colágeno na solução filmogênica promoveu o aumento da espessura das películas obtidas. No entanto, ao se normalizar a absorvância pela espessura, não foi observada uma relação linear entre a concentração de colágeno e o parâmetro óptico de opacidade.

Esse comportamento indica que a opacidade não depende exclusivamente da quantidade de sólidos presentes na matriz ou da espessura geométrica do material, mas também da organização estrutural da rede proteica formada durante o processo de secagem. Durante a formação do filme, a reorganização das cadeias polipeptídicas do colágeno pode gerar variações na densidade da matriz, na distribuição de poros microscópicos e no grau de agregação proteica, fatores que influenciam diretamente os fenômenos de espalhamento e absorção da luz incidente.

Nesse contexto, o menor valor de opacidade observado para a formulação intermediária (A2 – 2,0% de colágeno) sugere que essa condição pode ter favorecido a formação de uma matriz proteica mais homogênea e compacta, resultando em menor dispersão da radiação luminosa. Por outro lado, as formulações com menor e maior concentração de colágeno apresentaram valores mais elevados de opacidade, possivelmente associados a heterogeneidades estruturais na rede do polímero, como microdomínios proteicos ou irregularidades na organização das cadeias.

Resultados semelhantes foram relatados por Bertan e colaboradores (2005) e Zhang e colaboradores (2021), que demonstraram que as propriedades ópticas de filmes proteicos são fortemente influenciadas pela microestrutura do material, pela interação intermolecular entre cadeias polipeptídicas e pelas condições de secagem, fatores que podem modificar o grau de transparência ou opacidade das películas obtidas.

b) Filmes B

As medidas de opacidade dos filmes B, bem como os valores de absorbância sob 600 nm e de espessura, em milímetros, considerados para sua determinação, conforme a Equação 2, estão dispostos na Tabela 6.

Tabela 6 – Opacidade dos Filmes B

Amostra	Espessura (mm)	Absorbância A_{600}	Opacidade (u.a.mm⁻¹)
B1	0,051	0,154	3,04
B2	0,059	0,216	3,69
B3	0,107	0,174	1,63

Fonte: Elaboração própria, 2026

Os filmes B1, B2 e B3 apresentaram valores de opacidade de 3,04, 3,69 e 1,63 u.a. mm⁻¹, respectivamente. Assim, considerando os valores em ordem crescente, obteve-se a seguinte sequência: B3 < B1 < B2. A formulação B2 apresentou a maior

opacidade, enquanto B3, apesar de possuir maior concentração de colágeno e maior espessura, apresentou o menor valor para esse parâmetro óptico.

Assim como observado para os filmes A, o aumento da concentração de colágeno não promoveu uma variação linear da opacidade dos filmes B. A formulação intermediária B2 apresentou o maior valor, enquanto B3, mesmo contendo a maior concentração de colágeno, apresentou a menor opacidade. Esse resultado demonstra que a quantidade de proteína presente na solução filmogênica não foi o único fator responsável pela capacidade dos filmes de atenuar a passagem da luz visível.

O menor valor obtido para B3 também pode ser compreendido considerando-se que a opacidade foi determinada pela razão entre a absorbância e a espessura. Embora esse filme tenha apresentado a maior espessura, de 0,107 mm, sua absorbância em 600 nm foi de apenas 0,174, não aumentando proporcionalmente à espessura do material. Consequentemente, B3 apresentou menor atenuação da luz por unidade de espessura. Em contrapartida, B2 combinou a maior absorbância, de 0,216, com uma espessura intermediária de 0,059 mm, resultando no maior valor de opacidade entre as formulações avaliadas.

Esse comportamento pode estar relacionado às diferenças na organização das cadeias proteicas durante a secagem e à distribuição do glicerol na matriz. As propriedades ópticas de filmes proteicos são influenciadas pela composição, densidade, agregação e alinhamento das moléculas, uma vez que essas características modificam o índice de refração e a intensidade de espalhamento da luz no interior do material (Said; Sarbon, 2022). Dessa maneira, o menor valor observado para B3 pode sugerir a formação de uma matriz relativamente mais uniforme, com menor quantidade de descontinuidades ópticas capazes de dispersar a radiação incidente. Entretanto, essa interpretação precisaria ser confirmada por análises morfológicas da superfície e da seção transversal dos filmes.

Além disso, o glicerol atua reduzindo as interações entre as cadeias proteicas e aumentando sua mobilidade e o volume livre da matriz, podendo modificar o rearranjo molecular durante a formação do filme (Liu e colaboradores, 2021). Como a concentração de glicerol foi estabelecida em função da massa de colágeno, o aumento da concentração proteica também elevou sua quantidade absoluta na formulação B3, o que pode ter favorecido maior mobilidade das cadeias e uma estrutura com menor espalhamento da luz. Nilsuwan e colaboradores (2016) também

verificaram aumento da transmissão de luz com a elevação do teor de glicerol em filmes de gelatina de peixe, indicando que a ação plastificante pode favorecer a transparência do material.

Portanto, a maior opacidade apresentada por B2 pode estar associada a uma organização menos uniforme da rede proteica ou à presença de regiões com diferentes densidades e índices de refração, responsáveis por maior dispersão da luz. Em conjunto, os resultados confirmam que a opacidade dos filmes B depende da interação entre espessura, absorbância, concentração de colágeno, presença do plastificante e organização microestrutural da matriz, não sendo determinada isoladamente pela quantidade de sólidos da formulação.

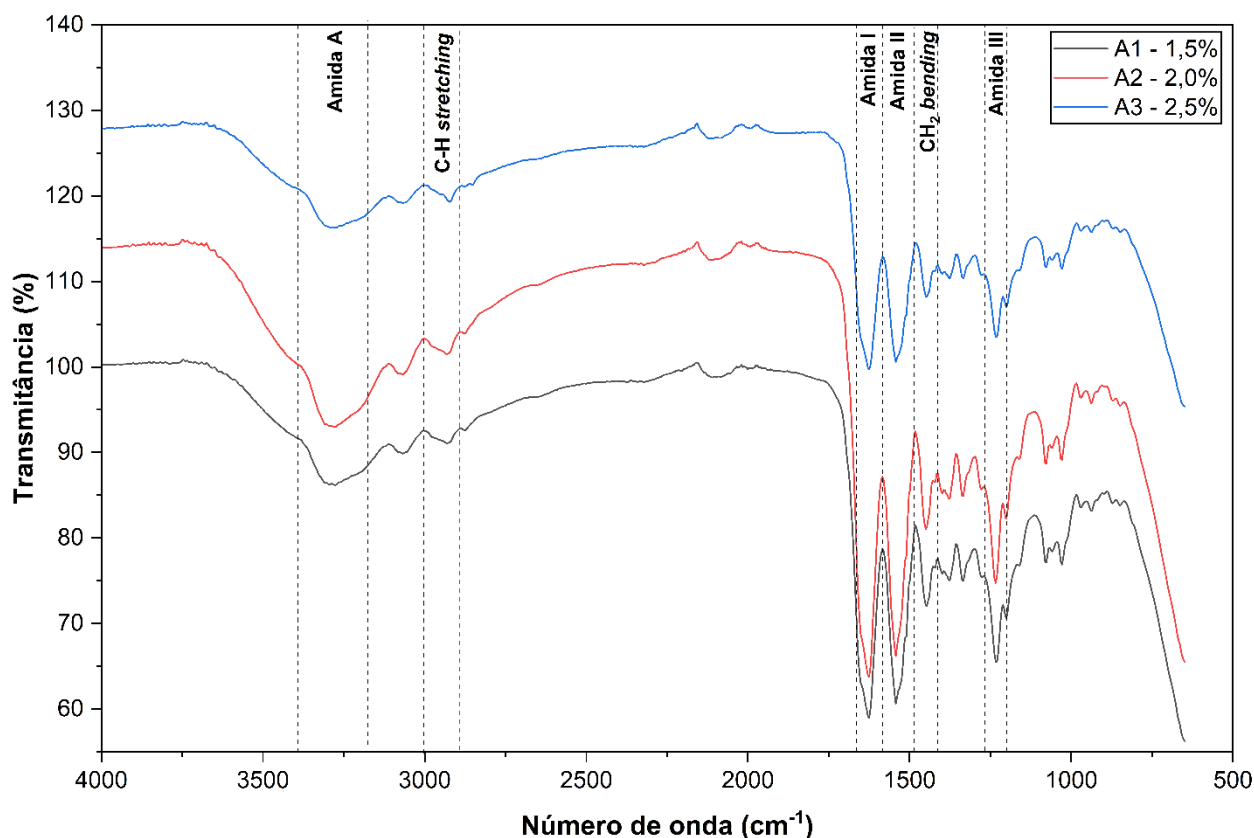
6.2.4 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier por Reflectância Total Atenuada

a) Filmes A

A espectroscopia no infravermelho é amplamente empregada à caracterização de proteínas, pois permite detectar as vibrações associadas às ligações peptídicas e, conseqüentemente, fornece informações sobre a organização estrutural do material (Barth, 2007; Kong e Yu, 2007).

Os espectros de FTIR-ATR foram obtidos com o objetivo de identificar os grupos funcionais presentes nos filmes de colágeno e avaliar possíveis alterações estruturais decorrentes das diferentes concentrações utilizadas nas formulações. O espectro correspondente aos Filmes A1, A2 e A3, contendo 1,5, 2,0 e 2,5% de colágeno purificado seco, respectivamente, corresponde à Figura 23.

Figura 23 - Espectro FTIR-ATR filmes de colágeno A1, A2 e A3



Fonte: Elaboração própria (2026)

Os três filmes apresentam perfis espectrais semelhantes, com a presença das bandas características do colágeno, já descritas e vistas na seção 6.1.4, onde se avaliou o colágeno purificado e seco, pela mesma técnica.

Nos espectros de FTIR-ATR dos filmes A1, A2 e A3 observou-se uma banda larga na região de 3200 – 3400 cm^{-1} , atribuída à Amida A, associada ao estiramento das ligações N–H das cadeias polipeptídicas, banda característica de materiais colagênicos, estando relacionada com a presença de ligações de hidrogênio entre as cadeias da proteína, indicando a manutenção das interações intermoleculares típicas do colágeno (Muyonga e colaboradores, 2004).

A banda correspondente à Amida I foi identificada na região de 1600–1700 cm^{-1} , faixa associada ao estiramento da ligação C=O das ligações peptídicas. Sua presença nos três filmes indica a preservação da organização molecular característica do colágeno (Muyonga e colaboradores, 2004; Ahmad e Benjakul, 2011).

A Amida II foi observada na região de 1500 – 1600 cm^{-1} , sendo atribuída às vibrações combinadas de deformação do grupo N–H e estiramento da ligação C–N

das cadeias polipeptídicas. A ocorrência dessa banda em todos os filmes confirma a presença das ligações peptídicas características da estrutura proteica do colágeno (Ahmad e Benjakul, 2011; Duan e colaboradores, 2009).

Na região próxima de 1450 cm^{-1} , foi identificada uma banda atribuída à deformação angular dos grupos CH_2 , associada às cadeias laterais dos aminoácidos da proteína. Esta é frequentemente identificada em materiais colagênicos, como as outras vistas, reforça a integridade da matriz proteica presente nos filmes (Plepis e colaboradores, 1996).

A banda correspondente à Amida III foi observada na região de $1220\text{--}1320\text{ cm}^{-1}$, sendo relacionada às vibrações combinadas de estiramento C–N e deformação N–H. Essa banda é comumente utilizada como indicativo da preservação da estrutura helicoidal do colágeno (Ahmad e Benjakul, 2011; Benjakul e colaboradores, 2010).

A razão entre as intensidades da banda de Amida III e da banda localizada próxima de $1450\text{--}1460\text{ cm}^{-1}$ é utilizada como parâmetro complementar para avaliar a integridade estrutural do colágeno após a formação dos filmes. Valores próximos de 1 indicam a manutenção da conformação de tripla hélice característica da proteína (Silva Junior e colaboradores, 2015). Para os filmes A1, A2 e A3, foi obtida razão 0,85. A proximidade desses valores com a unidade, juntamente com a manutenção das bandas características de Amida I, II e III, sugere que as diferentes concentrações de colágeno utilizadas nas formulações não provocaram alterações expressivas na estrutura helicoidal da proteína.

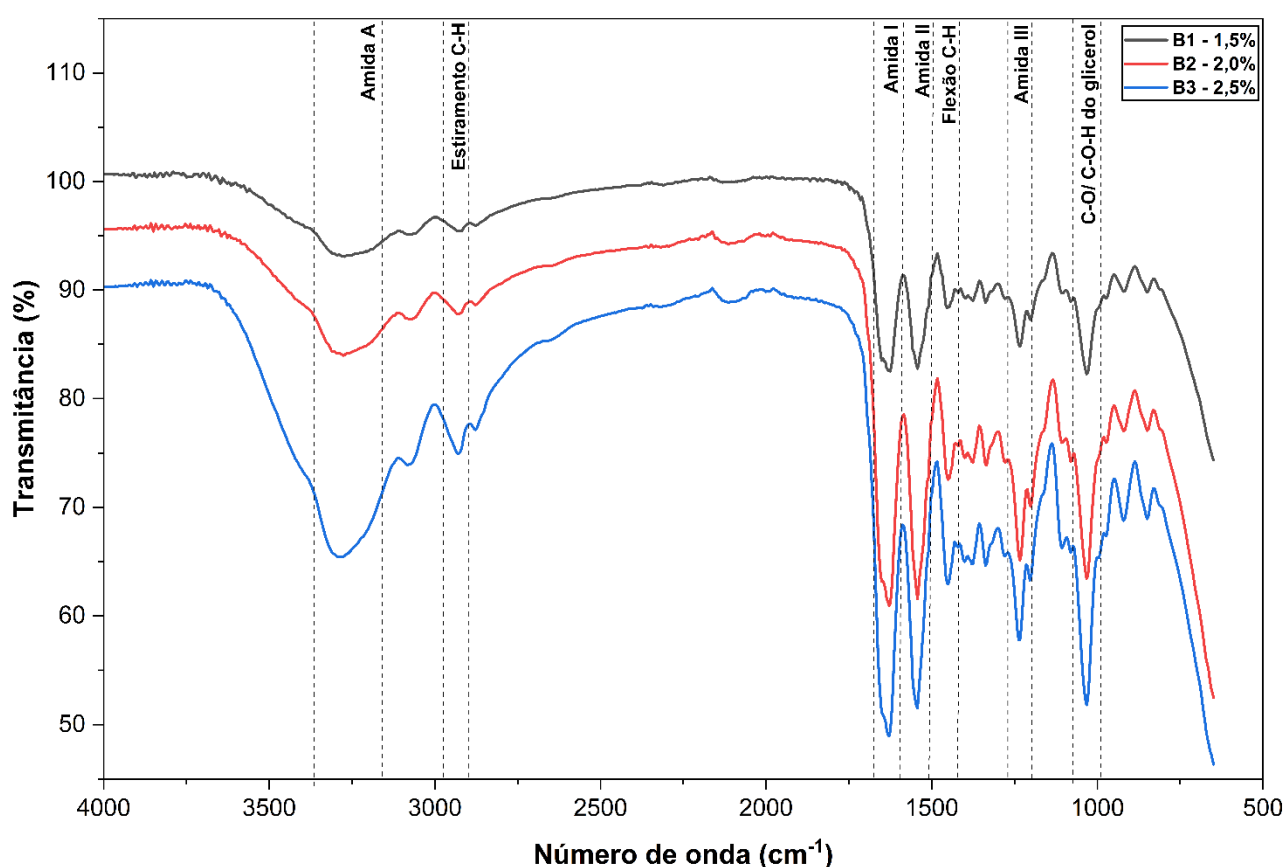
De modo geral, os espectros dos filmes A1, A2 e A3 apresentaram as bandas características do colágeno nas mesmas regiões espectrais, sem deslocamentos relevantes entre as formulações. Esse comportamento indica que a estrutura molecular do colágeno foi preservada após a formação dos filmes, evidenciando que a variação na concentração de colágeno não promoveu alterações estruturais na proteína.

