



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIA DOS ALIMENTOS

Gabriela de Amorim da Silva

Desenvolvimento de filmes comestíveis a base de algas

FLORIANÓPOLIS

2024

GABRIELA DE AMORIM DA SILVA

Desenvolvimento de filmes comestíveis à base de algas

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção de título de Mestra em Ciência dos Alimentos.

Orientador: Prof. Giustino Tribuzi, Dr.
Coorientador: Prof. Fábio de Farias Neves, Dr.

FLORIANÓPOLIS

2024

Silva, Gabriela de Amorim da
Desenvolvimento de filmes comestíveis a base de algas /
Gabriela de Amorim da Silva ; orientador, Giustino Tribuzi,
coorientador, Fábio de Farias Neves, 2024.
123 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação
em Ciência dos Alimentos, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Ciência dos Alimentos. 2. Cinética de Secagem. 3. Casting.
4. *Ulva lactuca*. 5. *Kappaphycus alvarezii*. I. Tribuzi, Giustino.
II. Neves, Fábio de Farias. III. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos.
IV. Título.

Gabriela de Amorim da Silva

Desenvolvimento de filmes comestíveis a base de algas

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 15 de dezembro de 2023, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Ângelo Paggi Matos, Dr.

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

Profa. Katia Rezzadori, Dra.

Universidade Federal de Santa Catarina

Profa. Marta Fernanda Zotarelli, Dra.

Universidade Federal de Uberlândia

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestra em Ciência dos Alimentos



Coordenação do Programa de Pós-Graduação



Prof. Giustino Tribuzi, Dr.

Orientador

Florianópolis, 2024

*Dedico esse trabalho aos meus amados
pais, Maria Terezinha e Nivaldo,
à minha querida irmã, Heloísa, e ao meu
companheiro de vida, Gabriel*

AGRADECIMENTOS

Expresso profunda gratidão:

- A Deus, por permitir-me viver todos os dias que fizeram parte deste trabalho, mantendo-me firme e colocando pessoas maravilhosas em meu caminho.
- Aos meus pais e à minha irmã, que nunca mediram esforços para me proporcionar tudo o que foi necessário e essencial em minha vida.
- Ao meu noivo, por estar nesta jornada comigo, compartilhando minhas angústias e conquistas, por sua compreensão, companheirismo e apoio diário.
- À família do meu noivo, por sempre me motivar a continuar.
- As amigas que fiz durante o período do mestrado, Fabiele e Gabrielly, meu sincero agradecimento por todo apoio, por sempre estarem disponíveis para ouvir, aconselhar e oferecer assistência ao longo deste período.
- À minha amiga de longa data, Francihellen, por sempre me ouvir durante essa jornada que trilhamos juntas.
- Ao Professor Giustino Tribuzi, pelas horas dedicadas a melhorar meu trabalho e pelos conselhos. Agradeço imensamente por acreditar no meu trabalho e me dar suporte.
- Ao Professor Fábio de Farias Neves, por prontamente concordar em ser meu coorientador e contribuir para a execução do trabalho.
- Aos colegas do Laboratório de Pescados e Derivados, em especial ao Sebastião.
- Ao auxílio sempre dado pela Jusci, do Laboratório de Físico-química, e à equipe do PROFI por toda a assistência durante a execução de algumas análises, em especial a Raquel e a Amanda.
- Ao pessoal da Pori, Vitor e Erickson, pela ajuda na coleta e limpeza da *Ulva lactuca*.
- À empresa Cavallo Marinho, por fornecer a biomassa de *Kappaphycus alvarezii*.
- À banca examinadora pela disposição, correções e sugestões.
- À Universidade Federal de Santa Catarina por proporcionar este curso de pós-graduação.
- Ao CNPq, pela concessão da bolsa e pela oportunidade de estudo.
- A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

O consumo global do filme comestível comercial nori produzidos a partir de algas marinhas é uma realidade estabelecida, embora sua produção seja concentrada em países asiáticos. Em resposta à crescente demanda por culinária asiática no Brasil, surge a necessidade de explorar alternativas para a importação desse produto, especificamente por meio da produção de filmes comestíveis usando algas encontradas na costa brasileira. Para investigar essa possibilidade, foram formulados filmes comestíveis a partir de misturas das algas *Ulva lactuca* e *Kappaphycus alvarezii*, com concentrações variando de 80% de *U. lactuca* e 20% de *K. alvarezii* a uma proporção igual de 50% de cada alga (m/m). Cada composição foi submetida a um processo de aquecimento a 90 °C, com duração entre 3 e 5 minutos. Os resultados desta pesquisa mostraram que, quando submetidas à análise reológica, as suspensões formadoras de filmes exibiram comportamento pseudoplástico e diminuíram a viscosidade quando a *K. alvarezii* foi adicionada. Em contraste, houve um aumento na resistência dos géis aquecidos à medida que a concentração de *K. alvarezii* aumentou e com o aumento do tempo de aquecimento. A análise da cinética de secagem dos filmes demonstrou que um aumento na concentração de *K. alvarezii* aumentou também a taxa de secagem durante a fase de taxa constante, sugerindo uma possível correlação com a maior concentração de solvente na suspensão antes do processo. A uniformidade da superfície dos filmes melhorou à medida que a concentração de *K. alvarezii* aumentou e com o aumento do tempo de aquecimento. À medida que a concentração de *K. alvarezii* aumentou, a intensidade da cor verde dos filmes diminuiu, enquanto a transparência e solubilidade aumentaram. Filmes com maior concentração de *K. alvarezii* apresentaram maior resistência à tração, embora não tenham demonstrado um aumento na capacidade de alongamento. Os resultados obtidos na isoterma de sorção revelam uma curva característica do tipo II, de acordo com o modelo BET, para todos os tratamentos. Além disso, a análise de modelagem usando o modelo GAB sugere que os tratamentos com tempos de aquecimento mais longos apresentaram ligações mais fortes entre as moléculas e os sítios de ligação, obtendo valores mais altos do parâmetro C. O aumento na concentração de *K. alvarezii* melhorou a uniformidade e maleabilidade dos filmes, mas comprometeu sua resistência e espessura. Dessa forma, os filmes comestíveis produzidos demonstraram características promissoras, embora ainda não tenham atingido as propriedades do nori comercial. Considerando parâmetros como solubilidade, cor e espessura, o tratamento que se destacou em relação ao nori foi aquele com 70% de *U. lactuca* e 30% de *K. alvarezii*. No entanto, com base em testes de aparência e resistência mecânica à tração, o filme com concentração de 60% de *U. lactuca* e 40% de *K. alvarezii* apresentou desempenho superior. Destaca-se que esses filmes são elaborados exclusivamente com algas marinhas e água, em conformidade com a abordagem minimalista do nori. Este estudo estabelece uma base para pesquisas futuras no desenvolvimento de filmes comestíveis derivados de algas marinhas.

Palavras-chave: Cinética de secagem; *Casting*; *Ulva lactuca*; *Kappaphycus alvarezii*.