Como visto, os resultados estruturais obtidos são observados também na avaliação do colágeno purificado e seco, reforçando a integridade estrutural da proteína obtida tanto após purificação, quanto nos filmes A.

b) Filmes B

Já no que se refere à avaliação espectroscópica dos filmes tipo B, a Figura 24 reúne a leitura dos produtos das três formulações deste tipo. Os três filmes apresentam perfis espectrais semelhantes entre si, com a presença das bandas características do colágeno, já descritas e vistas na seção 6.1.4, onde se avaliou o colágeno purificado e seco, pela mesma técnica, além de sinais associados à presença do glicerol na matriz filmogênica.

Figura 24 – Espectro FTIR-ATR filmes de colágeno B1, B2 e B3



Fonte: Autoria própria (2026)

Os três filmes apresentam perfis espectrais semelhantes, com a presença das bandas características do colágeno, já descritas e vistas na seção 6.1.4, onde se avaliou o colágeno purificado e seco pela mesma técnica, além de uma banda mais evidente relacionada à presença do glicerol nas formulações.

Nos espectros de FTIR-ATR dos filmes B1, B2 e B3, observou-se uma banda larga na região de 3200–3400 cm^{-1} atribuída à Amida A e associada ao estiramento das ligações N–H das cadeias polipeptídicas. Nos filmes tipo B, essa região também recebe contribuição do estiramento dos grupos O–H presentes no glicerol. A

sobreposição dessas vibrações é compatível com a ocorrência de ligações de hidrogênio entre os grupos hidroxila do plastificante e os grupos polares das cadeias de colágeno (Wu e colaboradores, 2020; Tang e colaboradores, 2023).

Na região de 2900–3000 cm^{-1} , foi identificada uma banda correspondente ao estiramento das ligações C–H, principalmente dos grupos CH_2 presentes nas cadeias proteicas e na estrutura do glicerol. Bandas semelhantes, localizadas próximas de 2930–2940 cm^{-1} , são frequentemente observadas na caracterização de colágeno e de filmes colagênicos plastificados (Pinedo e colaboradores, 2022; Tang e colaboradores, 2023).

A banda correspondente à Amida I foi identificada na região de 1600–1700 cm^{-1} , sendo atribuída principalmente ao estiramento da ligação C=O das ligações peptídicas. A Amida II, observada entre 1500–1600 cm^{-1} , está relacionada às vibrações de deformação do grupo N–H e ao estiramento da ligação C–N. A presença dessas bandas nos três filmes confirma a manutenção das ligações peptídicas características da estrutura proteica do colágeno (David e colaboradores, 2022; Pinedo e colaboradores, 2022).

Na região próxima de 1450 cm^{-1} , foi observada uma banda atribuída à deformação dos grupos CH_2 presentes nas cadeias laterais dos aminoácidos. Já a Amida III, identificada entre 1220 e 1320 cm^{-1} , está associada às vibrações combinadas de estiramento C–N, deformação N–H e movimentação dos grupos CH_2 da estrutura do colágeno. A permanência dessa banda nas três formulações sugere que não ocorreu uma alteração acentuada da organização estrutural da proteína durante a formação dos filmes. Entretanto, a avaliação mais específica da preservação da tripla hélice pode ser realizada pela razão entre as absorbâncias próximas de 1240 e 1450 cm^{-1} (Liu e colaboradores, 2023).

A razão entre as intensidades das bandas de Amida III e da banda próxima de 1450–1460 cm^{-1} foi de 0,9 para todos os filmes B. Os valores superiores a 0,5 e próximos da unidade indicam que a estrutura helicoidal do colágeno permaneceu preservada mesmo após a adição do glicerol às formulações. Dessa forma, embora o plastificante interaja com os grupos polares das cadeias proteicas, principalmente por meio de ligações de hidrogênio, sua incorporação não promoveu comprometimento estrutural significativo da proteína, mantendo-se a organização característica da tripla hélice nos três filmes (Silva Junior e colaboradores, 2015).

Além das bandas características do colágeno, os filmes B apresentaram uma absorção mais evidente na região de $1000\text{--}1100\text{ cm}^{-1}$, atribuída às vibrações das ligações C–O e C–O–H do glicerol. Em filmes proteicos plastificados, a presença do glicerol promove o aparecimento de uma banda próxima de 1045 cm^{-1} , relacionada à interação entre o plastificante e a matriz polimérica. Dessa forma, a presença dessa banda nos filmes B1, B2 e B3 confirma a incorporação do glicerol às formulações (Martinek e colaboradores, 2025).

De modo geral, os espectros dos filmes B1, B2 e B3 apresentaram as bandas características do colágeno nas mesmas regiões espectrais, sem diferenças expressivas entre as formulações. A manutenção das bandas de Amida A, I, II e III indica que a formação dos filmes e a adição do glicerol não provocaram a perda das ligações características da matriz proteica. Por outro lado, a banda observada entre 1000 e 1100 cm^{-1} evidencia a presença do plastificante e sua interação com as cadeias de colágeno. Essas interações ocorrem principalmente por ligações de hidrogênio e podem aumentar o afastamento e a mobilidade entre as cadeias proteicas, promovendo o efeito plastificante do glicerol sem indicar uma desestruturação acentuada da proteína (Wu e colaboradores, 2020).

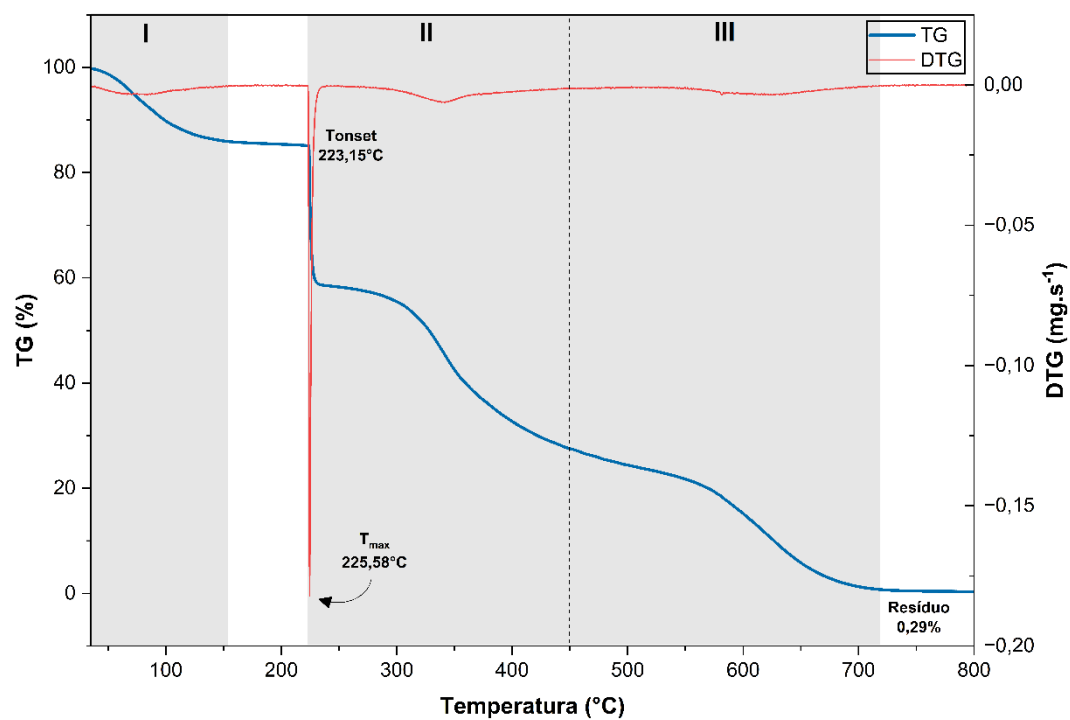
6.2.5 Análise Termogravimétrica

a) Filmes A

A estabilidade térmica dos filmes foi investigada por análise termogravimétrica (TG) e sua derivada (DTG), com o objetivo de avaliar o comportamento de degradação térmica das formulações contendo diferentes concentrações de colágeno, ainda na ausência de plastificante, bem como verificar possíveis alterações na organização estrutural da matriz proteica decorrentes do aumento da fração polimérica.

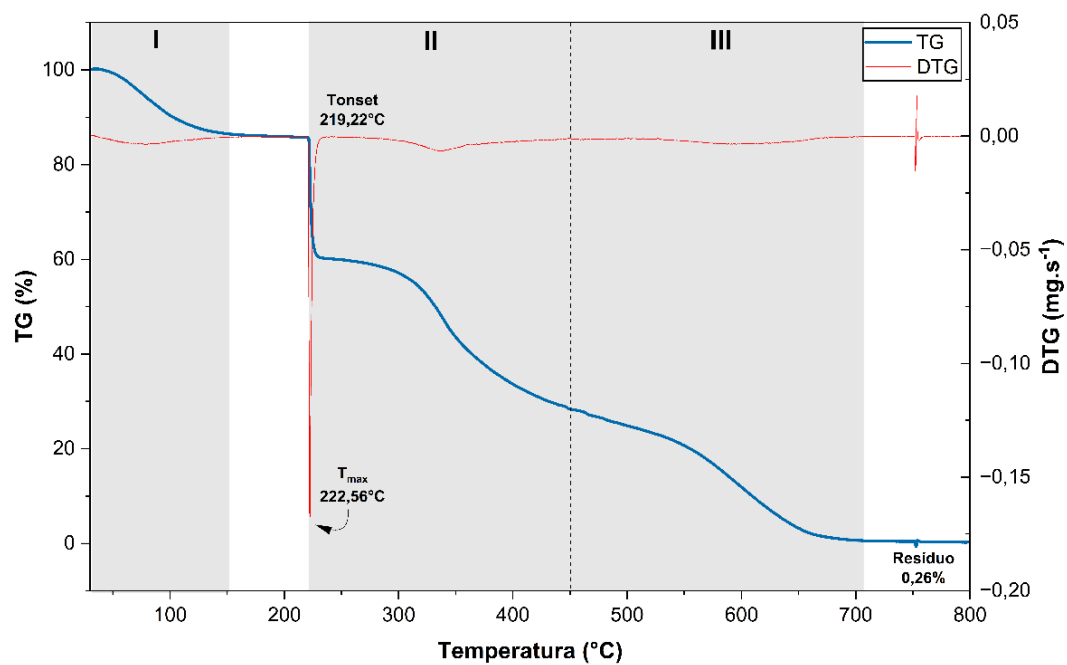
As curvas TG e DTG obtidas para os filmes A1 (1,5% de colágeno), A2 (2,0%) e A3 (2,5%) estão apresentadas nas Figuras 25, 26 e 27, respectivamente.

Figura 25 - Curvas de TG e DTG do filme A1 contendo 1,5% (m/V) de colágeno puro seco



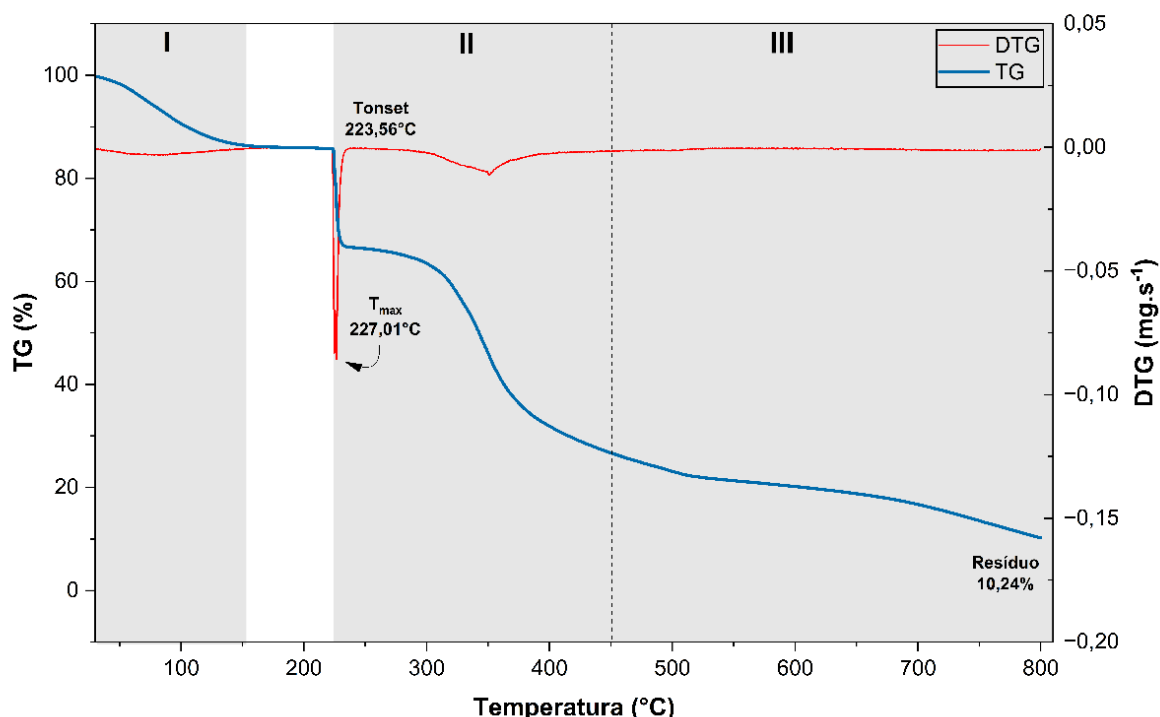
Fonte: Autoria própria (2026)

Figura 26 - Curvas de TG e DTG do filme A2 contendo 2,0% (m/V) de colágeno puro seco



Fonte: Autoria própria (2026)

Figura 27 - Curvas de TG e DTG do filme A3 contendo 2,5% (m/V) de colágeno puro seco



Fonte: Autoria própria (2026)

A Tabela 7 contém as temperaturas que sinalizam os eventos de desidratação, temperatura inicial de degradação (T_{onset}), temperatura de máxima taxa de degradação (T_{max}) e resíduo final para os filmes A.

Tabela 7 - Parâmetros térmicos dos filmes A

Amostra	Desidratação (°C)	T_{onset} (°C)	T_{max} (°C)	Resíduo (%)
A1	30 - 150	223,15	225,58	0,29
A2	30 - 150	219,22	222,56	0,26
A3	30 - 160	223,56	227,01	10,24

Fonte: Elaboração própria (2026)

De modo geral, as curvas TG/DTG das formulações A1, A2 e A3 apresentaram perfis térmicos semelhantes, evidenciando três eventos principais de perda de massa. A primeira etapa ocorreu aproximadamente entre 30 e 160 °C, sendo atribuída à evaporação de água fisicamente adsorvida e água estrutural associada às cadeias polipeptídicas. Em materiais colagênicos, a elevada afinidade por água está relacionada à presença de numerosos grupos polares, como amidas, hidroxilas e grupos carboxílicos, capazes de estabelecer extensas redes de ligações de hidrogênio com moléculas de água.

A segunda etapa, correspondente à degradação térmica principal da matriz proteica, ocorreu em torno de 219–224 °C, com valores de T_{onset} de 223,15 °C (A1),

219,22 °C (A2) e 223,56 °C (A3), e $T_{\max}$ de 225,58 °C, 222,56 °C e 227,01 °C, respectivamente. Essa etapa está associada principalmente à ruptura das ligações peptídicas das cadeias polipeptídicas e à desorganização da estrutura helicoidal tripla característica do colágeno, resultando na fragmentação progressiva da matriz proteica.

Ao final de cada uma das análises, realizadas até 800 °C, as amostras A1, A2 e A3, apresentaram resíduos finais de 0,29%, 0,26% e 10,24% respectivamente. A diferença observada na fração de resíduo após a degradação térmica pode estar associada à formação de material carbonizado decorrente da decomposição da matriz proteica do colágeno. Durante o aquecimento em atmosfera inerte, as cadeias polipeptídicas sofrem ruptura e reorganização estrutural, podendo originar estruturas carbonáceas mais estáveis termicamente, que permanecem como resíduo após a degradação da matéria orgânica volátil. Dessa forma, valores mais elevados de resíduo indicam maior tendência à carbonização ou presença de frações estruturalmente mais resistentes à degradação térmica, enquanto resíduos muito baixos refletem decomposição quase completa do material orgânico (Shoulders e Raines, 2009; Silver e Landis, 2011).

O perfil termogravimétrico observado neste estudo é consistente com o comportamento térmico reportado para materiais colagênicos, os quais tipicamente apresentam uma etapa inicial de desidratação abaixo de 150–180 °C, seguida por uma etapa de degradação térmica associada à ruptura das ligações peptídicas e à desorganização da estrutura helicoidal tripla (Muyonga, Mole e Duodu, 2004; Silva e colaboradores, 2014). Valores de T_{onset} entre 200 e 250 °C são frequentemente relatados para colágeno de diferentes origens biológicas, podendo variar em função da fonte do material, grau de organização molecular, teor de sólidos e presença de plastificantes ou outros aditivos (Ahmed e colaboradores, 2019).

Os resultados obtidos também apresentam coerência com a caracterização estrutural realizada por FTIR-ATR, na qual foram identificadas as bandas características de Amida A, Amida I, Amida II e Amida III, associadas às vibrações das ligações peptídicas e à organização estrutural típica do colágeno. Em particular, a banda de Amida III, observada na região de 1200–1300 cm^{-1} , está relacionada às vibrações combinadas de estiramento C–N e deformação N–H, sendo considerada

um importante indicador da estrutura helicoidal tripla do colágeno (Muyonga e colaboradores, 2004; Li e colaboradores, 2023).

A preservação dessa organização supramolecular contribui diretamente para a estabilidade térmica da proteína, uma vez que a estrutura de tripla hélice é estabilizada por extensas redes de ligações de hidrogênio intermoleculares e intramoleculares entre as cadeias polipeptídicas. Consequentemente, a ruptura dessas interações exige maior aporte energético, refletindo-se nas temperaturas de degradação observadas nas curvas TG/DTG.

De modo geral, os filmes A apresentaram comportamento térmico semelhante, com pequenas variações nas temperaturas de início e máxima taxa de degradação. Essas diferenças não demonstraram tendência progressiva em função da concentração de colágeno, sugerindo que as formulações mantiveram perfil térmico relativamente próximo nas condições avaliadas.

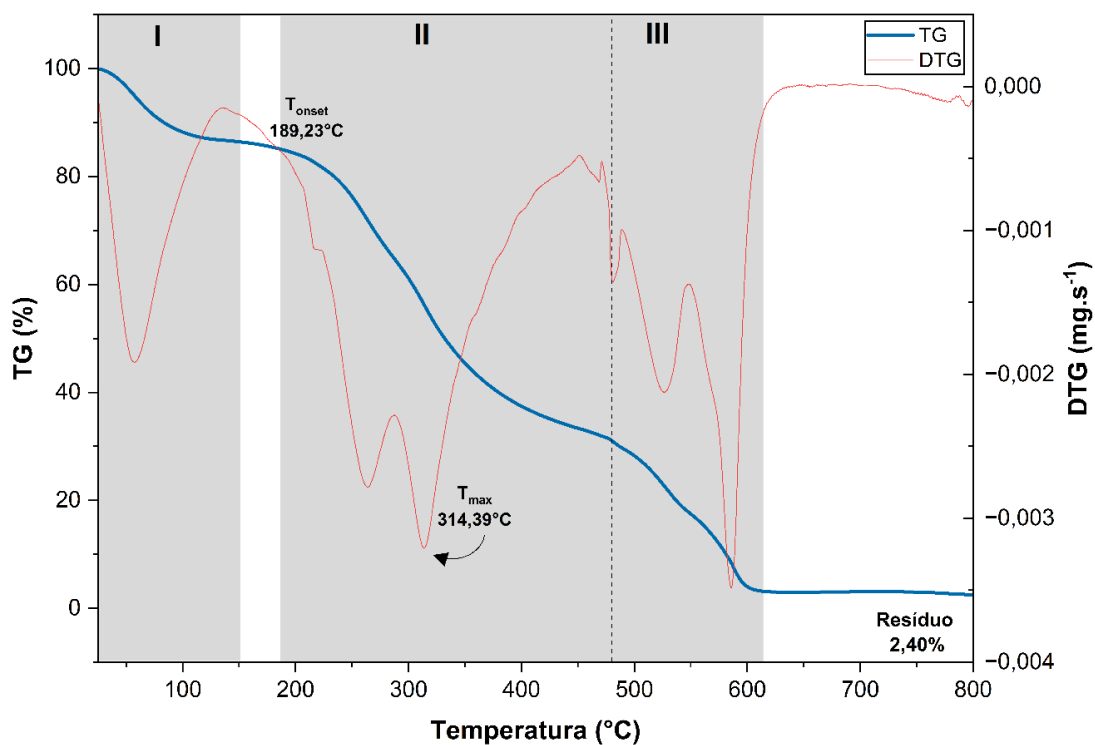
Assim, a combinação das análises FTIR-ATR e TG/DTG evidencia que o colágeno extraído manteve sua integridade molecular e organização estrutural característica, refletindo-se tanto na assinatura espectroscópica das bandas de amida quanto no comportamento térmico típico de materiais colagênicos.

b) Filmes B

A estabilidade térmica dos filmes foi investigada por análise termogravimétrica (TG) e sua derivada (DTG), com o objetivo de avaliar o comportamento de degradação térmica das formulações contendo diferentes concentrações de colágeno, com a presença do plastificante glicerol, verificando também possíveis alterações na organização estrutural da matriz proteica decorrentes do aumento da fração polimérica.

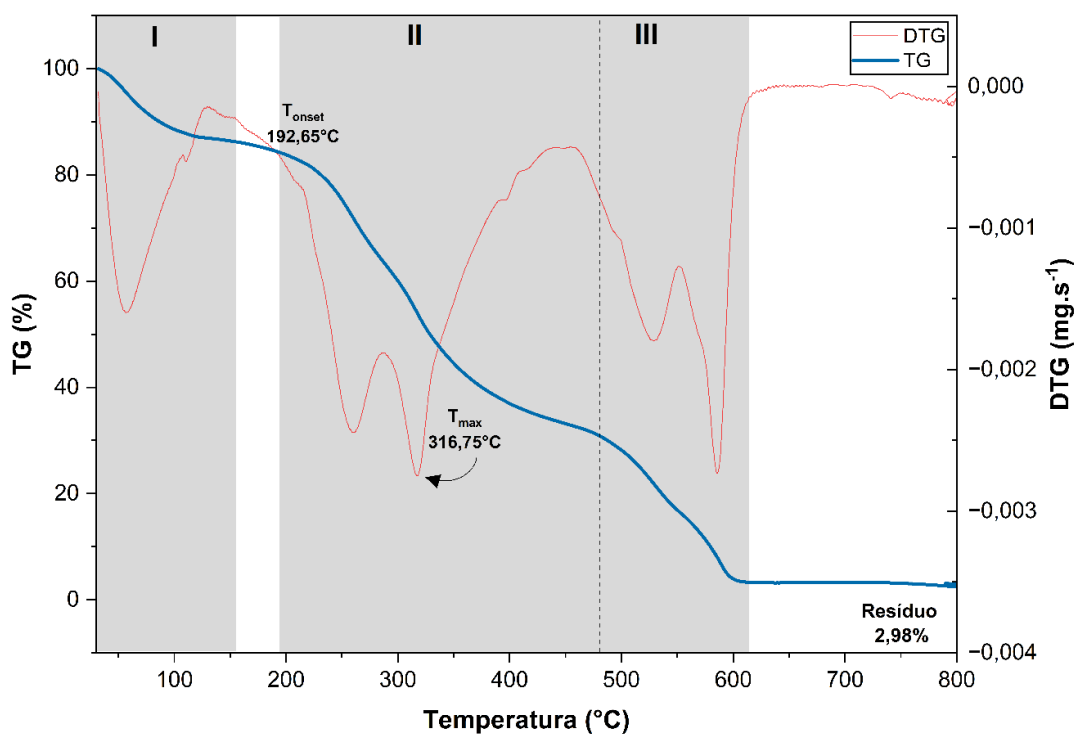
As curvas TG e DTG obtidas para os filmes B1 (1,5% de colágeno com adição de glicerol em 30%), B2 (2,0% com adição de glicerol em 30%) e B3 (2,5% com adição de glicerol em 30%) estão apresentadas nas Figuras 28, 29 e 30, respectivamente.

Figura 28 – Curvas TG e DTG do filme B1 contendo 1,5% (m/V) de colágeno puro seco e 30% (m/m) de glicerol



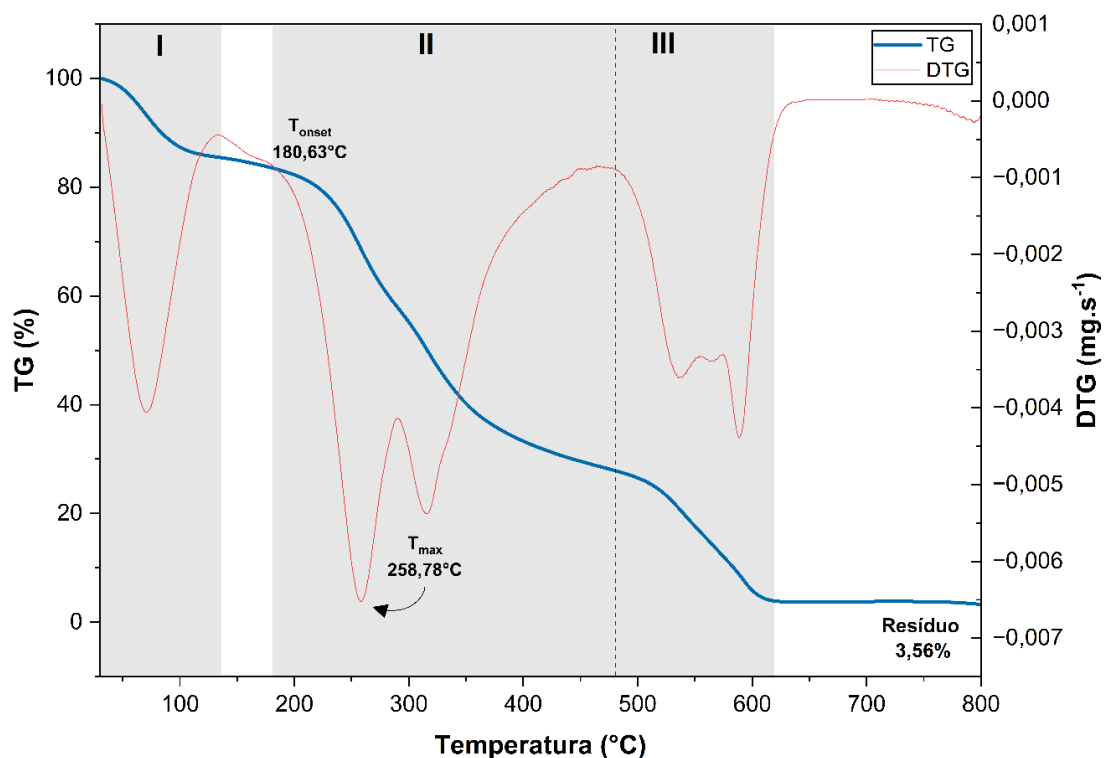
Fonte: Autoria própria (2026)

Figura 29 - Curvas TG e DTG do filme B2 contendo 2,0% (m/V) de colágeno puro seco e 30% (m/m) de glicerol



Fonte: Autoria própria (2026)

Figura 30 - Curvas TG e DTG do filme B3 contendo 2,5% (m/V) de colágeno puro seco e 30% (m/m) de glicerol



Fonte: Autoria própria (2026)

A Tabela 8 reúne as temperaturas que sinalizam os eventos de desidratação, temperatura inicial de degradação (T_{onset}), temperatura de máxima taxa de degradação (T_{max}) e resíduo final para os filmes B.

Tabela 8 – Parâmetros térmicos dos filmes B

Amostra	Desidratação (°C)	T_{onset} (°C)	T_{max} (°C)	Resíduo (%)
B1	30-150	189,23	314,39	2,40
B2	30-155	192,65	315,75	2,98
B3	30-140	180,63	258,78	3,56

Fonte: Autoria própria (2026)

De modo geral, as curvas TG/DTG das formulações B1, B2 e B3 apresentaram comportamento térmico caracterizado por três regiões principais de perda de massa. A primeira etapa, observada em baixas temperaturas, de 30 até 155°C, pode ser atribuída à eliminação de água fisicamente adsorvida e de compostos voláteis presentes na matriz filmogênica. Esse comportamento é esperado em filmes proteicos plastificados, uma vez que tanto o colágeno quanto o glicerol apresentam grupos polares capazes de interagir com moléculas de água por ligações de hidrogênio.

Tarique e colaboradores (2021), ao avaliarem filmes plastificados com glicerol, observaram que a presença desse plastificante favorece interações intermoleculares por ligações de hidrogênio e influencia as propriedades térmicas do material. De forma semelhante, Liu e colaboradores (2017) relataram que o glicerol aumenta a mobilidade e o volume livre da matriz de filmes, contribuindo para alterações na retenção de umidade e no comportamento térmico dos filmes.

A segunda etapa corresponde à principal região de degradação térmica da matriz polimérica. Os valores de T_{onset} foram de 189,23 °C, 192,65 °C e 180,63 °C para B1, B2 e B3, respectivamente, enquanto os valores de T_{max} foram de 314,39 °C, 315,75 °C e 258,78 °C. Observa-se que B1 e B2 apresentaram temperaturas muito próximas, indicando comportamento térmico semelhante entre as formulações contendo 1,5 e 2,0% de colágeno. Já o filme B3 apresentou deslocamento do T_{max} para menor temperatura, sugerindo antecipação da etapa de maior taxa de degradação. Esse comportamento pode estar associado à maior concentração de sólidos na matriz e à maior sobreposição entre os eventos de degradação do glicerol e das cadeias polipeptídicas do colágeno. Em filmes à base de gelatina, o efeito do glicerol sobre a estabilidade térmica pode variar conforme sua concentração e a organização estrutural da matriz, uma vez que esse plastificante modifica as interações entre as cadeias proteicas e a mobilidade molecular do sistema (Thomazine, 2005; Liu e colaboradores, 2017).

As curvas DTG dos filmes B apresentaram perfis mais complexos, com múltiplos mínimos e eventos parcialmente sobrepostos, especialmente nas regiões II e III. Esse comportamento pode ser relacionado à presença do glicerol, que atua como plastificante e interfere nas interações intermoleculares da matriz proteica. A ação plastificante ocorre pela inserção de moléculas de glicerol entre as cadeias poliméricas, reduzindo parcialmente as interações proteína–proteína e favorecendo maior mobilidade segmentar. Consequentemente, a degradação térmica pode ocorrer de forma menos definida, com sobreposição entre a volatilização/degradação do plastificante e a ruptura das estruturas proteicas. Esse efeito é compatível com o observado por Thomazine e colaboradores em filmes de gelatina plastificados e por Liu e colaboradores (2017), que associaram a presença de glicerol ao aumento da mobilidade e do volume livre na matriz filmogênica.

Ao final das análises, realizadas até 800 °C, os filmes B1, B2 e B3 apresentaram resíduos finais de 2,40%, 2,98% e 3,56%, respectivamente. O aumento gradual do resíduo com o aumento da concentração de colágeno indica maior permanência de frações carbonáceas após a degradação térmica. Esse resultado pode estar relacionado à maior quantidade de material proteico disponível para reorganização estrutural durante o aquecimento, originando frações mais resistentes à decomposição completa. A formação de resíduos após a degradação térmica é frequentemente associada à carbonização parcial de cadeias orgânicas, especialmente em matrizes biopoliméricas submetidas a elevadas temperaturas (Shoulders e Raines, 2009; Silver e Landis, 2011).

Comparativamente aos filmes A, os filmes B apresentaram valores de T_{onset} inferiores, indicando que a incorporação de glicerol antecipou o início da degradação térmica principal da matriz. Enquanto os filmes A apresentaram T_{onset} próximos de 219–224 °C, os filmes B variaram entre 180,63 e 192,65 °C. Esse deslocamento sugere que, embora o glicerol favoreça a flexibilidade e a processabilidade dos filmes, sua presença pode reduzir a estabilidade térmica inicial da matriz colagênica, possivelmente devido à maior mobilidade das cadeias e à maior quantidade de interações intermoleculares reorganizáveis durante o aquecimento. Esse comportamento é coerente com estudos sobre filmes proteicos plastificados, nos quais a presença e a concentração do plastificante influenciam diretamente a organização da matriz, a mobilidade molecular e os eventos de degradação térmica (Thomazine e colaboradores, 2005; Liu e colaboradores, 2017; Tarique e colaboradores, 2021).