ABSTRACT

The global consumption of commercial edible nori films produced from seaweed is an established reality, although its production is concentrated in Asian countries. In response to the growing demand for Asian cuisine in Brazil, there is a need to explore alternatives to importing this product, specifically through the production of edible films using seaweed found along the Brazilian coast. To investigate this possibility, edible films were formulated from blends of *Ulva lactuca* and *Kappaphycus alvarezii* seaweeds, with concentrations ranging from 80% *U. lactuca* and 20% *K. alvarezii* to an equal proportion of 50% of each algae (w/w). Each composition underwent a heating process at 90 °C, lasting between 3 and 5 minutes. The results of this research showed that when subjected to rheological analysis, the film-forming suspensions exhibited pseudoplastic behavior and decreased viscosity when *K. alvarezii* was added. In contrast, there was an increase in the strength of the heated gels as the concentration of *K. alvarezii* increased and with longer heating times. Analysis of the drying kinetics of the films demonstrated that an increase in the concentration of *K. alvarezii* also increased the drying rate during the constant rate phase, suggesting a possible correlation with the higher solvent concentration in the suspension before the process. The surface uniformity of the films improved as the concentration of *K. alvarezii* increased and with longer heating times. As the concentration of *K. alvarezii* increased, the green color intensity of the films decreased, while transparency and solubility increased. Films with higher concentrations of *K. alvarezii* showed greater tensile strength, although they did not demonstrate an increase in elongation capacity. The results obtained from the sorption isotherm revealed a characteristic Type II curve, according to the BET model, for all treatments. Additionally, modeling analysis using the GAB model suggested that treatments with longer heating times exhibited stronger bonds between molecules and binding sites, yielding higher values of the parameter C. The increase in the concentration of *K. alvarezii* improved the uniformity and malleability of the films but compromised their strength and thickness. Thus, the produced edible films demonstrated promising characteristics, although they have not yet reached the properties of commercial nori. Considering parameters such as solubility, color, and thickness, the treatment that stood out in relation to nori was the one with 70% *U. lactuca* and 30% *K. alvarezii*. However, based on appearance tests and mechanical tensile strength, the film with a concentration of 60% *U. lactuca* and 40% *K. alvarezii* showed superior performance. It is noteworthy that these films are exclusively crafted with seaweed and water, in line with the minimalist approach of nori. This study establishes a foundation for future research in the development of edible films derived from seaweed.

Keywords: Drying kinetics; Casting; *Ulva lactuca*; *Kappaphycus alvarezii*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Possíveis aplicações das algas marinhas e seus extratos na indústria dos alimentos	26
Figura 2 – <i>Ulva lactuca</i>	27
Figura 3 – <i>Kappaphycus alvarezii</i>	29
Figura 4 – Aplicações da carragena na indústria alimentícia	36
Figura 5 – Isoterma típicas de sorção e dessorção de umidade em um alimento	41
Figura 6 – Tipos de isotermas de sorção	41
Figura 7 – Representação esquemática do movimento da umidade durante a secagem	42
Figura 8 – Curvas típicas da secagem convectiva	43
Figura 9 – Curva típica de tensão-deformação para filme polimérico submetido a um ensaio de tração	47
Figura 10 – Imagens ilustrativas das etapas de produção dos pós das algas marinhas (<i>U. lactuca</i> e <i>K. alvarezii</i>)	53
Figura 11 – Ponto de coleta da <i>U. lactuca</i> (a) e do cultivo da <i>K. alvarezii</i> (b)	54
Figura 12 – Etapas do preparo das suspensões e obtenção dos filmes	56
Figura 13 – Esquema ilustrativo da placa de acrílico utilizada como molde para os filmes comestíveis	58
Figura 14 – Esquema do corpo de prova	68
Figura 15 – Evolução temporal da umidade ajustado linearmente na taxa constante (a), atividade de água (a_w) (b) e temperatura da superfície (c) da <i>U. lactuca</i> durante a secagem. Símbolos diferentes representam as réplicas	72
Figura 16 – Evolução temporal da umidade ajustado linearmente na taxa constante (esquerda) e temperatura da superfície (direita) da <i>K. alvarezii</i> na primeira (a) e na segunda (b) secagem. Símbolos diferentes representam as réplicas	74
Figura 17 – Curvas de escoamento (σ) versus taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) das suspensões filmogênicas preparadas com algas <i>U. lactuca</i> (a) e <i>K. alvarezii</i> (b), e suas misturas de 80U20K (c), 70U30K (d), 60U40K (e) e 50U50K (f). Os círculos pretos representam a curva ascendente, enquanto o círculo cinza a curva descendente	79
Figura 18 – Viscosidade versus taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) das suspensões filmogênicas preparadas com algas <i>U. lactuca</i> (a) e <i>K. alvarezii</i> (b), e suas misturas de 80U20K (c), 70U30K (d), 60U40K (e) e 50U50K (f). Os círculos pretos representam a curva ascendente, enquanto o círculo cinza a curva descendente	80

Figura 19 – Evolução temporal da umidade (X_s) com o ajuste linear durante a secagem convectiva a 40 °C. Símbolos diferentes representam as réplicas das secagens	86
Figura 20 – Evolução temporal da temperatura durante a secagem convectiva a 40 °C. Símbolos diferentes representam as réplicas das secagens.....	87
Figura 21 – Imagens dos filmes comestíveis produzidos e do filme comercial (nori) usado como referência	91
Figura 22 – Micrografias da superfície das amostras de pó das algas marinhas	92
Figura 23 – Micrografias da superfície e das fraturas dos filmes comestíveis e nori.....	93
Figura 24 – Opacidade (a) e transparência (b) dos filmes comestíveis e nori.....	96
Figura 25 – Espectro de absorção dos filmes comestíveis elaborados com diferentes concentrações de <i>U. lactuca</i> e <i>K. alvarezii</i> na região de comprimento de onda visível.....	97
Figura 26 – Triplicadas das isotermas de sorção dos filmes comestíveis	104

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais algas marinhas consumidas globalmente: comercialização e consumo por grupo.....	25
Quadro 2 – Métodos de extração de ulvano de diferentes espécies de <i>Ulva</i>	34
Quadro 3 – Filmes comestíveis produzidos com o uso de biomassa de algas marinhas ou extratos delas. Onde, σ_{rup} é tensão de ruptura, ϵ_{rup} é alongamento de ruptura e Y é módulo de Young	49
Quadro 4 – Análises realizadas com os pós, suspensões e filmes das algas marinhas.....	59
Quadro 5 – Pontos pré-determinados de retirada para coleta de dados durante a secagem das algas marinhas e dos filmes	61
Quadro 6 – Modelos matemáticos aplicados aos dados obtidos na cinética de secagem.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição aproximada (% b.s.) das algas marinhas <i>Ulva lactuca</i> e <i>Kappaphycus alvarezii</i>	28
Tabela 2 – Revisão de artigos sobre a secagem de espécies dos gêneros <i>Ulva</i> e <i>Kappaphycus</i> e dos filmes obtidos a partir da biomassa ou extratos dessas algas marinhas	39
Tabela 3 – Códigos dos tratamentos elaborados variando as concentrações de <i>U. lactuca</i> (U) e <i>K. alvarezii</i> (K) e os seus respectivos tempos de aquecimento (t)	57
Tabela 4 – Atividade de água das soluções salinas saturadas a 25 °C	69
Tabela 5 – Modelos matemáticos ajustados aos dados de cinética de secagem das algas marinhas	75
Tabela 6 – Composição centesimal das algas marinhas secas <i>U. lactuca</i> e <i>K. alvarezii</i>	76
Tabela 7 – pH das suspensões elaboradas	78
Tabela 8 – Ajuste do modelo matemático de Herschel-Bulkley aos dados de escoamento das curvas ascendentes e descendentes	82
Tabela 9 – Dados de força de gel das suspensões aquecidas.....	83
Tabela 10 – Umidade (X_s) e atividade de água (a_w) dos filmes	84
Tabela 11 – Modelos matemáticos ajustados aos dados de cinética de secagem dos filmes ...	88
Tabela 12 – Parâmetros de cor dos pós das algas marinhas, filme e nori	94
Tabela 13 – Diferença de cor dos filmes com os pós das algas marinhas e nori.....	95
Tabela 14 – Solubilidade e higroscopicidade dos pós das algas marinhas, filmes comestíveis e nori e, espessura, densidade e massa dos filmes comestíveis.....	97
Tabela 15 – Tensão de ruptura (MPa), alongamento na ruptura (%), módulo de Young (MPa.% ⁻¹) e resistência média à propagação do rasgo (N) para os filmes e nori	100
Tabela 16 – Dados normalizados da tensão de ruptura (MPa.mm ⁻¹), alongamento na ruptura (%.mm ⁻¹), módulo de Young (MPa.% ⁻¹ .mm ⁻¹) e resistência média à propagação do rasgo (N mm ⁻¹) pela espessura dos filmes comestíveis e nori.....	103
Tabela 17 – Parâmetros do modelo de Guggenheim, Anderson e de Boer (GAB) e os coeficientes de correlação dos filmes comestíveis	105

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

100K	100 % <i>Kappaphycus alvarezii</i>	
100U	100 % <i>Ulva lactuca</i>	
50U50K	50 % <i>U. lactuca</i> e 50 % <i>K. alvarezii</i>	
50U50K-3	50 % <i>U. lactuca</i> e 50 % <i>K. alvarezii</i> , aquecidos a 90 °C de 3 min	
50U50K-5	50 % <i>U. lactuca</i> e 50 % <i>K. alvarezii</i> , aquecidos a 90 °C de 5 min	
60U40K	60 % <i>U. lactuca</i> e 40 % <i>K. alvarezii</i>	
60U40K-3	60 % <i>U. lactuca</i> e 40 % <i>K. alvarezii</i> , aquecidos a 90 °C de 3 min	
60U40K-5	60 % <i>U. lactuca</i> e 40 % <i>K. alvarezii</i> , aquecidos a 90 °C de 5 min	
70U30K	70 % <i>U. lactuca</i> e 30 % <i>K. alvarezii</i>	
70U30K-3	70 % <i>U. lactuca</i> e 30 % <i>K. alvarezii</i> , aquecidos a 90 °C de 3 min	
70U30K-5	70 % <i>U. lactuca</i> e 30 % <i>K. alvarezii</i> , aquecidos a 90 °C de 5 min	
80U20K	80 % <i>U. lactuca</i> e 20 % <i>K. alvarezii</i>	
80U20K-3	80 % <i>U. lactuca</i> e 20 % <i>K. alvarezii</i> , aquecidos a 90 °C de 3 min	
80U20K-5	80 % <i>U. lactuca</i> e 20 % <i>K. alvarezii</i> , aquecidos a 90 °C de 5 min	
a	Taxa de secagem	$\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$
A	Área da superfície da amostra	cm^2
a*	Cromaticidade de a*	
A _{bs}	Absorbância	
ASTM	American Society for Testing and Materials	
a _w	Atividade de água	
b	Umidade inicial	$\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
b*	Cromaticidade de b*	
b.s.	Base seca	$\text{g}_{\text{água}}\cdot\text{g}_{\text{sólidos secos}}^{-1}$
b.u.	Base úmida	$\text{g}_{\text{água}}\cdot\text{g}_{\text{produto}}^{-1}$
BET	Modelo de Brunauer-Emmett-Teller	
C	Constante de Guggenheim	
CIELAB	Escala de cor L*, a* e b*	
D	Profundidade	mm
d	Densidade	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
dX/dt	Taxa de secagem	$\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$
FDA	Food and Drug Administration	
F _m	Força máxima	N
GAB	Guggenheim-Anderson-de Boer	
H	Higroscopicidade	%
k	Índice de consistência	$\text{Pa}\cdot\text{s}^n$
K	Constante de GAB	
K ₁	Primeira secagem da <i>K. alvarezii</i>	
K ₂	Segunda secagem da <i>K. alvarezii</i>	
L*	Luminosidade	
LCBA	Laboratório de Cultivo e Biotecnologia de Algas	
LCME	Laboratório Central de Microscopia Eletrônica	

m	Massa da amostra	g
m ₁	Massa inicial	g
m ₂	Massa final	g
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura	
n	Índice de comportamento do fluxo	adimensional
O	Opacidade	
P	Pressão do vapor da água	Pa
P ₀	Pressão da água pura	Pa
pH	Potencial hidrogeniônico	
R ²	Coefficiente de correlação	
RDC	Resolução da Diretoria Colegiada	
RMSE	Raiz do erro médio quadrático	
SOL _a	Solubilidade das algas marinhas em pó	%
SOL _f	Solubilidade dos filmes comestíveis	%
SOL _n	Solubilidade do nori	%
t	Tempo de secagem	minutos horas dias
T	Temperatura	°C
T%	Transparência	%
T _g	Temperatura de transição vítrea	°C
U	Secagem da <i>U. lactuca</i>	
V ₁	Volume de água destilada	mL
V ₂	Volume separado de sobrenadante	mL
x	Espessura	mm
X ₀	Umidade inicial	g.g ⁻¹ b.s.
X _e	Umidade de equilíbrio	g.g ⁻¹ b.s.
X _m	Umidade na monocamada	g.g ⁻¹ b.s.
X _s	Umidade em base seca	g.g ⁻¹ b.s.
X _t	Umidade no tempo x	g.g ⁻¹ b.s.
X _u	Umidade em base úmida	g.g ⁻¹ b.u.
Y	Módulo de Young	MPa.% ⁻¹
ȳ	Taxa de cisalhamento	s ⁻¹
ΔE	Diferença de cor	
ε _{rup}	Alongamento na ruptura	%
σ	Tensão de cisalhamento	Pa
σ ₀	Tensão de cisalhamento inicial	Pa
σ _{rup}	Tensão de ruptura	MPa
λ	Comprimento de onda	nm

SUMÁRIO

DIAGRAMA CONCEITUAL	18
1 INTRODUÇÃO	19
2 OBJETIVOS	22
2.1 OBJETIVO GERAL	22
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
3.1 ALGAS MARINHAS	23
3.2 ALGAS MARINHAS COMESTÍVEIS	23
3.2.1 <i>Ulva lactuca</i>	26
3.2.2 <i>Kappaphycus alvarezii</i>	29
3.3 FILMES COMESTÍVEIS DE ALGAS MARINHAS	30
3.4 POLISSACARÍDEOS DE ALGAS MARINHAS	32
3.4.1 <i>Ulvano</i>	33
3.4.2 <i>Carragena</i>	35
3.5 SECAGEM	37
3.5.1 Atividade de água e isothermas de sorção	40
3.6 MÉTODOS DE OBTENÇÃO DE FILMES	43
3.7 PROPRIEDADES DOS FILMES	44
3.7.1 Espessura	44
3.7.2 Textura	45
3.7.3 Propriedades mecânicas	46
3.7.4 Cor	51
4 MATERIAL E MÉTODOS	53
4.1 COLETA E PREPARO DA BIOMASSA DAS ALGAS MARINHAS	53
4.1.1 <i>Ulva lactuca</i>	53
4.1.2 <i>Kappaphycus alvarezii</i>	55
4.2 CARACTERIZAÇÃO CENTESIMAL DAS ALGAS MARINHAS	55
4.3 PREPARO DAS SUSPENSÕES FILMOGÊNICAS E DOS FILMES COMESTÍVEIS	56
4.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	58
4.5 CARACTERIZAÇÃO DAS SUSPENSÕES FILMOGÊNICAS	59
4.5.1 Potencial hidrogeniônico (pH)	59
4.5.2 Comportamento reológico	59