Apesar da redução do T_{onset} , os filmes B1 e B2 mantiveram T_{max} superiores aos observados nos filmes A, indicando que a etapa de máxima taxa de degradação ocorreu em temperaturas mais elevadas para essas formulações plastificadas. Esse resultado sugere que a presença do glicerol não promoveu apenas redução da estabilidade inicial, mas também modificou a forma como a matriz se degradou ao longo do aquecimento, tornando os eventos térmicos mais amplos e sobrepostos. Para B3, entretanto, o T_{max} foi reduzido para 258,78 °C, comportamento que indica maior sensibilidade térmica dessa formulação em relação às demais amostras B. Assim, os resultados demonstram que o efeito do glicerol depende da composição da

matriz e da concentração de colágeno, influenciando tanto o início da degradação quanto a distribuição dos eventos observados nas curvas DTG.

7 RESULTADOS DE APLICAÇÃO

7.1 Aplicação das coberturas selecionadas em bananas

7.1.1 Perda de massa

A Tabela 9 contém os valores de perda de massa das bananas tomadas como controle, ou seja, sem aplicação de nenhum dos Tratamentos, em termos percentuais.

Tabela 9 – Perda de massa em bananas *in natura* do grupo controle durante armazenamento

Perda de massa (%)				
Dia	C1	C2	C3	Média ± DP
2	8,22	8,08	7,69	8,00 ± 0,27
4	11,51	11,22	11,24	11,32 ± 0,16
6	14,08	15,23	13,86	14,39 ± 0,74
8	19,86	19,49	19,60	19,65 ± 0,19

Nota: C1, C2 e C3 correspondem às repetições experimentais; DP = desvio-padrão.

Fonte: Autoria própria (2026)

Ao final dos oito dias de avaliação, as bananas do grupo controle apresentaram perda média de massa de 19,65%.

A Tabela 10 apresenta os valores percentuais de perda de massa das bananas submetidas ao T1, correspondente à cobertura A2, formulada com 2,0% de colágeno.

Tabela 10 – Perda de massa em bananas com aplicação de Tratamento 1 durante armazenamento

Perda de massa (%)				
Dia	T1 (1)	T1 (2)	T1 (3)	Média ± DP
2	8,46	8,46	9,19	8,70 ± 0,42
4	11,04	11,13	11,92	11,36 ± 0,48
6	11,59	12,25	12,97	12,27 ± 0,69
8	17,88	17,99	19,02	18,30 ± 0,63
10	24,02	24,08	25,32	24,47 ± 0,73
12	28,02	27,90	29,35	28,42 ± 0,80

Nota: T1(1), T1(2) e T1(3) correspondem às repetições experimentais; DP = desvio-padrão.

Fonte: Autoria própria (2026)

A perda de massa média ao final de 12 dias de avaliação em bananas com aplicação de T1 foi de 28,43%.

A Tabela 11 apresenta os valores percentuais de perda de massa das bananas submetidas ao T2, correspondente à cobertura B1, formulada com 1,5% de colágeno e glicerol na proporção de 30% em relação à massa de colágeno.

Tabela 11 - Perda de massa em bananas com aplicação de Tratamento 2

Perda de massa (%)				
Dia	T2 (1)	T2 (2)	T2 (3)	Média ± DP
2	7,35	9,93	9,22	8,83 ± 1,33
4	9,76	12,94	12,05	11,58 ± 1,64
6	9,97	15,34	14,38	13,23 ± 2,86
8	16,21	20,48	19,45	18,71 ± 2,23
10	21,91	27,11	25,95	24,99 ± 2,73
12	25,59	31,30	30,03	28,97 ± 3,00

Nota: T2(1), T2(2) e T2(3) correspondem às repetições experimentais; DP = desvio-padrão.

Fonte: Autoria própria (2026)

Ao final de 12 dias, as bananas com aplicação do T2 tiveram perda média de massa de 28,97%.

Para possibilitar a comparação direta entre as bananas controle e aquelas submetidas aos tratamentos T1 e T2, foram considerados os resultados obtidos até o 8º dia de armazenamento, correspondente ao último dia de avaliação do grupo controle. As médias e os respectivos desvios-padrão estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Comparação da perda de massa das bananas controle e submetidas aos tratamentos T1 e T2 até o 8º dia de armazenamento

Perda de massa (%)			
Dia	C	T1 – A2	T2 – B1
2	8,00 ± 0,27	8,70 ± 0,42	8,83 ± 1,33
4	11,32 ± 0,16	11,36 ± 0,48	11,58 ± 1,64
6	14,39 ± 0,74	12,27 ± 0,69	13,23 ± 2,86
8	19,65 ± 0,19	18,30 ± 0,63	18,71 ± 2,23

Valores expressos como média ± desvio-padrão, considerando três repetições (n = 3).

Fonte: Autoria própria (2026)

Nos primeiros quatro dias de armazenamento, os três grupos apresentaram valores médios de perda de massa próximos. A partir do 6º dia, entretanto, as bananas submetidas aos tratamentos apresentaram perdas numericamente inferiores às observadas no controle. No 8º dia, controle apresentou perda média de massa de 19,65%, enquanto os tratamentos T1 e T2 apresentaram valores de 18,30% e 18,71%,

respectivamente. Dessa forma, o T1 apresentou redução relativa de aproximadamente 6,89% na perda de massa em comparação ao controle, enquanto o T2 promoveu redução de aproximadamente 4,77%. Esses resultados indicam uma tendência de menor perda de massa nas bananas revestidas.

No 12º dia, correspondente ao final da avaliação das frutas revestidas, as perdas médias de massa foram de 28,42% para as bananas submetidas ao T1 e de 28,97% para aquelas submetidas ao T2.

7.1.2 Aparência geral

As bananas foram observadas nos dias 0, 2, 4, 6, 8, 10 e 12, conforme registrado nas Figuras de 31 a 38, para acompanhamento de aparência geral ao longo desses dias. Sendo que o grupo de controle foi avaliado somente até o dia 8, devido a questões sensoriais indicativas de degradação, enquanto que T1 e T2 seguiram até o 12º dia.

No início do experimento, as bananas dos grupos controle, T1 e T2 apresentavam estágio de maturação semelhante, com coloração predominantemente amarela, formato preservado e ausência de rupturas ou amassamentos intensos na casca, conforme apresentado na Figura 31. Nas bananas revestidas, algumas regiões mais escuras já eram visíveis no Dia 0, estando associadas ao aspecto e à distribuição dos revestimentos sobre a superfície, e não necessariamente à deterioração ocorrida durante o armazenamento.

Figura 31 – Aspecto das bananas dos grupos controle, T1 e T2 no início do armazenamento



Fonte: Autoria própria (2026)

No 2º dia, as bananas do grupo controle começaram a apresentar discreta perda de brilho e leve escurecimento da casca, enquanto aquelas submetidas aos tratamentos T1 e T2 permaneceram visualmente semelhantes à condição inicial, mantendo a coloração amarela predominante e o formato característico, conforme

apresentado na Figura 32. Nesse período, todas as frutas ainda apresentavam integridade estrutural da casca preservada, sem deformações acentuadas.

Figura 32 - Aspecto das bananas dos grupos controle, T1 e T2 no 2º dia de armazenamento



Fonte: Autoria própria (2026)

No 4º dia, tornou-se mais evidente o avanço do escurecimento nas bananas do grupo controle, acompanhado pelo aparecimento de novas manchas e por sinais de murchamento, como pode ser observado na Figura 33. As bananas submetidas aos tratamentos T1 e T2 também apresentaram aumento das áreas escurecidas;

entretanto, conservaram melhor o formato, a curvatura e a firmeza aparente em comparação às frutas controle.

Figura 33 – Aspecto das bananas dos grupos controle, T1 e T2 no 4º dia de armazenamento



Fonte: Autoria própria (2026)

No 6º dia, as bananas do grupo controle apresentaram intensificação do escurecimento da casca, aumento das manchas superficiais, deformação e redução da firmeza ao toque, conforme evidenciado na Figura 34. Essas alterações foram observadas com maior detalhamento nas amostras C1, C2 e C3 apresentadas na Figura 35 (a, b e c), nas quais se verificaram redução do tamanho aparente, distorção do formato e início de amolecimento. Em contrapartida, as bananas submetidas aos

tratamentos T1 e T2 apresentaram menor alteração no formato e permaneceram com firmeza aparente preservada.

Figura 34 - Aspecto das bananas dos grupos de controle, T1 e T2 no 6º dia de armazenamento



Fonte: Autoria própria (2026)

Figura 35 - Detalhes do aspecto das bananas do grupo controle no 6º dia de armazenamento



Fonte: Autoria própria (2026)

No 8º dia, as bananas do grupo controle foram retiradas da avaliação devido ao escurecimento quase total da casca, à elevada flacidez e ao acentuado amolecimento. As frutas submetidas aos tratamentos T1 e T2, apresentadas na Figura 36, também demonstraram aumento das áreas escurecidas, porém mantiveram a forma, a curvatura e a rigidez aparentes, possibilitando a continuidade do acompanhamento.

Figura 36 – Aspecto das bananas dos grupos controle, T1 e T2 no 8º dia de armazenamento



Fonte: Autoria própria (2026)

No 10º dia, observou-se avanço do escurecimento da casca nas bananas submetidas aos dois tratamentos, conforme apresentado na Figura 37. Apesar dessa alteração visual, os frutos ainda conservaram o formato característico e não

apresentaram deformações ou flacidez semelhantes às observadas no grupo controle no 8º dia.

Figura 37 - Aspecto das bananas dos grupos de controle, T1 e T2 no 10º dia de armazenamento



Fonte: Autoria própria (2026)

Ao final do experimento, no 12º dia, as bananas submetidas aos tratamentos T1 e T2 apresentavam escurecimento mais acentuado da casca, conforme observado na Figura 38. Entretanto, as frutas ainda mantinham sua estrutura geral, forma e rigidez aparentes. A avaliação foi encerrada devido ao avanço do escurecimento e à

redução da aceitabilidade visual das cascas, não sendo observada diferença visual evidente entre os tratamentos quanto à conservação da aparência geral.

Figura 38 – Aspecto das bananas dos grupos de controle, T1 e T2 no 12º dia de armazenamento



Fonte: Autoria própria (2026)

De maneira geral, a sequência apresentada nas Figuras 31 a 38 demonstra que os revestimentos T1 e T2 não impediram completamente o escurecimento das cascas, mas retardaram alterações mais intensas relacionadas ao murchamento, à deformação e ao amolecimento dos frutos. Enquanto as bananas do grupo controle apresentaram perda acentuada da firmeza aparente e precisaram ser descartadas no 8º dia, conforme evidenciado nas Figuras 34 e 35, as bananas revestidas conservaram a forma e a rigidez aparentes até o 12º dia, como observado nas Figuras 36 a 38. Assim, o efeito mais evidente dos revestimentos esteve associado à preservação da integridade física das bananas, e não à manutenção completa da coloração amarela da casca.

As alterações verificadas nas bananas do grupo controle, especialmente o avanço do escurecimento, a perda de brilho, o murchamento e a redução da firmeza aparente, estão relacionadas ao processo natural de amadurecimento e senescência da banana, caracterizada como um fruto climatérico. Durante o amadurecimento, ocorre aumento da produção de etileno, acompanhado por alterações na coloração e pela desorganização dos componentes da parede celular. Ning e colaboradores (2022) observaram que o amolecimento da banana esteve associado ao aumento da

atividade de enzimas envolvidas na degradação dos homogalacturonanos e à redução acentuada da firmeza da casca. Esse comportamento é compatível com as alterações observadas no grupo controle entre o 4º e o 6º dia, apresentadas nas Figuras 33 a 35.

A manutenção do formato e da firmeza aparente das bananas submetidas aos tratamentos T1 e T2 pode estar relacionada à formação de uma camada superficial capaz de limitar parcialmente as trocas de gases e de vapor de água entre os frutos e o ambiente. Pham e colaboradores (2022), ao aplicarem revestimentos de amido de mandioca e gelatina em bananas, observaram redução significativa da atividade respiratória e da perda de massa, além de alterações mais lentas nos sólidos solúveis, carboidratos e açúcares redutores. A formulação com maior proporção de gelatina retardou o pico respiratório em quatro dias em comparação às frutas não revestidas. De maneira semelhante, Dwivany e colaboradores (2020) verificaram que revestimentos de carragena retardaram o amadurecimento e prolongaram a conservação de bananas Cavendish. Esses resultados ajudam a explicar por que, no presente estudo, as bananas revestidas permaneceram com forma e rigidez aparentes preservadas até o 12º dia, conforme mostrado nas Figuras 36 a 38.

Apesar desse efeito sobre a integridade física, os tratamentos T1 e T2 não impediram completamente o escurecimento da casca. Kim e colaboradores (2022) demonstraram que um revestimento composto por carboximetilcelulose e extrato de raiz de *Morus alba* retardou a transpiração, a respiração e as alterações de textura, além de reduzir a atividade da polifenoloxidase e o índice de escurecimento das bananas. No presente trabalho, os revestimentos de colágeno não continham agentes antioxidantes ou inibidores específicos do escurecimento enzimático, o que pode explicar, ao menos parcialmente, o avanço das manchas escuras mesmo nas frutas tratadas. Assim, os resultados das Figuras 36 a 38 sugerem que o principal benefício dos revestimentos esteve relacionado à manutenção da forma e da firmeza aparente, e não à preservação completa da coloração amarela.

De modo geral, a sequência apresentada nas Figuras 31 a 38 indica que os tratamentos retardaram as alterações mais intensas relacionadas à deformação, à flacidez e ao amolecimento das bananas. Enquanto o grupo controle precisou ser retirado da avaliação no 8º dia, as frutas revestidas permaneceram estruturalmente preservadas até o 12º dia. Estes resultados constituem evidências visuais e táteis de

conservação, não sendo possível quantificar a intensidade desse efeito ou afirmar diferença significativa entre T1 e T2.

7.1.3 Deterioração microbiológica visível

Durante todo o período de armazenamento, não foi observado crescimento microbiano visível na superfície das bananas pertencentes ao grupo controle e daquelas submetidas aos tratamentos T1 e T2. Embora tenha ocorrido escurecimento progressivo das cascas, especialmente nos estágios mais avançados da avaliação, essa alteração não foi considerada evidência de crescimento microbiano, isso porque, conforme destacado por Chen e colaboradores (2023), o escurecimento da casca constitui uma alteração comum durante o amadurecimento pós-colheita e a senescência das bananas, estando relacionado à oxidação dos compostos fenólicos e à atividade da polifenoloxidase. Dessa forma, nas condições avaliadas, o escurecimento foi interpretado como uma alteração fisiológica e enzimática associada ao avanço da maturação, e não como evidência visual de desenvolvimento fúngico.

7.2 Aplicação das coberturas selecionadas em morangos

7.2.1 Perda de massa

A Tabela 13 contém os valores médios de perda de massa dos morangos pertencentes ao grupo controle, ou seja, sem aplicação de nenhum dos Tratamentos ao longo dos dias em que foram avaliados.

Tabela 13- Perda de massa em morangos *in natura* sem aplicação de nenhum revestimento

Perda de massa (%)				
Dia	C1	C2	C3	Média ± DP
1	1,89	9,98	11,68	7,85 ± 5,23
2	21,62	21,50	27,80	23,64 ± 3,60
3	23,04	22,20	28,29	24,51 ± 3,30
4	87,28	63,39	87,21	79,29 ± 13,77

Nota: C1, C2 e C3 correspondem às repetições experimentais; DP = desvio-padrão.

Fonte: Autoria própria (2026)

Após 4 dias de acompanhamento deste grupo, a massa média perdida foi de 79,29 ± 13,77 %. Este grupo foi avaliado em um intervalo de tempo inferior aos grupos de T1 e T2, isso porque houve crescimento microbiano visível, conforme descrito na seção 7.2.3, o que impossibilitou a continuidade das avaliações a partir desse dia.