4.5.3	Força do gel	60
4.6	CINÉTICA DE SECAGEM	60
4.6.1	Modelagem matemática da cinética de secagem	62
4.7	CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE ALGAS E FILMES	63
4.7.1	Umidade	63
4.7.2	Atividade de água	63
4.7.3	Solubilidade	63
4.7.4	Higroscopicidade	64
4.7.5	Análise subjetiva	65
4.7.6	Microscopia	65
4.7.7	Cor	65
4.7.8	Opacidade e Transparência	66
4.7.9	Espessura	66
4.7.10	Densidade	66
4.7.11	Determinação das propriedades mecânicas	67
4.7.11.1	<i>Ensaio de tração</i>	67
4.7.11.2	<i>Ensaio de resistência a propagação do rasgo</i>	67
4.7.12	Isotermas de sorção de umidade	69
4.8	ANÁLISE ESTATÍSTICA	70
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
5.1	CARACTERIZAÇÃO DAS ALGAS MARINHAS	71
5.1.1	Cinética de secagem e modelagem matemática	71
5.1.2	Composição centesimal das algas	76
5.2	CARACTERIZAÇÃO DAS SUSPENSÕES FILMOGÊNICAS	77
5.2.1	pH	77
5.2.2	Comportamento reológico	78
5.2.3	Força do gel	82
5.3	EVOLUÇÃO TEMPORAL DA UMIDADE E TEMPERATURA DURANTE O PROCESSO DE SECAGEM DOS FILMES E MODELAGEM MATEMÁTICA	84
5.4	CARACTERIZAÇÃO DOS FILMES DE ALGAS	89
5.4.1	Análises qualitativas	90
5.4.2	Microscopia	91
5.4.3	Cor, opacidade e transparência	93
5.4.4	Solubilidade e higroscopicidade	97

5.4.5	Espessura e densidade.....	99
5.4.6	Propriedades mecânicas dos filmes.....	100
5.4.7	Isotermas de sorção de umidade	103
6	CONCLUSÃO.....	107
	REFERÊNCIAS	109

DIAGRAMA CONCEITUAL

Por quê?

- Na literatura, há uma escassez de estudos abordando o uso da biomassa de algas *in natura* ou extratos dessas algas para a produção de filmes comestíveis destinados ao consumo humano.
- No Brasil, as algas *Ulva* e *Kappaphycus* são abundantes e tem um grande potencial para a produção de filmes comestíveis, snacks e outros alimentos.

O que já foi publicado na literatura?

- Existem estudos que investigam a utilização de biomassa ou extrato de espécies pertencentes aos gêneros *Ulva* e *Kappaphycus* na produção de filmes. No entanto, frequentemente é necessário incorporar outros componentes, como plastificantes, para aprimorar as propriedades físicas desses filmes.
- O foco principal é a produção de filmes para uso como um revestimento comestível ou embalagem biodegradável.

Hipóteses da pesquisa

- A exposição da suspensão filmogênica, resultante da combinação de *Ulva lactuca*, *Kappaphycus alvarezii* e água, a um tratamento térmico prévio à secagem, resultará em um filme com propriedades mecânicas aprimoradas, como maleabilidade, que está relacionada à maior disponibilidade de polissacarídeos, como carragena e o ulvano.
- A incorporação da alga marinha *K. alvarezii* na suspensão resultará em melhorias significativas nas propriedades mecânicas dos filmes, como alongamento, resistência e flexibilidade.

Experimentos

- A produção de filmes comestíveis foi realizada por meio da utilização de diferentes proporções de *U. lactuca* e *K. alvarezii* na formação da suspensão filmogênica, juntamente com a variação dos tempos de aquecimento (3 ou 5 min) em banho-maria a 90 °C.
- Foi avaliado o efeito dos diferentes métodos de produção nas propriedades físicas e químicas dos filmes comestíveis.

1 INTRODUÇÃO

As algas marinhas têm sido consideradas como fonte promissora de alimento, em resposta à crescente tendência global de buscar alimentos mais sustentáveis e saudáveis (Govaerts; Olsen, 2022). A produção de algas marinhas em todo o mundo atingiu a marca de 36 milhões de toneladas em 2020, com 97% desse total proveniente da aquicultura. Aproximadamente 300 espécies de algas são utilizadas comercialmente (Blikra *et al.*, 2021; FAO, 2022).

As algas marinhas, como as macroalgas, compreendem organismos fotossintetizantes, multicelulares e aquáticos (Billing *et al.*, 2021). Esses organismos são classificados em três grupos distintos: algas verdes (Chlorophyta), pardas (Phaeophyta) e vermelhas (Rhodophyta) (Min *et al.*, 2021). As macroalgas oferecem uma excelente opção para a produção de alimentos, pois são naturalmente ricas em diversos macro e micronutrientes, como proteínas, carboidratos, polifenóis, vitaminas e minerais (Bizzaro; Vatland; Pampanin, 2022).

Entre as espécies de macroalgas marinhas mais consumidas na alimentação humana estão a *Porphyra* spp., *Saccharina japonica* (anteriormente conhecida como *Laminaria japonica*), *Undaria pinnatifida*, *Hizikia fusiforme* e *Chondrus crispus*, que são utilizadas em saladas, sopas, massas, snacks e outras preparações (Pereira *et al.*, 2021). Além disso, espécies do gênero *Ulva* também são promissoras para uso como alimento, uma vez que são ricas em fibras dietéticas solúveis, proteínas e minerais, e podem ser introduzidas em novos produtos alimentares, pois apresentam propriedades funcionais, como capacidade de intumescimento, capacidade de retenção de água e capacidade de retenção de óleo (Udayangani; Wijesekara; Wickramasinghe, 2019).

Uma das aplicações interessantes das algas marinhas e de seus extratos é a produção de filmes e revestimentos comestíveis. Esses filmes são compostos por uma camada fina de biomacromoléculas comestíveis, como polissacarídeos e proteínas, frequentemente adicionados de plastificantes, como açúcares e/ou polióis, para melhorar suas propriedades físicas (Viana *et al.*, 2018).

As algas verdes, como a *Ulva*, contêm polissacarídeos derivados de cadeias sulfatadas (ulvano, por exemplo) e derivados de monossacarídeos (ramnose, ácido glicurônico, ácido idurônico e xilose, por exemplo), que são úteis para formulação de filmes biodegradáveis e revestimentos comestíveis (Ramu Ganesan; Shanmugam; Bhat, 2018). O ulvano é um

polissacarídeo sulfatado solúvel em água presente na parede celular e contribui significativamente para o peso seco da biomassa de *Ulva* (Kidgell *et al.*, 2019). A sua extração é realizada principalmente em água quente em torno de 80 a 90°C e pode ser melhorada pela presença de agentes quelantes de cátions bivalentes, como oxalato de amônio (Tziveleka; Ioannou; Roussis, 2019). O ulvano também demonstrou ter diversos benefícios à saúde, incluindo propriedades antioxidantes, anticoagulantes, imunomoduladoras, anti-inflamatórias, anti-hiperlipidêmicas e anti-hipertensivas (Glasson *et al.*, 2022). No entanto, para que os filmes produzidos a partir da biomassa bruta de *Ulva* spp. ou do ulvano apresentem boas propriedades mecânicas, geralmente é necessário adicionar outros componentes, como plastificantes (Davoodi; Milani; Farahmandfar, 2021; Guidara *et al.*, 2020; Ramu Ganesan; Shanmugam; Bhat, 2018; Sinurat; Fransiska; Livia, 2021; Sulastru *et al.*, 2021).

Nesse sentido, outro biopolímero natural que pode ser usado para produzir filmes comestíveis é a carragena (Ramu Ganesan; Shanmugam; Bhat, 2018). A carragena é um polissacarídeo encontrado em espécies pertencentes às algas vermelhas, como a *Kappaphycus alvarezii* (Aga *et al.*, 2021). No entanto, durante o processamento das algas para obtenção da carragena há perda de matéria seca, resultando também em perda de nutrientes e geração de resíduos industriais (Lopes, 2020). Uma alternativa viável consiste no emprego de biomassa bruta de *K. alvarezii* na fabricação de filmes, uma vez que sua inclusão na composição destes resulta em aprimoramento das propriedades mecânicas (Abdul Khalil *et al.*, 2018; Siah; Aminah; Ishak, 2015).

A produção de filmes comestíveis a partir de algas marinhas vem sendo explorada devido às suas boas composições nutricionais e à presença de componentes que podem melhorar as propriedades físico-químicas e sensoriais dos alimentos. No entanto, para garantir a disponibilidade adequada desses componentes nas suspensões filmogênicas antes da secagem, podem ser aplicados pré-tratamentos na biomassa, como secagem e moagem, e/ou tratamentos térmicos na suspensão (Glasson *et al.*, 2017; Madany *et al.*, 2021).

Tomando como referência o nori, um filme produzido exclusivamente a partir de algas marinhas, amplamente empregado na culinária asiática, destacamos a limitação de sua produção aos países asiáticos. Com base nesse contexto, buscamos encontrar uma alternativa ou análogo a esse produto, utilizando apenas algas marinhas em sua composição, sem a incorporação de plastificantes. Por isso, há a necessidade de entender como fatores tais como a concentração

das matérias-primas e tratamentos térmicos podem influenciar nas características físico-químicas dos filmes, como, uniformidade, flexibilidade e resistência mecânica.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste estudo é desenvolver filmes comestíveis à base de algas marinhas, utilizando biomassa de *Ulva lactuca* e *Kappaphycus alvarezii*, com ênfase na caracterização físico-química das algas, na produção dos filmes e na análise de suas propriedades.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) caracterizar físico-quimicamente as algas marinhas utilizadas no estudo em termos de teor de cinzas, lipídeos, proteína bruta e carboidratos;
- b) produzir filmes comestíveis de algas marinhas com diferentes concentrações de *U. lactuca* e *K. alvarezii* e diferentes tempos de aquecimento;
- c) estudar as cinéticas de secagem das algas marinhas e filmes comestíveis;
- d) analisar as propriedades físico-químicas, em termos de espessura, umidade, atividade de água, isoterma de sorção, cor, solubilidade, higroscopicidade, microestrutura e propriedades mecânicas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ALGAS MARINHAS

As algas compreendem um diversificado grupo de organismos fotossintetizantes e eucariontes, incluindo microalgas unicelulares e macroalgas (Freitas *et al.*, 2021; Pradhan *et al.*, 2022). As macroalgas, conhecidas popularmente como algas marinhas, são organismos que se diferem das microalgas, pois são visíveis a olho nu (Schmidtchen *et al.*, 2021).

Uma das principais formas de distinguir as macroalgas é pela pigmentação e coloração, que pode ser verde (chlorophyta), parda (phaeophyta) ou vermelha (rhodophyta) (Qin, 2018). As clorofilas *a* e *b* são responsáveis pela coloração das algas verdes, enquanto os carotenoides fucoxantina e xantofila são responsáveis pela pigmentação das algas pardas. Já a ficoeritrina e a ficocianina são responsáveis pela pigmentação das algas vermelhas (Baweja *et al.*, 2016). Outra característica importante dos diferentes grupos são suas composições de hidrocoloides, o ulvano e amido estão presentes em algas verdes, alginato em algas pardas e o ágar e a carragena em algas vermelhas (Kadam *et al.*, 2015).

Os principais constituintes das algas marinhas variam de acordo com as espécies, local e época em que houve a colheita, exposição a ondas e temperatura da água (Rioux; Beaulieu; Turgeon, 2017). Em geral são ricas em polissacarídeos, fibras dietéticas, carotenoides, vitaminas, minerais e outras macromoléculas como carboidratos, proteínas, lipídios, ácidos graxos essenciais, polifenóis e aminoácidos (Pradhan *et al.*, 2020, 2022).

O cultivo de algas marinhas pode ser destinado à alimentação humana, ração animal, extração de compostos nutracêuticos, combustíveis e produtos químicos (Bizzaro; Vatland; Pampanin, 2022). O cultivo e a coleta de algas chegaram a 36 milhões de toneladas em 2020, movimentando aproximadamente 16,5 bilhões de dólares, sendo que, 97% dessa produção foram representadas somente pelo cultivo de algas marinhas (FAO, 2022).

3.2 ALGAS MARINHAS COMESTÍVEIS

O sistema alimentar mundial enfrenta uma série de desafios, como mudanças climáticas, crescimento populacional, superexploração de recursos terrestres e desnutrição (Govaerts; Olsen, 2022). Além disso, os consumidores estão cada vez mais conscientes em

relação ao que ingerem, procurando alimentos mais nutritivos, saudáveis e com propriedades funcionais (Granato *et al.*, 2020; Gullón *et al.*, 2020).

Nesse contexto, as algas marinhas são consideradas como uma matéria-prima promissora para atender a demanda de produção e consumo de alimentos mais sustentáveis e saudáveis (Govaerts; Olsen, 2022). A produção de macroalgas não requer, necessariamente, solo, água doce ou fertilizantes, e permite remover e armazenar o dióxido de carbono presente na atmosfera (Buschmann *et al.*, 2017; Duarte *et al.*, 2017). A partir dessas matérias-primas, é possível criar produtos e ingredientes alimentícios altamente nutritivos. Isso ocorre em parte devido ao fato de serem uma excelente fonte de substâncias bioativas (Blanco-Pascual; Gómez-Guillén; Montero, 2014; Wendin; Undeland, 2020).

As algas marinhas têm sido consumidas nos países da Ásia e do Pacífico desde os tempos antigos e conquistaram uma crescente popularidade na Europa e na América (Albertos *et al.*, 2019). Esse aumento no consumo de produtos alimentícios à base de algas é uma tendência global, impulsionada por diversos fatores, incluindo os sabores distintos que as algas oferecem, seus benefícios nutricionais e o tão apreciado sabor umami (Milinovic *et al.*, 2021).

Por esses motivos, 83% das algas marinhas que são colhidas e cultivadas são destinadas para o consumo humano. Elas são utilizadas de diversas formas, seja como alimento principal, por exemplo, pelo Wakame, derivado da *U. pinnatifida*, e o Kombu, proveniente da *S. japonica* (Quadro 1), ou ainda como ingredientes em produtos alimentares (Figura 1), como a carragena da *Eucheuma* spp., o manitol, o alginato e o iodo obtidos da *S. japonica* (Tiwari; Troy, 2015).