No que se refere ao grupo de aplicação de T1, ao fim de 6 dias, estes frutos perderam, em média, 65,18 ± 11,38 % de sua massa total, conforme a Tabela 14.

Tabela 14 – Perda de massa em morangos com aplicação de Tratamento 1

Perda de massa (%)				
Dia	T1 (1)	T1 (2)	T1 (3)	Média ± DP
1	7,39	15,94	11,36	11,56 ± 4,28
2	9,23	19,80	13,96	14,33 ± 5,29
3	9,56	20,49	14,36	14,80 ± 5,48
4	31,63	55,11	35,56	40,77 ± 12,58
5	48,47	66,24	43,58	52,76 ± 11,92
6	65,04	76,62	53,87	65,18 ± 11,38

Nota: T1(1), T1 (2) e T1 (3) correspondem às repetições experimentais; DP = desvio-padrão.

Fonte: Autoria própria (2026)

Já os frutos que receberam o T2, tiveram perda de massa de $50,33 \pm 9,39$ %, de acordo com a Tabela 15.

Tabela 15 - Perda de massa em morangos com aplicação de Tratamento 2

Perda de massa (%)				
Dia	T2 (1)	T2 (2)	T2 (3)	Média ± DP
1	10,64	9,53	10,48	10,22 ± 0,60
2	13,69	12,44	12,58	12,90 ± 0,68
3	14,19	13,01	13,06	13,42 ± 0,67
4	38,74	36,88	31,15	35,59 ± 3,96
5	48,07	44,06	36,44	42,86 ± 5,91
6	59,89	50,00	41,11	50,33 ± 9,39

Nota: T2 (1), T2 (2) e T2(3) correspondem às repetições experimentais; DP = desvio-padrão.

Fonte: Autoria própria (2026)

A perda de massa dos morangos aumentou progressivamente durante o armazenamento em todos os grupos avaliados. No primeiro dia, foram observados valores médios de 7,85%, 11,56% e 10,22% para o grupo controle, T1 e T2, respectivamente. A partir do 2º dia, entretanto, os morangos de controle passaram a apresentar perdas de massa numericamente superiores às verificadas nas amostras revestidas.

No 4º dia, correspondente ao último período comum de avaliação, o grupo controle apresentou perda média de massa de 79,29%, enquanto os morangos submetidos

aos tratamentos T1 e T2 apresentaram valores de 40,77% e 35,59%, respectivamente, conforme apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 - Comparação da perda de massa dos morangos controle e submetidos aos tratamentos T1 e T2 até o 4º dia de armazenamento

Dia	Perda de massa (%)		
	Controle	T1 – A2	T2 – B1
1	7,85 ± 5,23	11,56 ± 4,28	10,22 ± 0,60
2	23,64 ± 3,60	14,33 ± 5,29	12,90 ± 0,68
3	24,51 ± 3,30	14,80 ± 5,48	13,42 ± 0,67
4	79,29 ± 13,77	40,77 ± 12,58	35,59 ± 3,96

Fonte: Autoria própria (2026)

Em relação ao controle, esses resultados correspondem a reduções relativas de aproximadamente 48,58% para o T1 e 55,11% para o T2, indicando que ambos os revestimentos contribuíram para limitar a perda de massa dos morangos durante esse período.

Entre os tratamentos, o T2 apresentou os menores valores médios de perda de massa a partir do 2º dia, além de menor variabilidade entre as repetições até o 4º dia. Ao final do 6º dia, os morangos submetidos ao T1 apresentaram perda média de massa de 65,18%, enquanto aqueles submetidos ao T2 apresentaram 50,33%. Assim, o T2 demonstrou numericamente o melhor desempenho na redução da perda de massa. Entretanto, na ausência de análise estatística inferencial, esses resultados devem ser interpretados como tendências observadas experimentalmente.

A perda de massa progressiva observada em todos os grupos está relacionada principalmente à eliminação de água por transpiração e ao consumo de substratos orgânicos durante a respiração dos frutos. Os morangos apresentam elevada perecibilidade e atividade respiratória, além de tecidos delicados, características que favorecem a rápida perda de água, a redução da turgescência e o avanço da senescência após a colheita. No presente estudo, o aumento acentuado da perda de massa do grupo controle no 4º dia, associado à ocorrência de crescimento microbiano visível, evidencia o estágio avançado de deterioração desses frutos e justifica a interrupção de seu acompanhamento. Segundo Sousa e colaboradores (2024), a elevada atividade respiratória e a suscetibilidade a danos e infecções contribuem para

a curta vida pós-colheita dos morangos e para alterações rápidas em sua textura e qualidade.

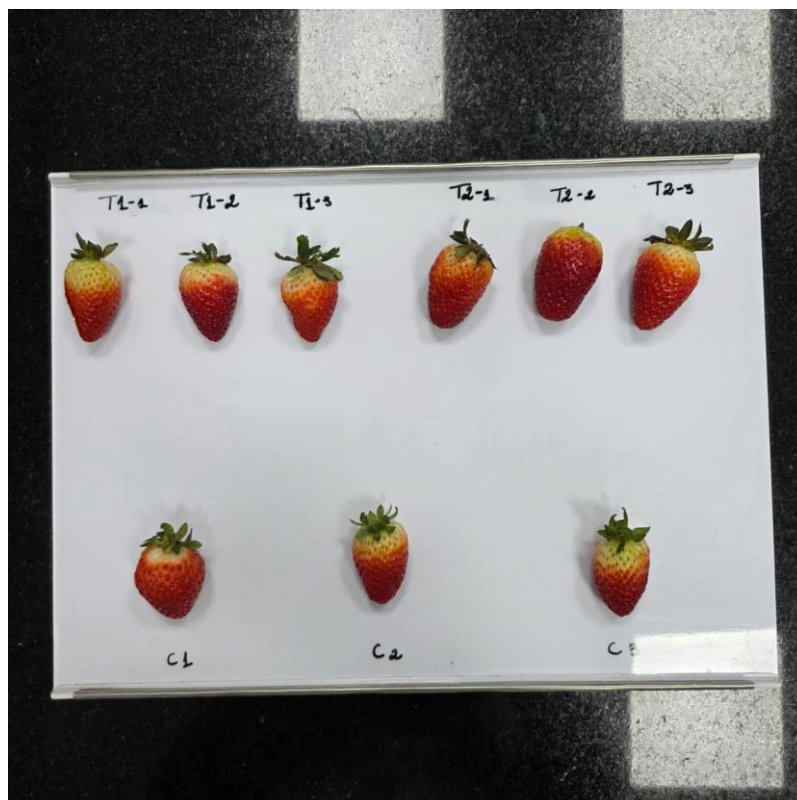
Os menores valores de perda de massa apresentados pelos morangos submetidos aos tratamentos T1 e T2, especialmente a partir do 2º dia, sugerem que os revestimentos formaram uma barreira superficial capaz de limitar parcialmente a transferência de umidade entre os frutos e o ambiente. Khodaei, Hamidi-Esfahani e Rahmati (2021) também observaram perdas de massa e deterioração significativamente menores em morangos revestidos quando comparados aos frutos controle. De maneira semelhante, Abdullah e colaboradores (2023) verificaram que a aplicação de carboximetilcelulose reduziu a evaporação de água e a perda de massa dos morangos durante o armazenamento. Assim, as reduções relativas de 48,58% para o T1 e 55,11% para o T2 reforçam o efeito protetor das coberturas.

7.2.2 Aparência geral

Os morangos foram avaliados diariamente quanto às alterações de coloração, brilho, textura, formato, perda de água e presença de deterioração microbiana visível. O grupo controle foi pesado até o 4º dia e permaneceu sob observação visual até o 5º dia, quando o crescimento fúngico visível determinou seu descarte. Os morangos submetidos aos tratamentos T1 e T2 foram acompanhados até o 6º dia de armazenamento, conforme apresentado nas Figuras 39 a 48.

No início do experimento, os morangos dos grupos controle, T1 e T2 apresentavam coloração predominantemente vermelha, formato característico e ausência de deformações, exsudação ou sinais visíveis de crescimento microbiano, conforme observado na Figura 39. Apesar de pequenas diferenças individuais de tamanho e tonalidade, os frutos apresentavam condições visuais adequadas para o início do acompanhamento.

Figura 39 – Aspecto dos morangos dos grupos controle, T1 e T2 no início do armazenamento



Fonte: Autoria própria (2026)

No 1º dia de armazenamento, os morangos do grupo controle começaram a apresentar coloração vermelha mais escura e discretas alterações superficiais. Os frutos submetidos aos tratamentos T1 e T2 também demonstraram intensificação da coloração vermelha, porém mantiveram o brilho, o formato e a firmeza aparente, como apresentado na Figura 40. Nesse período, não foram observados sinais visíveis de crescimento microbiano em nenhum dos grupos.

Figura 40 – Aspecto dos morangos dos grupos controle, T1 e T2 no 1º dia de armazenamento



Fonte: Autoria própria (2026)

No 2º dia, as alterações tornaram-se mais evidentes nos morangos do grupo controle, que apresentaram escurecimento acentuado, aumento das regiões enrugadas e sinais de murchamento, indicando maior perda de água e redução da turgescência dos tecidos. Em contrapartida, os frutos submetidos aos tratamentos T1 e T2 mantiveram aparência semelhante à observada no dia anterior, com coloração vermelha predominante, brilho superficial e formato preservado, conforme mostrado na Figura 41.

Figura 41 – Aspecto dos morangos dos grupos controle, T1 e T2 no 2º dia de armazenamento



Fonte: Autoria própria (2026)

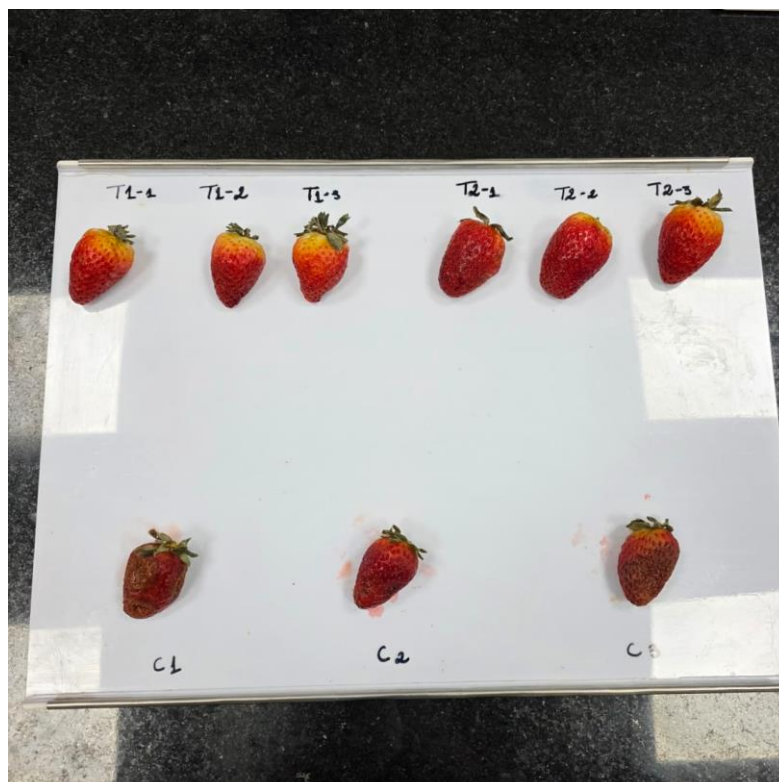
No 3º dia, os morangos do grupo controle apresentaram agravamento da deterioração visual, com ampliação das áreas escurecidas, perda acentuada de rigidez e alterações na textura. Durante o manuseio, observou-se desprendimento de partes do tecido superficial e perda de líquido, indicando perda da integridade estrutural dos frutos, conforme detalhado na Figura 42. As amostras submetidas aos tratamentos T1 e T2, por sua vez, permaneceram visualmente semelhantes ao dia anterior, conservando melhor o formato e a firmeza aparente, como pode ser observado na Figura 43.

Figura 42 - Detalhes do aspecto dos morangos do grupo controle no 3º dia de armazenamento



Fonte: Autoria própria (2026)

Figura 43 - Aspecto dos morangos dos grupos controle, T1 e T2 no 3º dia de armazenamento

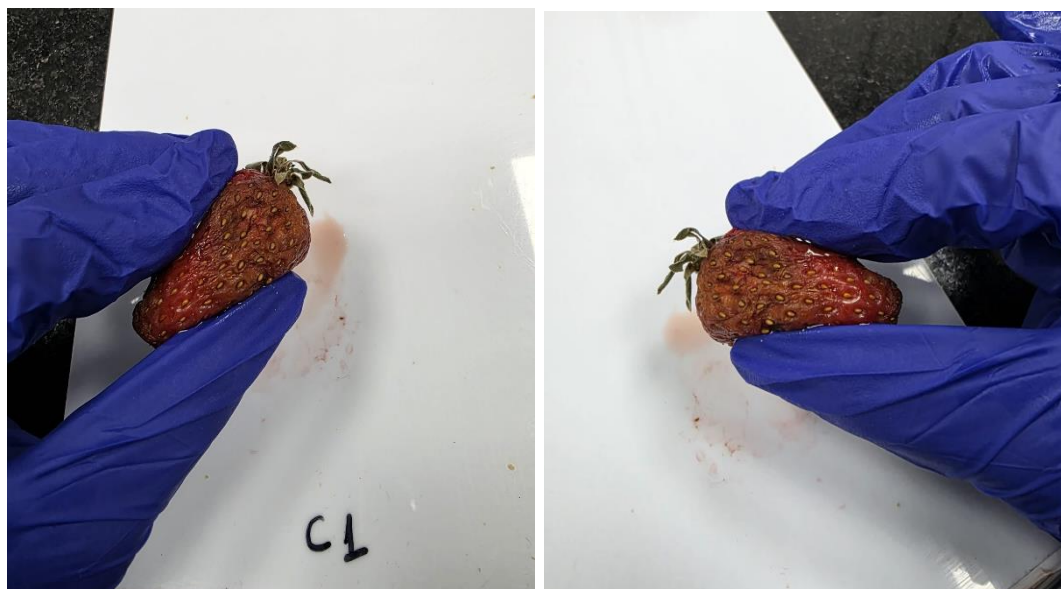


Fonte: Autoria própria (2026)

No 4º dia, os frutos do grupo controle apresentavam intenso murchamento, escurecimento e amolecimento, além de sinais acentuados de desidratação e comprometimento da integridade dos tecidos, conforme evidenciado na Figura 44. Na comparação entre os grupos, apresentada na Figura 45, os morangos submetidos aos tratamentos T1 e T2 ainda mantinham o formato característico e apresentavam menor

grau de murchamento e deformação em relação ao controle. Não foi observada diferença visual evidente entre T1 e T2 nesse período.

Figura 44- Detalhes do aspecto dos morangos do grupo controle no 4º dia de armazenamento



Fonte: Autoria própria (2026)

Figura 45 - Aspecto dos morangos dos grupos controle, T1 e T2 no 4º dia de armazenamento



Fonte: Autoria própria (2026)

Entre o 4º e o 5º dia, ocorreu avanço acentuado da deterioração dos morangos do grupo controle. Além do intenso amolecimento, da desidratação e da perda de estrutura, foi observada a presença de crescimento fúngico visível, caracterizado pela formação de micélio na superfície dos frutos, conforme apresentado na Figura 46. Diante dessas alterações, as amostras de controle foram descartadas, não sendo submetidas a avaliações posteriores.