As algas marinhas oferecem uma variedade de opções de consumo, podendo ser apreciadas cruas, como no caso da alface-do-mar (*Ulva* spp.), ou cozidas para aprimorar sua textura, como acontece com o Wakame e o Kombu (Mouritsen, 2009). No entanto, muitas espécies passam por um pré-processamento, como a secagem, que simplifica o transporte, o armazenamento e a comercialização desses alimentos (Kim; Pangestuti; Rahmadi, 2011).

Quadro 1 – Principais algas marinhas consumidas globalmente: comercialização e consumo por grupo

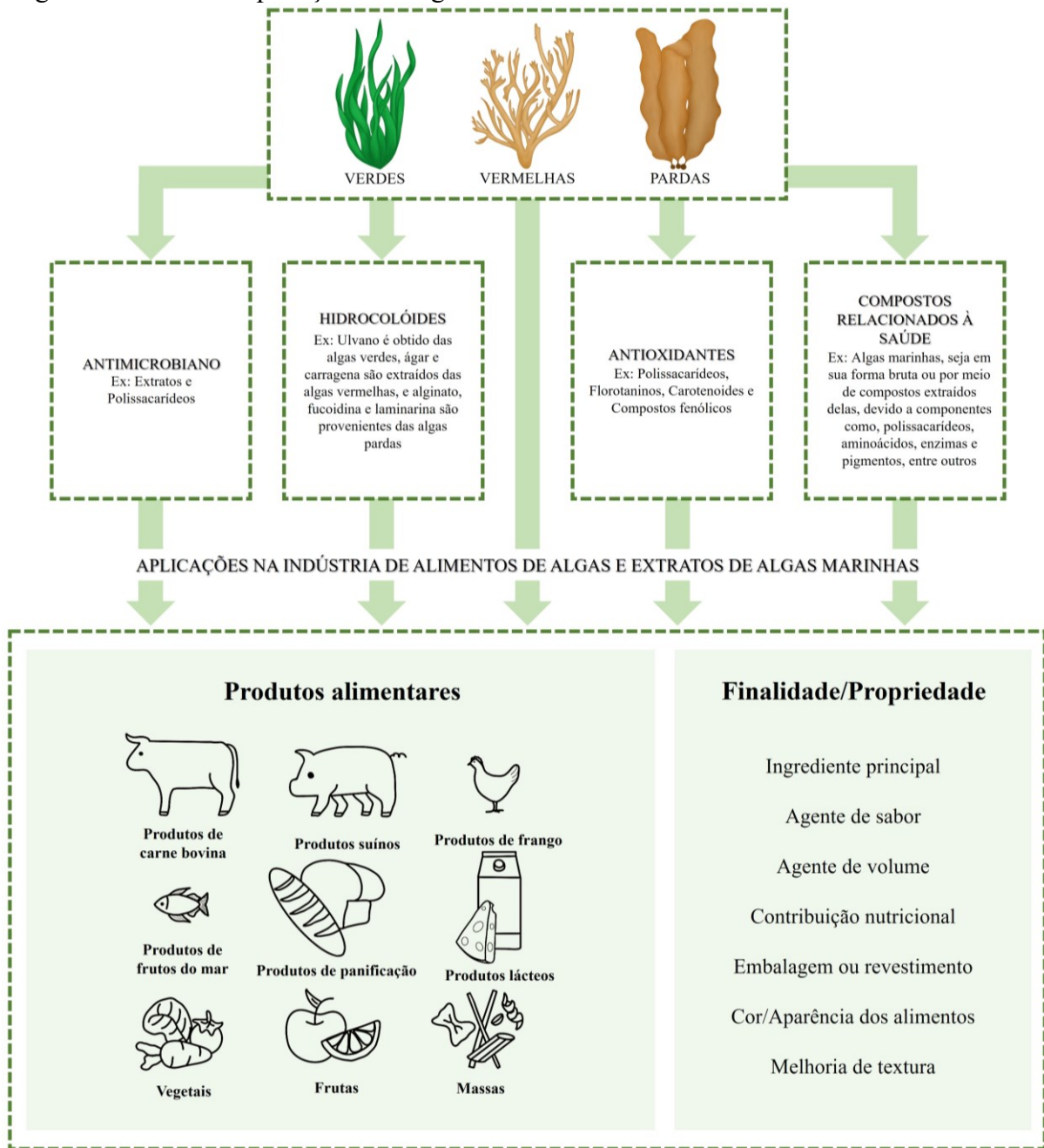
Classificação	Espécie	Nome do produto	Tipo de produto	Uso na alimentação
Alga verde	<i>Ulva</i> spp.	Mistura ou não de algas marinhas “Aonori”	Seco	Pó para uso no preparo de pratos como em arroz, sopas e saladas
	<i>Monostroma</i> spp.			
	<i>Enteromorpha</i> spp.	Caviar verde	Fresco	Saladas
	<i>Caulerpa</i> spp.			
Alga vermelha	<i>Gracilaria</i> spp.	Ogonori	Salgado	Saladas
	<i>Porphyra</i> spp.	Nori	Seco	Utilizado em peças de sushi (como no hossomaki, uramaki, nigui, hot roll e temaki), sopas ou como snack
	<i>Grateloupia filicina</i>	Mukadenori	Salgado	Saladas
	<i>Palmaria palmata</i>	Dulce	Seco	Tempero, snack, cozida e frita
Alga parda	<i>Saccharina japonica</i>	Kombu	Seco ou salgado	Cozida com carne, peixe e sopas ou adicionadas a molhos e arroz
	<i>Undaria pinnatifida</i>	Wakame	Seco ou salgado	Sopas e saladas
	<i>Sargassum fusiforme</i>	Hijiki	Seco	Frito, cozido ou em salada

Fonte: adaptado de Fleurence (2016) e Mahadevan (2015)

Dentre as algas marinhas comestíveis, as do gênero *Porphyra* são algumas das mais consumidas globalmente, principalmente devido ao seu uso na produção do nori (Jung; Yoon; Matsukawa, 2022). O processo de obtenção desse produto compreende várias etapas, que incluem: lavagem da alga marinha, o corte em pequenos pedaços, a transformação em filmes ou folhas utilizando equipamentos específicos em forma de esteira (geralmente os filmes têm dimensões de 19 x 21 cm e peso seco aproximado de 3 g) e, por fim, a secagem. (Levine; Sahoo, 2010). As folhas secas de nori podem adquirir uma textura crocante após serem torradas ou cozidas (Bitto; Teng; Watanabe, 2017).

O nori possui como característica ser uma folha seca e fina, que pode ser ingerida na forma de um lanche ou como um envoltório comestível (no sushi, por exemplo) (Erniati *et al.*, 2018). Nesse alimento são encontrados alguns componentes biologicamente funcionais, como fibras dietéticas, taurina, ácidos graxos poli-insaturados, carotenoides e aminoácidos tipo micosporina (porphyra-334), assim como minerais, vitaminas e uma quantidade relativamente alta de proteínas (aproximadamente 40 % em base seca) (Nishiguchi *et al.*, 2016; Simovic *et al.*, 2022).