Figura 46 - Crescimento fúngico visível nos morangos do grupo controle no 5º dia de armazenamento

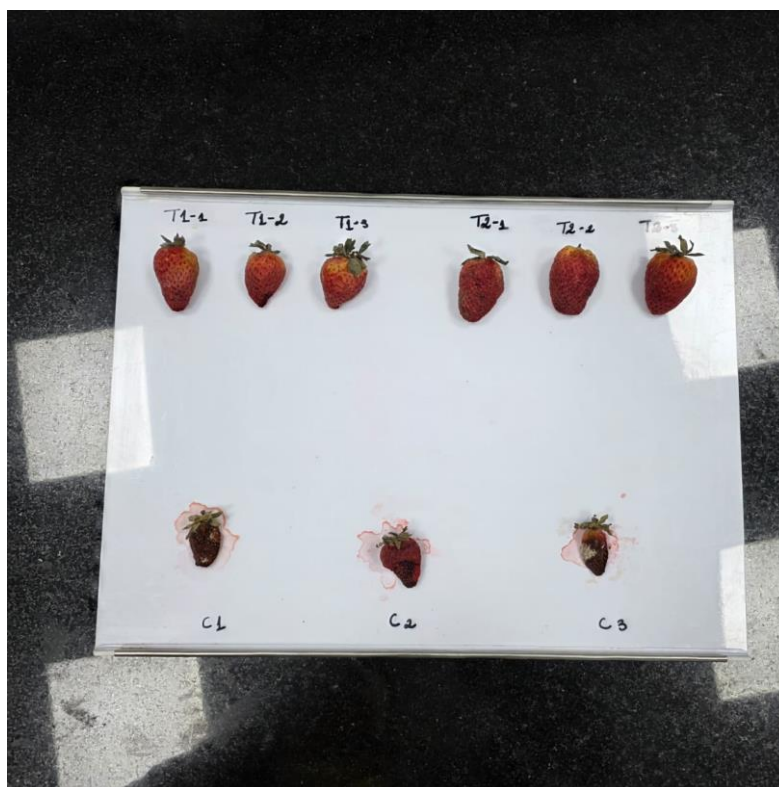


Fonte: Autoria própria (2026)

A avaliação dos morangos submetidos aos tratamentos T1 e T2 prosseguiu até o 6º dia, uma vez que esses frutos mantiveram melhores condições estruturais e não apresentaram, até o período correspondente ao descarte do controle, o mesmo grau de deterioração visual observado nas amostras não revestidas.

Na Figura 47 é possível verificar a aparência dos três grupos neste dia de avaliação.

Figura 47 – Aspecto dos morangos dos grupos controle, T1 e T2 no 5º dia de armazenamento



Fonte: Autoria própria (2026)

No 6º e último dia de experimento, os grupos que receberam os tratamentos T1 e T2 começaram a apresentar ressecamento, visto na Figura 48, por questão sensorial o ensaio foi interrompido nesse dia.

Figura 48 – Aspecto dos morangos dos grupos T1 e T2 no 6º dia de armazenamento



Fonte: Autoria própria (2026)

As alterações observadas nos morangos do grupo controle, especialmente o escurecimento, o murchamento, a exsudação de líquido e a redução da firmeza

aparente, são compatíveis com o avanço da senescência pós-colheita. Os morangos apresentam tecidos delicados, elevada atividade respiratória e grande suscetibilidade à perda de água, aos danos mecânicos e à deterioração microbiana, características que contribuem para sua curta vida útil. A redução do conteúdo de água provoca perda da turgescência e enrugamento da superfície, enquanto o avanço da deterioração compromete a integridade dos tecidos e favorece o amolecimento. Dessa forma, o agravamento visual verificado no grupo controle entre o 2º e o 4º dia, conforme as Figuras 39 a 43, está de acordo com a elevada perecibilidade característica desse fruto (Sousa e colaboradores, 2024).

A manutenção do formato, do brilho e da firmeza aparente dos morangos submetidos aos tratamentos T1 e T2 pode estar relacionada à formação de uma camada superficial capaz de limitar parcialmente a transferência de água e as trocas gasosas entre os frutos e o ambiente. Revestimentos poliméricos podem atuar como barreiras semipermeáveis, reduzindo a transpiração, a respiração e a velocidade de alterações associadas à senescência. Ali e colaboradores (2022) observaram que morangos revestidos apresentaram menor perda de firmeza e alterações de cor menos intensas do que os frutos sem revestimento; após o 4º dia, os morangos não revestidos apresentaram escurecimento significativamente mais acentuado. Khodaei, Hamidi-Esfahani e Rahmati (2021) também verificaram menor perda de massa e menor deterioração em morangos revestidos durante o armazenamento. Esses resultados são coerentes com a melhor preservação visual observada para T1 e T2 nas Figuras 39 a 45 e com as menores perdas de massa verificadas nesses tratamentos em comparação ao controle.

Entre T1 e T2, não foi observada diferença visual evidente até o 4º dia, uma vez que ambos os tratamentos contribuíram para a manutenção do formato e apresentaram menor grau de murchamento e deformação em relação ao controle. Embora o T2 tenha apresentado numericamente menor perda de massa, essa diferença não foi claramente perceptível na observação visual dos frutos. Estudos sobre conservação pós-colheita de morangos normalmente associam a avaliação da aparência a determinações quantitativas de firmeza, parâmetros instrumentais de cor, incidência de deterioração e aceitação sensorial, permitindo uma análise mais completa do efeito dos revestimentos (Taban e colaboradores, 2024; Khodaei; Hamidi-Esfahani; Rahmati, 2021). Portanto, como não foram realizadas análises instrumentais

de cor e firmeza nem avaliação sensorial com provadores, os resultados deste estudo devem ser interpretados como evidências visuais e táteis de conservação, não sendo possível quantificar a intensidade das diferenças ou afirmar a superioridade de um tratamento sobre o outro.

7.2.3 Deterioração microbiológica visível

Durante os quatro primeiros dias de armazenamento, não foram observadas colônias, estruturas filamentosas ou outras alterações visualmente atribuíveis ao crescimento microbiano na superfície dos morangos dos grupos controle, T1 e T2. Entretanto, entre o 4º e o 5º dia, os frutos do grupo controle apresentaram rápida intensificação da deterioração, acompanhada pela formação de estruturas filamentosas compatíveis com micélio fúngico, conforme observado na Figura 44. Diante do comprometimento avançado dos tecidos, essas amostras foram descartadas. Nos morangos submetidos aos tratamentos T1 e T2, não foi observado crescimento fúngico visível até o 6º dia, correspondente ao final do período de acompanhamento.

O desenvolvimento mais rápido de fungos nas amostras controle é compatível com a elevada perecibilidade dos morangos. Esses frutos apresentam tecidos delicados, alta atividade respiratória e grande suscetibilidade a danos mecânicos, perda de água e infecções pós-colheita. Entre os agentes associados à deterioração de morangos, destacam-se fungos como *Botrytis cinerea*, responsável pelo mofo-cinza; contudo, a identificação do microrganismo presente neste estudo não pode ser realizada somente pela aparência visual, pois seriam necessários isolamento e análises microbiológicas específicas (Sousa e colaboradores, 2024).

A ausência de crescimento fúngico visível nos frutos submetidos a T1 e T2 durante o período avaliado sugere que as coberturas contribuíram para retardar a manifestação da deterioração. A camada formada sobre a superfície dos frutos pode atuar como uma barreira parcial, reduzindo a perda de água, as trocas gasosas e o contato direto dos tecidos com o ambiente, condições que podem desacelerar a senescência e, indiretamente, o avanço da deterioração microbiana. Khodaei, Hamidi-Esfahani e Rahmati (2021) observaram menor ocorrência de deterioração e de fungos visíveis em morangos revestidos quando comparados aos frutos sem revestimento. De Bruno e colaboradores (2023) também verificaram menor índice de deterioração e

melhores condições microbiológicas em morangos recobertos durante o armazenamento.

8 Síntese de resultados

Os resultados obtidos para o colágeno indicam que o aproveitamento da bexiga natatória de tambaqui foi tecnicamente viável nas condições avaliadas. A partir de 100 g de matéria-prima, foram obtidos 47 g de colágeno purificado e seco, correspondendo a um rendimento de 47%, com solubilidade em ácido acético de $93,0 \pm 0,8\%$ e pH de 2,83. A elevada fração solúvel favoreceu o preparo das soluções filmogênicas e mostrou-se coerente com a permanência do material em meio ácido. Além disso, as bandas características das Amidas A, I, II e III foram identificadas por FTIR-ATR, enquanto a razão de 0,86 entre a Amida III e a banda próxima de 1450 cm^{-1} sugeriu a preservação da estrutura helicoidal do colágeno. O comportamento termogravimétrico também foi compatível com materiais colagênicos, apresentando início da principal etapa de degradação em $278,18\text{ }^{\circ}\text{C}$ e taxa máxima de decomposição em $350,22\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dessa forma, o rendimento, a solubilidade e as caracterizações estrutural e térmica indicam que o processo de extração e purificação permitiu obter material em quantidade e condições adequadas para as etapas posteriores do estudo.

As características apresentadas pelo colágeno refletiram-se em sua capacidade de formar películas contínuas nas seis formulações desenvolvidas. O aumento da concentração da proteína foi acompanhado pelo aumento da espessura dos filmes, enquanto a presença do glicerol resultou em películas mais espessas e modificou o comportamento térmico da matriz. Os filmes B apresentaram temperaturas iniciais de degradação numericamente inferiores às observadas para os filmes A, sugerindo que o plastificante aumentou a mobilidade das cadeias e antecipou o início da degradação térmica. Entretanto, as bandas características do colágeno permaneceram presentes nas formulações, e as razões entre Amida III e a região próxima de 1450 cm^{-1} foram de aproximadamente 0,85 para os filmes A e 0,90 para os filmes B. Esses resultados sugerem que a formação das películas e a incorporação do glicerol modificaram principalmente as propriedades físicas e térmicas, sem evidência de comprometimento acentuado da estrutura helicoidal. A opacidade não apresentou variação linear com a concentração de colágeno, demonstrando que esse

parâmetro também depende da espessura e da organização da matriz. Considerando o conjunto dessas características, A2 e B1 foram selecionadas por apresentarem propriedades físico-visuais consideradas mais adequadas para a aplicação nos frutos.

Na etapa de aplicação, as formulações selecionadas apresentaram comportamentos distintos conforme o tipo de fruto avaliado. Nas bananas, os valores de perda de massa permaneceram próximos entre os grupos nos primeiros quatro dias. No 8º dia, o controle apresentou perda média de 19,65%, enquanto T1 e T2 apresentaram 18,30% e 18,71%, respectivamente, caracterizando uma tendência numérica de menor perda de massa nas frutas revestidas. Além disso, as bananas submetidas aos tratamentos mantiveram a forma e a firmeza aparentes até o 12º dia, embora os revestimentos não tenham impedido o avanço do escurecimento da casca. Nos morangos, no 4º dia, a perda média de massa foi de 79,29% no grupo controle, 40,77% em T1 e 35,59% em T2, sendo também observado aparecimento mais tardio de crescimento fúngico visível nas amostras revestidas. Em conjunto, esses resultados sugerem potencial dos revestimentos para limitar parcialmente as trocas de umidade e retardar algumas alterações relacionadas à deterioração. Entretanto, devido à ausência de testes estatísticos inferenciais e ao número reduzido de unidades experimentais, as diferenças observadas devem ser interpretadas como tendências numéricas e evidências exploratórias, não sendo possível afirmar superioridade estatística entre os tratamentos.

9 CONCLUSÃO

Foi possível obter colágeno a partir da bexiga natatória de tambaqui por meio do método ácido-enzimático, seguido das etapas de purificação e secagem. O material apresentou rendimento e solubilidade adequados ao preparo das soluções filmogênicas, além de características estruturais e térmicas compatíveis com materiais colagênicos. Esses resultados indicam que a bexiga natatória pode ser aproveitada como fonte alternativa de colágeno, contribuindo para a valorização de um resíduo proveniente do processamento pesqueiro.

O colágeno obtido apresentou capacidade de formação de películas nas diferentes concentrações avaliadas. A concentração da proteína e a presença do glicerol modificaram as características físicas, ópticas e térmicas dos filmes, sem evidência de comprometimento acentuado da estrutura helicoidal do colágeno. Entre

as formulações desenvolvidas, A2 e B1 apresentaram características consideradas adequadas aos critérios adotados para a aplicação como revestimentos em frutos.

Nas bananas, os revestimentos não impediram o escurecimento da casca, mas os resultados sugeriram manutenção aparentemente mais favorável da forma e da firmeza durante o armazenamento. Nos morangos, os tratamentos apresentaram valores numericamente inferiores de perda de massa e possível atraso no aparecimento de crescimento fúngico visível em comparação ao controle. Entretanto, considerando a ausência de testes estatísticos inferenciais e o número reduzido de unidades experimentais, essas diferenças devem ser interpretadas como tendências descritivas. De modo geral, o trabalho evidenciou o potencial tecnológico do colágeno extraído da bexiga natatória de tambaqui para o desenvolvimento de filmes e revestimentos alimentícios, sendo recomendada a realização de estudos futuros com maior número de unidades experimentais e avaliações mecânicas, de barreira, microbiológicas e estatísticas.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDULLAH, Ahmed H. et al. Carboxymethyl Cellulose from Banana Rachis: A Potential Edible Coating to Extend the Shelf Life of Strawberry Fruit. *Agriculture*, v. 13, n. 5, p. 1058, maio 2023.
- AHMAD, M.; BENJAKUL, S. Extraction and characterization of pepsin-solubilized collagen from the skin of unicorn leatherjacket (*Aluterus monoceros*). *Food Chemistry*, v. 124, n. 1, p. 97–105, 2011.
- AHMED, R.; HAQ, M.; CHOUDHURY, A. Structural and thermal characterization of fish collagen and its stability. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 135, p. 128–135, 2019.
- ALI, Asgar et al. Quality characteristics of strawberry fruit following a combined treatment of laser sterilization and guava leaf-based chitosan nanoparticle coating. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, v. 9, n. 1, p. 81, nov. 2022
- ANSA, E. J. Waste management in the fish processing industry. *Journal of Aquatic Sciences*, v. 21, p. 45–52, 2006.
- ARAÚJO, C. S. e colaboradores. Aproveitamento de resíduos do pescado: aplicações tecnológicas e ambientais. *Revista Brasileira de Engenharia de Pesca*, v. 13, n. 2, p. 77–89, 2020.
- ARAÚJO, S. L.; MOTA, J. B.; PIRES, D. C.; MIRANDA-FILHO, K. C. Production of Tambaqui (*Colossoma macropomum*) in Brazil between 2017 to 2021. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, v. 7, n. 2, p. e69794, 2024
- ARFAT, Y. A. e colaboradores. Development and characterization of fish-protein-based biodegradable films. *Food Hydrocolloids*, v. 36, p. 1–9, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA PISCICULTURA (PEIXE BR). Anuário Brasileiro da Piscicultura PEIXE BR 2025. São Paulo: Peixe BR, 2025.
- AVÉROUS, L.; POLETTTO, M. Biodegradable polymers. In: POLETTTO, M.; ORÉFICE, R. L.; ZATTERA, A. J. (eds.). *Polymer Science: Research Advances, Practical Applications and Educational Aspects*. Badajoz: Formatex, 2016.
- AVÉROUS, Luc; POLETTTO, Matheus. Biodegradable polymers and biopolymers: classification, structures, and properties. In: POLETTTO, M. (ed.). *Renewable and Sustainable Materials*. Londres: InTech, 2016. p. 15-42
- BAMA, P. e colaboradores. Extraction and characterization of collagen from fish skin. *Food Chemistry*, v. 120, p. 508–513, 2010.
- BARBOSA, M. L. Aproveitamento de resíduos de pescado na Amazônia. Manaus: UFAM, 2022.
- BARROSO, R. M. Cadeia produtiva do pescado no Brasil. Brasília: EMBRAPA, 2019.

BARTH, A. Infrared spectroscopy of proteins. *Biochimica et Biophysica Acta*, v. 1767, p. 1073–1101, 2007.

BENÍTEZ, Silvia; ACHAERANDIO, Isabel; SEPULCRE, Francesc; PUJOLÀ, Montserrat. Development and application of biodegradable active coatings for quality preservation of highly perishable fruits during cold storage. *Postharvest Biology and Technology*, v. 185, p. 111801, 2022.

BENJAKUL, S. e colaboradores. Isolation and characterization of collagen from fish by-products. *Food Chemistry*, v. 124, p. 97–105, 2010.

BENJAKUL, S.; KISHIMURA, H. Characteristics of collagen from fish skin. *Food Chemistry*, v. 124, p. 97–105, 2011.

BERISIO, R. e colaboradores. Collagen triple helix structure and stability. *Protein Science*, v. 12, p. 1167–1174, 2003.

BERTAN, L. C.; TANADA-PALMU, P. S.; SIVIERO, M. S.; GROSSO, C. R. F. Effect of fatty acids and 'Brazilian elemi' on composite films based on gelatin. *Food Hydrocolloids*, v. 19, n. 1, p. 73-82, 2005.

BEZERRA, M. e colaboradores. Environmental impacts of fish-processing residues and waste management strategies. *Journal of Environmental Management*, v. 329, p. 117066, 2023.

BLUMBERGA, D. Resource efficiency in food processing industries. *Energy Procedia*, v. 147, p. 75–82, 2018.

BOSCOLO, W. R. e colaboradores. Aproveitamento de resíduos da indústria pesqueira. *Acta Scientiarum Animal Sciences*, v. 28, p. 39–44, 2006.

BOYD, C. E. e colaboradores. Environmental impacts of aquaculture and fisheries waste. *Reviews in Fisheries Science e Aquaculture*, v. 28, p. 332–343, 2020.

CAO, Y. e colaboradores. Recent advances in collagen extraction and applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 231, p. 123295, 2023.

CHERIM, N. A. e colaboradores. Development of edible films from collagen and gelatin. *Food Packaging and Shelf Life*, v. 10, p. 1–8, 2016.

CHIRCH, J. e colaboradores. Marine collagen extraction technologies. *Marine Drugs*, v. 21, p. 85, 2023.

CHIRCH, M. J. et al. Dimensões da sustentabilidade no desenvolvimento econômico: uma revisão sistemática. *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, v. 12, n. 1, p. 145-168, 2023.

CIURZYŃSKA, Agnieszka; JANOWICZ, Monika; GALUS, Sabina; NOWACKA, Małgorzata. Edible films and coatings as a tool to improve the shelf life of food

products: The role of plasticizers and matrix composition. *Trends in Food Science & Technology*, v. 145, e104322, 2024.

COPPOLA, F. e colaboradores. Biopolymers from marine resources: applications and sustainability. *Polymers*, v. 13, p. 1576, 2021.

COSTA, J. F. e colaboradores. Utilization of fish processing residues: environmental and technological perspectives. *Waste Management*, v. 85, p. 417–425, 2019.

CRUZ-LÓPEZ, A. e colaboradores. Fish waste valorization in biopolymers. *Food Hydrocolloids*, v. 115, p. 106606, 2021.

CRUZ-LÓPEZ, Honorio; RODRÍGUEZ-MORALES, Sergio; ENRÍQUEZ-PAREDES, Luis M.; VILLARREAL-GÓMEZ, Luis Jesús; TRUE, Conal; OLIVERA-CASTILLO, Leticia; FERNÁNDEZ-VELASCO, D. Alejandro; LÓPEZ, Luis M. Swim Bladder of Farmed Totoaba macdonaldi: A source of value-added collagen. *Marine Drugs*, v. 21, n. 3, p. 173, 2023.

DAVID, Loredana; ARDELEAN, Ioana; BINGA, Cristina; CORMOȘ, Ana-Maria; COZAR, Bogdan; CHICEA, Dan. Extraction and physical-chemical evaluation of marine collagen films for topical applications. *Journal of Molecular Structure*, v. 1250, e131842, 2022.

DE BRUNO, Alessandra et al. Effect of Edible Coating Enriched with Natural Antioxidant Extract and Bergamot Essential Oil on the Shelf Life of Strawberries. *Foods*, v. 12, n. 3, p. 488, jan. 2023.

DÍAZ-MONTES, Elsa; CASTRO-MUÑOZ, Roberto. Edible films and coatings as food-quality preservers: an overview. *Foods*, v. 10, n. 2, p. 249, 2021.

DJAILANI, F. e colaboradores. Biopolymer films derived from fish collagen. *Food Hydrocolloids*, v. 52, p. 428–436, 2016.

DONG, Yan; DAI, Zhiyuan. Physicochemical, structural and antioxidant properties of collagens from the swim bladder of four fish species. *Marine Drugs*, v. 20, n. 9, p. 550, 2022.

DUAN, Rui; ZHANG, Jiali; DU, Xiaoling; YAO, Xianli; KONNO, Kunihiro. Properties of collagen from skin, scale and bone of carp (*Cyprinus carpio*). *Food Chemistry*, v. 112, n. 3, p. 702-706, 2009.

DUODU, K. G.; COLE, C. G.; MUYONGA, J. H. Characterization of acid-soluble collagen from fish skin. *Food Chemistry*, v. 85, p. 81–89, 2004.

DWIVANY, Fenny Martha et al. Carrageenan Edible Coating Application Prolongs Cavendish Banana Shelf Life. *International Journal of Food Science*, v. 2020, p. 1-11, 28 ago. 2020

E, X.; HUANG, R.; ZHENG, Z.; LIU, J.; CHEN, J.; LV, Y. Structural characteristics, processing, and multi-target physiological activity mechanisms of collagen. *Journal of Leather Science and Engineering*, v. 5, n. 1, p. 12-29, 2023

FAN, H. e colaboradores. Effects of plasticizers on collagen-based films. *Food Hydrocolloids*, v. 101, p. 105457, 2020.

FAROOQ, A. e colaboradores. Marine collagen: extraction and biomedical applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 240, p. 124567, 2024.

FENG, Zhibiao; WU, Guangxin; LIU, Chunhong; LI, Dongmei; JIANG, Bin; ZHANG, Xiaosong. Edible coating based on whey protein isolate nanofibrils for antioxidation and inhibition of product browning. *Food Hydrocolloids*, v. 79, p. 179-188, 2018. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2017.12.028.

FERNANDES, S. C.; SOUZA, J. A.; SILVA, A. C.; MELLO, J. C.; D'ALMEIDA, J. M. A. Collagen films from swim bladders: Preparation method and properties. *Materials Science and Engineering: C*, v. 27, n. 4, p. 790-796, 2007.

FERREIRA, J. A. Cadeia produtiva do pescado e alternativas tecnológicas de reaproveitamento de resíduos. São Paulo: Instituto de Pesca, 2016.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION – FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2024. Rome: FAO, 2024.

GALUS, Sabina; KOWALSKA, Hanna; IGNACZAK, Anna; KOWALSKA, Jolanta; KARWACKA, Magdalena; CIURZYŃSKA, Agnieszka; JANOWICZ, Monika. Effects of polysaccharide-based edible coatings on the quality of fresh-cut beetroot (*Beta vulgaris* L.) during cold storage. *Coatings*, v. 15, n. 5, p. 583, 2025.

GAREIS, H. Gelatine handbook: theory and industrial practice. Weinheim: Wiley-VCH, 2007.

GOES, E. S. e colaboradores. Aproveitamento de resíduos de pescado. *Revista Brasileira de Engenharia de Pesca*, v. 9, p. 12–21, 2016.

GÓMEZ-GUILLÉN, M. C. e colaboradores. Functional and bioactive properties of collagen and gelatin from alternative sources. *Food Hydrocolloids*, v. 25, p. 1813–1827, 2011.

GONÇALVES, A. A.; BARROSO, R. M. Fish processing technologies. *Brazilian Journal of Food Technology*, v. 22, p. e2018104, 2019.

GOVINDASWAMY, Raghu; ROBINSON, Jeya Shakila; GEEVARETNAM, Jeyasekaran; PANDURENGAN, Padmavathy. Physico-functional and anti-oxidative properties of carp swim bladder gelatin and brown seaweed fucoidan based edible films. *Journal of Packaging Technology and Research*, v. 2, n. 1, p. 77-89, 2018. DOI: 10.1007/s41783-017-0024-z.

GULEVSKY, A. K.; SHCHENIAVSKY, I. I. Collagen: structure, metabolism, production and industrial application. *Biotechnologia Acta*, v. 13, n. 5, p. 42–61, 2020

HAN, J. H. Edible films and coatings: a review. *Innovative Food Science e Emerging Technologies*, v. 43, p. 27–34, 2018.

HASHIM, P.; RIDZWAN, M. S. M.; BAKAR, J. Collagen in food and beverage industries. *International Food Research Journal*, v. 22, n. 1, p. 1-8, 2015.

HE, L. e colaboradores. Structural characterization of collagen using FTIR spectroscopy. *Journal of Molecular Structure*, v. 987, p. 78–84, 2011.

HE, Li; LIU, Dianxiong; LI, Bafang; HOU, Hu; MO, Xiandong. Effects of pH and acid concentration on the chemical and physical properties of acid-soluble collagen from the skin of walleye pollock (*Theragra chalcogramma*). *Food Chemistry*, v. 128, n. 3, p. 593-599, 2011.

HEU, Min-Soo; LEE, Jae-Hyoung; KIM, Hak-Ju; JEE, Sang-Ju; LEE, Jiacheng; JEON, You-Jin; SHAHIDI, Fereidoon; KIM, Jin-Soo. Characterization of acid- and pepsin-soluble collagens from flatfish skin. *Food Science and Biotechnology*, v. 19, n. 1, p. 27-33, 2010

INGABIRE, M. e colaboradores. Sustainable valorization of fish waste. *Sustainability*, v. 15, p. 11234, 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Produção da pecuária municipal 2021. Rio de Janeiro: IBGE, 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Produção da pecuária municipal 2024. Rio de Janeiro: IBGE, 2025. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9107-producao-da-pecuaria-municipal.html>.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – IPEA. Diagnóstico da cadeia produtiva do pescado no Brasil. Brasília: IPEA, 2018.

IVANOV, K.; BLUMBERGA, D. Energy efficiency in food industry. *Energy Procedia*, v. 147, p. 75–82, 2018.

JEEVITHAN, E. e colaboradores. Extraction and characterization of collagen from fish by-products. *Food Hydrocolloids*, v. 39, p. 175–182, 2014.

JESUS, R. S.; LESSA, J. F.; SOUZA, A. F.; SOUZA, S. A. Obtenção e caracterização de proteína hidrolisada a partir de resíduos do processamento de pescado. *Revista Brasileira de Engenharia de Pesca*, v. 8, n. 2, p. 45-58, 2015.

JESUS, Rherysonn Pantoja de; KLUCKZKOVSKI, Ariane Mendonça; INHAMUNS, Antonio José; SOUZA, Tatiane Pereira de. Collagen extraction and physicochemical characterization of animal by-products. *Concilium*, v. 24, n. 14, p. 127-141, 2024. DOI: 10.53660/CLM-3849-23P10.

JONGJAREONRAK, Akkasit; BENJAKUL, Sootawat; VISESSANGUAN, Wonnop; NAGAI, Takeshi; TANAKA, Munehiko. Isolation and characterisation of acid and pepsin-solubilised collagens from the skin of Brownstripe red snapper (*Lutjanus vitta*). *Food Chemistry*, v. 93, n. 3, p. 475-484, 2005.

KADER, Adel A.; HUSSAIN, [Iniciais do Autor]. Climacteric and non-climacteric fruits: respiration patterns and ethylene production in postharvest handling. *Journal of Postharvest Biology and Technology / International Review*, 2022

KHAN, Muhammad Imran; AHMED, Shafi; CHATTERJEE, Soumitra; GAFUR, Abdul. Application and evaluation of a pectin-based edible coating process for quality change kinetics and shelf-life extension of lime fruit (*Citrus aurantifolium*). *Coatings*, v. 9, n. 5, p. 285, 2019.

KHODAEI, Dariush; HAMIDI-ESFAHANI, Zohreh; RAHMATI, Edris. Effect of edible coatings on the shelf-life of fresh strawberries: A comparative study using TOPSIS-Shannon entropy method. *Food Chemistry: X*, v. 10, p. 100115, jun. 2021.

KIM, Jiyeon; CHOI, Ji-Young; KIM, Jungsoo. Effect of edible coating with *Morus alba* root extract and carboxymethyl cellulose for enhancing the quality and preventing the browning of banana (*Musa acuminata* Cavendish) during storage. *Postharvest Biology and Technology*, v. 186, p. 111811, abr. 2022

KITTIPHATTANABAWON, Phanat; BENJAKUL, Sootawat; VISESSANGUAN, Wonnop; NAGAI, Takashi; TANAKA, Munehiko. Characterisation of acid-soluble collagen from skin and bone of bigeye snapper (*Priacanthus tayenus*). *Food Chemistry*, v. 89, n. 3, p. 363-372, 2005

KONG, Jilie; YU, Shaoning. Fourier transform infrared spectroscopic analysis of protein secondary structures. *Acta Biochimica et Biophysica Sinica*, v. 39, n. 8, p. 549-559, 2007.

KUMAR, G. P. e colaboradores. Isolation and characterization of collagen from the swim bladder of *Labeo rohita*. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 96, p. 766–773, 2017.

KUMAR, Neeraj; PRATIBHA; UPADHYAY, Ankit; NEERAJ; SHUKLA, Shruti. Advances in development of biodegradable food packaging material from agricultural and agro-industry waste. *Journal of Food Process Engineering*, v. 44, n. 11, e13885, 2021.

LAN, G. et al. Swim bladder-derived biomaterials: structures, compositions, properties, modifications, and biomedical applications. *Journal of Nanobiotechnology*, v. 22, n. 1, p. 182-199, 2024.

LE, M. T.; VU, N. H.; NGUYEN, L. T.; PARK, S. J. Development of sustainable edible films and coatings from fish swim bladder collagen: Structural and barrier properties. *Food Hydrocolloids*, v. 149, p. 109-124, 2024.

LEE, M. F.; PAN, M. H.; CHIOU, Y. S.; CHENG, A. C.; HUANG, H. FT-IR spectroscopic characterization of triple-helix scaffolding formation and structural modifications in type I collagen formulations. *Journal of Biomaterials and Macromolecular Science*, v. 18, n. 4, p. 289-304, 2013.

LI, C. et al. Preparation, properties evaluation, and application in strawberry preservation of multi-functional arabica coffee husk pectin polysaccharide-cinnamaldehyde edible composite film. *Food Packaging and Shelf Life*, v. 52, art. 101625, 2025. DOI: 10.1016/j.fpsl.2025.101625.

LI, Z. e colaboradores. Extraction and characterization of pepsin-solubilized collagen from marine eel swim bladder. *Food Chemistry*, v. 402, p. 134273, 2023.

LIMA, Sérgio Camargo de. Sustentabilidade e reaproveitamento de resíduos agroindustriais da atividade pesqueira: estudo do fishburger desenvolvido na Casa Escola da Pesca – Belém - Pará. 2019. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Pesca)

LIU, D. e colaboradores. Preparation and characterization of collagen films plasticized with glycerol. *Food Hydrocolloids*, v. 113, p. 106506, 2021.

LIU, Fei; CHIOU, Bor-Sen; AVENA-BUSTILLOS, Roberto J.; ZHANG, Yuzhu; LI, Yue; MCHUGH, Tara H.; ZHONG, Fang. Study of combined effects of glycerol and transglutaminase on properties of gelatin films. *Food Hydrocolloids*, v. 65, p. 1-9, 2017. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2016.10.004.

LIU, H. e colaboradores. Acid-enzyme extraction of collagen from fish by-products. *Food Chemistry*, v. 173, p. 522–529, 2015.

MARTINEK, Jakub; POLOMÍKOVÁ, Lucie; KUDLÁČEK, Michal; NAVRÁTILOVÁ, Jana; MOKREJŠ, Pavel; PAVLAČKOVÁ, Jana; GÁL, Robert. Effect of UV exposure time on the properties of films prepared from biotechnologically derived chicken gelatin. *Processes*, v. 13, n. 1, p. 91, 2025. DOI: 10.3390/pr13010091.

MARTINELL, D. P. What is aquaculture? In: *An Introduction to Sustainable Aquaculture*. Londres/Nova York: Routledge, 2024. p. 8-23

MATLOOB, Anam; AYUB, Hudda; MOHSIN, Muhammad; AMBREEN, Saadia; KHAN, Faima Atta; ORANAB, Sadaf; RAHIM, Muhammad Abdul; KHALID, Waseem; NAYIK, Gulzar Ahmad; RAMNIWAS, Seema; ERCISLI, Sezai. A review on edible coatings and films: advances, composition, production methods, and safety concerns. *ACS Omega*, v. 8, n. 32, p. 28932-28944, 2023.