Figura 1 – Possíveis aplicações das algas marinhas e seus extratos na indústria dos alimentos



Fonte: adaptado de Qin (2018), Roohinejad (2017), Blikra (2021) e Carina (2021)

3.2.1 *Ulva lactuca*

O gênero *Ulva*, popularmente conhecido como alface-do-mar, engloba as espécies mais abundantes entre as algas verdes (Figueira *et al.*, 2020). Essas espécies são encontradas em oceanos e estuários em todo o mundo e se destacam por possuir um ciclo de vida curto, com crescimento rápido e natureza oportunista (Eismann *et al.*, 2020). A biomassa das espécies de

Ulva encontra diversas aplicações, desde a alimentação humana e nutrição animal até a extração de compostos bioativos (Dominguez; Loret, 2019; Roleda *et al.*, 2021).

As espécies de *Ulva* se caracterizam por sua coloração verde, apresentando talos compostos por duas camadas de células que crescem de forma independente, formando uma lâmina distromática ou um tubo monostromático oco, podendo ser simples ou ramificado (Bastos, 2019).

A *Ulva lactuca* (Figura 2) é uma das 102 espécies de *Ulva* reconhecidas taxonomicamente em todo o mundo (Guiry; Guiry, 2023). É uma espécie Eukaryota do Reino Plantae, pertencente ao subreino Viridiplantae (Filo Chlorophyta), do Subfilo Chlorophytina, da Classe Ulvophyceae, da ordem Ulvales, da família Ulvaceae e do gênero *Ulva* (Guiry; Guiry, 2023).

Figura 2 – *Ulva lactuca*



Fonte: autor

Esta espécie é encontrada em diversos níveis da zona entre marés, preferindo locais calmos e protegidos, apresentando uma distribuição global, incluindo a costa brasileira (El-Naggar *et al.*, 2018; Sousa, 2011). A *U. lactuca* possui uma longa história de consumo como suplemento alimentar e é reconhecida na medicina tradicional chinesa pelo tratamento de hiperlipidemia, insolação e doenças urinárias (Shao *et al.*, 2015b; Tseng; Chang, 1984). Além disso, é frequentemente utilizada em sopas, saladas e até como um substituto no preparo de sushi (Shao *et al.*, 2015a).

A variabilidade morfológica dessa espécie está fortemente relacionada ao ambiente em que habita, levando à suposição de que diferentes espécies possam existir. No entanto, análises genéticas revelaram que essas variações não correspondem a diferenças genéticas significativas, mas sim a fenótipos distintos (Dominguez; Loret, 2019; Hayden *et al.*, 2003). Em concordância, Carneiro (2021) apontou que as espécies *U. fasciata* Delile, *U. lactuca* f. *fasciata* (Delile) Hering, *U. lobata* (Kützinger) Harvey e *Phycoseris fasciata* (Delile) Montagne são sinônimos heterotípicos de *U. lactuca* Linnaeus. Além disso, na plataforma AlgaeBase (<https://www.algaebase.org/>), um banco de dados global que oferece informações taxonômicas, nomenclaturais e de distribuição sobre algas, a página específica das algas citadas acima inclui um tópico denominado *Status of Name*, no qual *U. lactuca* é mencionada como sinônimo.

A composição da *Ulva* (Tabela 1) a torna uma excelente escolha na alimentação devido aos seus valores significativos de carboidratos, proteínas e carotenoides. Além disso, a *Ulva* é uma rica fonte alternativa de aminoácidos essenciais e diversos ácidos graxos, como ácido oleico, linoleico e linolênico (Yaich *et al.*, 2011).

Tabela 1 – Composição aproximada (% b.s.) das algas marinhas *Ulva lactuca* e *Kappaphycus alvarezii*

Alga	Umidade	Carboidrato	Proteína	Lipídeo	Cinzas	Referência
<i>Ulva lactuca</i>						
	17,77 - 26,26	53,31 - 58,40	13,30 - 18,35	0,34 - 1,94	12,54 - 20,61	Pádua, Fontoura e Mathias (2004)*
	14,42	61,50	27,20	0,30	11,00	Ortiz et al. (2006)
	14,94	49,14	8,46	7,87	19,59	Yaich et al. (2011)
	16,90	58,10	13,60	0,19	11,20	Rasyid (2017)
	15,29	-	20,16	1,37	17,17	Udayangani, Wijesekara e Wickramasinghe (2019)
	8,83 - 16,45	47,54 - 53,55	10,90 - 14,38	1,10 - 1,40	10,23 - 19,45	Sravani et al. (2023)**
<i>Kappaphycus alvarezii</i>						
	16,00	-	14,00	1,16	34,00	Felix e Brindo (2014)
	-	15,00 - 34,00	12,69 - 23,61	0,69 - 0,51	10,99 - 29,93	Suresh Kumar, Ganesan e Rao (2015)*
	-	51,60 - 55,80	2,30 - 3,80	0,20 - 1,30	14,60 - 17,20	Masarin et al. (2016)***
	-	65,20	3,40	1,10	11,57	Abdul Khalil et al. (2018)
	-	55,65	6,61	0,00	32,12	Adharini et al. (2019)
	10,53	59,19	7,55	1,73	12,39	Lopes (2020)

Fonte: elaborado pelo autor

Nota: * diferentes épocas de coleta; ** diferentes métodos de secagem; *** diferentes cepas

3.2.2 *Kappaphycus alvarezii*

A macroalga marinha vermelha *Kappaphycus alvarezii* (Figura 3) é uma espécie Eukaryota do Reino Plantae, pertencente ao subreino Biliphyta (Filo Rhodophyta), do Subfilo Rhodophytina, da Classe Florideophyceae e subclasse Rhodymeniophycidae, da ordem Gigartinales, da família Solieriaceae e do gênero *Kappaphycus* (Guiry; Guiry, 2023).

A composição da *K. alvarezii* encontra-se na Tabela 1, essa alga tem ampla importância na indústria, pois é a principal fonte de k-carragena, que pode representar até 37% do seu peso na forma seca (Rudke; de Andrade; Ferreira, 2020). A *K. alvarezii* pode crescer até dois metros de comprimento e exibe uma ampla gama de cores, incluindo verde, amarela, vermelha, cinza, preta, laranja ou marrom. Além disso, seu rápido crescimento a torna capaz de dobrar de tamanho em um período de 15 a 30 dias (Hinaloc; Roleda, 2021; Sasue; Kasim, 2016).

Figura 3 – *Kappaphycus alvarezii*



Fonte: autor

O cultivo dessa espécie é geralmente realizado em balsas flutuantes de bambu e em *longlines* (Kasim; Mustafa, 2017). As espécies pertencentes ao gênero *Kappaphycus* são altamente relevantes no cenário global de cultivo de algas. Em 2020, conquistaram o sexto lugar no ranking de produção mundial de algas através da aquicultura, com uma produção total de 1.604,1 mil toneladas (FAO, 2022). No Brasil, mais precisamente em Santa Catarina, a safra 2022/2023 da *K. alvarezii* alcançou uma produção de 300,35 toneladas, representando um notável aumento de 193,56% em relação à safra anterior. Embora inicialmente destinada à

indústria de biofertilizantes, essa produção possui um vasto potencial em diversas áreas, incluindo gastronomia, indústrias têxteis, cosméticos, alimentação animal e créditos de carbono (Santos, 2023).

3.3 FILMES COMESTÍVEIS DE ALGAS MARINHAS

Os filmes e revestimentos comestíveis devem ter pelo menos dois componentes, uma matriz a base de biomacromoléculas capazes de formar uma estrutura coesa e um solvente, que geralmente é água (Otoni *et al.*, 2017). As biomacromoléculas podem englobar uma variedade de materiais, como polímeros naturais, proteínas, lipídeos e polissacarídeos (Abdillah; Charles, 2021). Em algumas situações, torna-se necessário a adição de aditivos, como plastificantes, com o objetivo de aprimorar as propriedades funcionais dos filmes (Cazón *et al.*, 2017).