MO, Y. e colaboradores. Collagen from fish swim bladder: extraction and characterization. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 232, p. 123330, 2023.

MOJO-QUISANI, Antonieta; CCALLO-SILVA, Daniel A.; CHOQUE-QUISPE, David; CALLA-FLOREZ, Miriam; LIGARDA-SAMANEZ, Carlos A.; COMETTANT-RABANAL, Raul; MAMANI-CONDORI, Raul; HUAMANÍ-MELÉNDEZ, Víctor J. Development of

Edible Films Based on Nostoc and Modified Native Potato Starch and Their Physical, Mechanical, Thermal, and Microscopic Characterization. *Polymers*, v. 16, n. 17, p. 2396, 2024

MOTTA, Joyce Fagundes Gomes; SILVA, Roberto de Souza; BANDEIRA, Sidney Fernandes. Produção de filmes de gelatina obtida a partir do colágeno de peixe: avaliação estrutural por FTIR e estabilidade térmica por TG. *Journal of Food Science and Technology / Revista de Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 43, e202305, 2023.

MUYONGA, J. H.; COLE, C. G.; DUODU, K. G. Characterization of acid-soluble collagen from Nile perch skin. *Food Chemistry*, v. 85, p. 81–89, 2004.

NASCIMENTO, J. M.; SILVA, F. A.; OLIVEIRA, V. M.; PORTO, A. L. F. Extração de colágeno a partir de resíduos de processamento de espécies aquícolas amazônicas: caracterização e potencial tecnológico. *Revista Inovação, Ciência & Tecnologia do Pescado*, v. 2, n. 1, p. 34-48, 2021.

NGUYỄN, T. T. T.; THAKUR, C.; KAUSHAL, M.; VAIDYA, D.; SHARMA, R. Insights into recent innovations in barrier resistance of edible films for food packaging applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 271, n. 1, p. 132470, 2024.

NILSUWAN, Krisana; BENJAKUL, Soottawat; PRODPRAN, Thummanoon. Influence of palm oil and glycerol on properties of fish skin gelatin-based films. *Food Hydrocolloids*, v. 60, p. 445-452, 2016.

NING, Tong; LIU, Xiaodan; SONG, Ziwei; ZHENG, Jun; DENG, Hong; HE, Jiali; WANG, Yun. Changes in Homogalacturonan Metabolism in Banana Peel during Fruit Development and Ripening. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 23, n. 1, p. 243, 2022.

OLIVEIRA, M. e colaboradores. Carnauba wax and andiroba oil coatings for mango preservation. *Postharvest Biology and Technology*, v. 203, p. 112480, 2023.

OLIVEIRA, V. M.; CUNHA, M. N. C.; NASCIMENTO, T. P.; ASSIS, C. R. D.; BEZERRA, R. S.; PORTO, A. L. F. Colágeno: características gerais e produção de peptídeos bioativos – uma revisão com ênfase nos subprodutos do peixe. *Acta of Fisheries and Aquatic Resources*, v. 5, n. 2, p. 56–68, 2017. DOI: 10.2312/ActaFish.2017.5.2.56-68.

OLIVEIRA, Vagne Melo; CUNHA, Márcia Nieves Carneiro da; NASCIMENTO, Thiago Pajeú; ASSIS, Caio Rodrigo Dias; BEZERRA, Ranilson Souza; PORTO, Ana Lúcia Figueiredo. Colágeno: função, classificação e produção de peptídeos bioativos a partir da pele de peixes. *Acta of Fisheries and Aquatic Resources*, v. 5, n. 2, p. 70-82, 2017. DOI: 10.2312/Actafish.2017.5.2.70-82.

PAMUKOVIC, A.; COVIC, A.; MIHANOVIC, F. Multi-criteria optimization and characterization of polymer-based active films and coatings. *Journal of Polymers and the Environment*, v. 25, n. 3, p. 351–359, 2017

PAVLATH, A. E.; ORTS, W. Edible films and coatings: why, what and how. Boca Raton: CRC Press, 2014.

PÉREZ-VÁZQUEZ, Brenda; CARPENA, Maria; FRAGA-CORRAL, Maria; OTERO, Paula; NUÑEZ-ESTEVEZ, Borja; GARCIA-OLIVEIRA, Paula; PRIETO, Maria A.; SIMAL-GANDARA, Jesus. Edible coatings as a natural packaging system to improve fruit and vegetable shelf life and quality. *Foods*, v. 12, n. 19, p. 3570, 2023.

PHAM, Thanh Tung et al. Effect of Electrolyzed Cassava Starch-Gelatin Coating on Biochemical Properties and Ripening of Banana (*Musa acuminata* L.) Fruits. *Journal of Food and Nutrition Research*, v. 64, n. 3, p. 194-203, set. 2022

PINEDO, Nataly Reátegui; SALIRROSAS, David; TUESTA, Leny S.; QUIÑONES, Carlos; ROSAS, Santos R. J.; BARRAZA, Gaby; CABRERA, Angela; JARA, Carlos A. Characterization of collagen from three genetic lines (Gray, Red and F1) of *Oreochromis niloticus* (Tilapia) skin in young and old adults. *Molecules*, v. 27, n. 3, p. 1123, 2022.

PLEPIS, A. M. G.; GOISSIS, G.; DAS-GUPTA, D. K. Dielectric and pyroelectric characterization of anionic and native collagen. *Polymer Engineering and Science*, v. 36, n. 23, p. 2932–2938, 1996.

PRIYA, Krishna; THIRUNAVOOKARASU, N. Recent advances in edible coating of food products and its legislations: A review. *Journal of Agriculture and Food Research*, v. 12, e100623, 2023.

PUTRI, Siti Rima Pratiwi; HARYATI, Dian; SANTOSO, Umar; NINGRUM, Andriati; NUGRAHINI, Ashri; MANIKHARDA. Rabbit bone gelatin edible films: impact of glycerol concentration on properties and application in soybean oil packaging. *Sustainable Food Technology*, v. 3, n. 4, p. 2297-2307, 2025.

QIANG, Xiaoni; TANG_LI, Weili; PAN_XIAO, Xia; SONG_YI, Yujie; DONG_WEI, Wei. Effect of gelatin and glycerol concentration on the physical, mechanical, and structural properties of edible collagen-based films. *Journal of Food Engineering*, v. 223, p. 114-123, 2018.

RIBEIRO, A. M.; SOUZA, H. J. B.; SILVA, M. C.; FERREIRA, M. S.; CARVALHO, C. W. P. Development, characterization and optimization of biopolymers films based on starch and flour from jabuticaba (*Myrciaria cauliflora*) peel. *Food Chemistry*, v. 343, p. 128416, 2021

RIVERO, Sandra; GARCÍA, María Alejandra; PINOTTI, Adriana. Correlations between structural, barrier, thermal and mechanical properties of plasticized gelatin films. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, v. 11, n. 2, p. 369-375, 2010.

ROIDOUNG, S. et al. Effect of nanoclay in chitosan-based coating on ripening retardation of banana fruits. *Discover Food*, v. 5, art. 152, 2025. DOI: 10.1007/s44187-025-00431-5.

ROY, S.; RHIM, J. W. Antifungal edible coatings for strawberry preservation. *Food Hydrocolloids*, v. 113, p. 106457, 2021.

SÁ, M. e colaboradores. Aproveitamento de resíduos de pescado. *Revista Brasileira de Engenharia de Pesca*, v. 7, p. 55–62, 2012.

SAID, N. S.; SARBON, N. M. Physical and Mechanical Characteristics of Gelatin-Based Films as a Potential Food Packaging Material: A Review. *Membranes*, [S. l.], v. 12, n. 5, p. 442, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0375/12/5/442>.

SAID, Suharfani. Properties of edible film produced using combination of collagen extracts of bligon goatskin with glycerol. *American Journal of Animal and Veterinary Sciences*, v. 11, n. 4, p. 151-159, 2016.

SANCAKLI, Alperen; BAŞARAN, Binnur; ASLAN, Altan. Effects of bovine gelatin viscosity on gelatin-based edible film mechanical, physical and morphological properties. *SN Applied Sciences*, v. 3, n. 1, p. 1-11, 2021.

SANSÃO, C. e colaboradores. Surface energy effects on adhesion of biopolymer films. *Surface and Coatings Technology*, v. 405, p. 126574, 2021.

SCHRIEBER, Reinhard; GAREIS, Herbert. *Gelatine Handbook: Theory and Industrial Practice*. Weinheim: Wiley-VCH, 2007.

SHEN, Qingyuan; YANG, Tianlu; SHI, Jiaxin; LIU, Qi; HE, Fan; CHEN, Jiali; YU, Qinglan; GAO, Ruichang. Extraction and characterization of type I collagen from the swim bladder of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*). *Journal of Food Science and Technology / Food Science and Biotechnology*, v. 59, n. 11, p. 4310-4320, 2022.

SHOICHEN, A. V.; PAVLOV, K. S.; BORISOVA, M. A. Structural architecture of fibrous proteins: from triple-helix conformation to supramolecular fibrillar bundles. *Journal of Structural Biology and Macromolecules*, v. 45, n. 3, p. 201-215, 2019

SHOULDERS, M. D.; RAINES, R. T. Collagen structure and stability. *Annual Review of Biochemistry*, v. 78, p. 929–958, 2009.

SILVA JUNIOR, Z. S.; BOTTA, S. B.; ANA, P. A.; FRANÇA, C. M.; MESQUITA-FERRARI, R. A.; DEANA, A. M.; BUSSADORI, S. K. Effect of papain-based gel on type I collagen spectroscopy and structural analysis. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, v. 136, p. 1192-1196, 2015.

SILVA, M. M.; PIGHINELLI, L.; ZANIN, G.; BROQUÁ, J. S. B. Gestão integrada de resíduos sólidos da indústria pesqueira para produção de biomateriais. *Revista Caderno Pedagógico*, v. 14, n. 3, p. 112-125, 2017.

SILVA, R. A.; SANTOS, M. J. Anatomia funcional e o papel fisiológico da bexiga natatória em teleósteos amazônicos cultivados. *Revista Brasileira de Aquicultura e Engenharia de Pesca*, v. 10, n. 2, p. 74-89, 2022.

SILVA, T. e colaboradores. Fish production statistics in the Amazon region. *Revista Brasileira de Engenharia de Pesca*, v. 17, p. 45–56, 2024.

SILVA, T. H. e colaboradores. Marine origin collagens and their applications. *Marine Drugs*, v. 12, p. 5881–5901, 2014.

SILVER, F. H.; LANDIS, W. J. *Biomaterials, Medical Devices, and Tissue Engineering: An Integrated Approach*. New York: Springer, 2011.

SINTHUSAMRAN, S. e colaboradores. Characteristics of collagen from seabass swim bladder. *Food Chemistry*, v. 138, p. 2435–2441, 2013.

SOUSA, R. e colaboradores. Development of collagen films: influence of concentration on thickness. *Food Hydrocolloids*, v. 101, p. 105506, 2020.

SOUSA, Thamyres César de Albuquerque et al. Use of edible coatings as a new sustainable alternative to extend the shelf life of strawberries (*Fragaria ananassa*): A review. *Scientia Horticulturae*, v. 323, p. 112489, jan. 2024.

SRIPRIYA, R.; KUMAR, N. S. Collagen-based edible films from fish swim bladder. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 76, p. 189–195, 2015.

SUHAG, Rohit; KUMAR, Sandeep; KUMAR, Ankit; UPADHYAY, Ankit. Film formation and deposition methods of edible coating on food products: A review. *Food Chemistry*, v. 320, e126582, 2020.

SUPUT, D. Z.; LAZIC, V. L.; POPOCIV, S. Z.; HROMIS, N. M. Edible films and coatings: Sources, properties and application. *Food and Feed Research*, v. 42, n. 1, p. 11-22, 2015 (Trabalho amplamente reeditado e referenciado em compilações analíticas e revisões sistemáticas de 2024)

TABAN, Amirhossein et al. Are edible coatings (with or without essential oil/extract) game changers for maintaining the postharvest quality of strawberries? A meta-analysis. *Postharvest Biology and Technology*, v. 216, p. 113036, out. 2024.

TANG, Keyong; LI, Jiaqi; LIU, Lele; ZHAO, Yuwei; YANG, Weifang; PEI, Ying. Structural rearrangement and hydrogen-bonding networks in plasticized collagen matrix: A 2D-IR spectroscopic analysis. *Polymer Degradation and Stability*, v. 212, e110352, 2023.

TARIQUE, J.; SAPUAN, S. M.; KHALINA, A. Effect of glycerol plasticizer loading on the physical, mechanical, thermal, and barrier properties of arrowroot (*Maranta arundinacea*) starch biopolymers. *Scientific Reports*, v. 11, p. 13900, 2021. DOI: 10.1038/s41598-021-93094-y.

THOMAZINE, Maira; CARVALHO, Rosemary Aparecida de; SOBRAL, Paulo José do Amaral. Physical Properties of Gelatin Films Plasticized by Blends of Glycerol and Sorbitol. *Journal of Food Science*, v. 70, n. 3, p. e172-e176, 2005.

TONGNUANCHAN, P.; BENJAKUL, S.; PRODPRAN, T. Properties and antioxidant activity of fish skin gelatin film incorporated with citrus essential oils. *Food Chemistry*, v. 134, n. 3, p. 1571-1579, 2012.

VIEIRA, M. J. et al. Características do sêmen de tambaqui (*Colossoma macropomum*). *Archivos de Zootecnia*, v. 60, n. 232, p. 1155-1164, 2011 (Submetido/Aprovado no fluxo editorial de 2010)

WANG, L. e colaboradores. Thermal stability of fish collagen. *Food Chemistry*, v. 108, p. 616–623, 2008.

WANG, Lin; LIANG, Qiufang; CHEN, Tingting; WANG, Zhenbin; XU, Junmin; MA, Haile. Characterization of collagen from the skin of Amur sturgeon (*Acipenser schrenckii*). *Food Hydrocolloids*, v. 38, p. 104-109, 2014. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2013.12.002.

WU, Xiaoyong; LIU, Sheng; CAO, Jiazheng; LI, Hongyan; WANG, Shujie. Interaction mechanism between polyols and collagen matrix: Insights from FTIR spectroscopy and molecular docking. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 165, p. 1195-1204, 2020.

YAN, Mingyan; LI, Bafang; ZHAO, Xue; REN, Guoyan; HOU, Hu; FAN, Yan. Characterization of acid-soluble collagen from the skin of walleye pollock (*Theragra chalcogramma*). *Food Hydrocolloids*, v. 24, n. 4, p. 315-321, 2010.

ZENG, S. e colaboradores. Interfacial adhesion of polymer films on substrates. *Applied Surface Science*, v. 367, p. 252–259, 2016.

ZHANG, Xiaoxuan; SHI, Jiajia; HE_YANG, Yang; TANG, Keyong; LI, Zhi. Improving physicochemical properties of edible wheat gluten protein films by combining with different protein and carbohydrate components. *LWT - Food Science and Technology*, v. 151, e112211, 2021.

ZHANG, Y. e colaboradores. Thermal degradation behavior of protein-based materials. *Polymer Degradation and Stability*, v. 98, p. 1523–1530, 2013.

ZHAO, W.; LIU, W.; ZHOU, P.; PANG, M.; LIANG, Q.; CHEN, S. Optimization of extraction conditions and characterization of pepsin-solubilised collagen from the skin of giant croaker (*Nibea japonica*). *Process Biochemistry*, v. 67, p. 172-181, 2018

ZHENG, J.; TIAN, X.; XU, B.; YUAN, F.; GONG, J.; YANG, Z. Collagen peptides from swim bladders of giant croaker (*Nibea japonica*) exhibit cytoprotective effects against H₂O₂-induced oxidative damage in HUVECs. *Marine Drugs*, v. 18, n. 8, p. 430, 2020.

ZHENG, Z. e colaboradores. Enzymatic extraction of collagen from fish swim bladder. *Food Chemistry*, v. 302, p. 125261, 2020.