Um exemplo notável de filme comestível é o nori, amplamente consumido em todo o mundo, feito a partir de uma simples mistura de algas do gênero *Porphyra* com água. Além disso, diversos estudos evidenciam que algas marinhas *in natura* ou seus extratos podem ser utilizados na produção de filmes destinados a alimentos, snacks ou até mesmo *leathers* (filmes frequentemente formulados a partir de polpa de frutas, conhecido por sua consistência firme que permite moldagem e corte conforme necessário) (Erniati *et al.*, 2018; Jayakody; Vanniarachchy; Wijesekara, 2021; Lopes, 2020; Sari *et al.*, 2019; Sinurat; Fransiska; Livia, 2021; Sukotjo; Nurani; Juliansyah, 2021; Thunyawannichnonndh *et al.*, 2020; Wahyuni *et al.*, 2019). Esses filmes comestíveis podem também ter aplicações em embalagens e revestimentos para alimentos (Abdillah; Charles, 2021; Abdul Khalil *et al.*, 2018; Albertos *et al.*, 2019; Blanco-Pascual; Gómez-Guillén; Montero, 2014; Cian *et al.*, 2014; Davoodi; Milani; Farahmandfar, 2021; Farhan; Hani, 2017; Gomaa *et al.*, 2022; Murugan *et al.*, 2023; Ramu Ganesan; Shanmugam; Bhat, 2018; Siah; Aminah; Ishak, 2015; Yuan *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2021).

O uso de algas marinhas como filme ou revestimento comestível, são uma boa estratégia para estender a vida útil de alimentos. Em um estudo conduzido por Albertos *et al.* (2019), foram desenvolvidos filmes comestíveis a partir da combinação das algas marinhas *Himanthalia elongata* e *Palmaria palmata*, tanto em sua forma bruta quanto na forma de extratos, juntamente com quitosana e glicerol. Esses filmes foram avaliados como embalagens

primárias para hambúrgueres de truta arco-íris (*Oncorhynchus mykiss*) e demonstraram redução na oxidação do produto, além de melhor controle da deterioração microbiana.

A adição de polissacarídeos de *U. fasciata* e *K. alvarezii* em filmes com glicerol, ulvano e carragena, respectivamente, melhoraram significativamente as propriedades físico-químicas e mecânicas de filmes (Ramu Ganesan; Shanmugam; Bhat, 2018). Um estudo semelhante revelou que filmes produzidos a partir da mistura de polissacarídeos de *S. pallidum* com quitosana apresentaram maior atividade antioxidante, capaz de estender a vida útil e inibir a deterioração de morangos (Yuan *et al.*, 2021).

Além disso, as algas marinhas também têm sido usadas diretamente na alimentação, seja como snacks ou como envoltório para pratos, como o nori. Com o aumento da população mundial e a crescente escassez de terras e água doce para a agricultura, as algas marinhas têm se mostrado uma fonte promissora de biomassa e proteína (Bizzaro; Vatland; Pampanin, 2022).

Um exemplo prático envolve o desenvolvimento de snacks à base de *U. fasciata*, que foi bem aceito pelos consumidores da região sul da Ásia. A adição de oleoresina de gengibre (200 ppm) melhorou o aroma, sabor, sensação bucal e a aceitabilidade geral desse produto (Jayakody; Vanniarachchy; Wijesekara, 2021). Além disso, estudos sobre o pré-tratamento da *Ulva rigida*, incluindo lavagens em água limpa e branqueamento em água fervente, resultaram em uma coloração verde mais estável e uma redução no odor semelhante ao de peixe (Thunyawanichnonndh *et al.*, 2020).

Outro estudo avaliou a adição da alga marinha *K. alvarezii* em filmes de mamão da montanha (*Vasconcellea pubescens*), visando melhorar sua textura devido à alta concentração de carragena na alga, tornando o produto final mais flexível (Sukotjo; Nurani; Juliansyah, 2021). Para otimizar a flexibilidade, é possível adicionar plastificantes de grau alimentício, como glicerol, sorbitol ou polietilenoglicol. Um estudo sugere que a inclusão de 0,8% de glicerol em um produto semelhante ao nori, fabricado a partir de uma combinação de *Gracilaria* sp. e *U. lactuca* (1:1), resulta na obtenção de filmes com propriedades físicas e mecânicas satisfatórias, incluindo menor taxa de transmissão de vapor de água e menor percentual de alongamento. No entanto, concentrações mais elevadas de glicerol podem reduzir a força de ruptura (Sinurat; Fransiska; Livia, 2021).

É importante ressaltar que, conforme demonstrado na literatura e em testes preliminares, filmes compostos apenas por *Ulva* e água geralmente não apresentam boas propriedades mecânicas, como flexibilidade. Portanto, é necessário adicionar outros

componentes durante o processamento (Guidara *et al.*, 2020). Na produção comercial de nori, por exemplo, a alga marinha usada contém polissacarídeos, como a porfirana, que desempenham um papel fundamental na preservação da integridade das folhas de nori (Jung; Yoon; Matsukawa, 2022). Portanto, uma alternativa viável para aprimorar as propriedades mecânicas dos filmes de Ulva é incorporar polissacarídeos com essas características, como a carragena, ou utilizar algas marinhas que naturalmente contenham tais polissacarídeos em sua composição.

3.4 POLISSACARÍDEOS DE ALGAS MARINHAS

Os polissacarídeos são a forma mais abundante dos carboidratos, sendo moléculas poliméricas constituídas de várias unidades de monossacarídeos, unida por ligações glicosídicas (Fellows, 2016; Qin, 2018). São sintetizados para desempenhar diversas funções, como armazenamento de energia em plantas (amido), suporte estrutural em células vegetais (celulose) e atuam como agentes gelificantes, formando uma matriz intracelular e contendo íons como sódio, cálcio e magnésio (como no caso do alginato). Esses polímeros podem ser derivados de várias fontes, incluindo vegetais, algas, animais, bactérias e fungos (Torres *et al.*, 2019).

As algas marinhas se destacam como uma das fontes mais ricas de polissacarídeos. Essas substâncias provenientes de algas têm aplicações versáteis nas indústrias alimentícia e biomédica, onde são utilizadas como *scaffolds* (estruturas temporárias tridimensionais e biodegradáveis), agentes dispersantes, revestimentos, estabilizantes, embalagens e espessantes. Esses polissacarídeos das algas são valorizados por suas propriedades únicas, que incluem biocompatibilidade, biodegradabilidade, alta capacidade de retenção de água e a habilidade de formar filmes (Abdul Khalil *et al.*, 2017).

É importante destacar que os polissacarídeos de algas marinhas são considerados mais seguros e menos propensos a causar reações imunológicas em comparação aos polissacarídeos de origem animal (Tziveleka; Ioannou; Roussis, 2019). Dentre os polissacarídeos presentes em algas marinhas os mais importantes são o alginato, ágar, fucana, laminarina, ulvano e carragena (Carina *et al.*, 2021).

3.4.1 Ulvano

A parede celular das espécies pertencentes ao gênero *Ulva* é composta por dois grupos distintos de polissacarídeos. O grupo principal inclui o ulvano solúvel em água e a celulose insolúvel, enquanto o grupo menor abrange o xiloglucano e o glucuronano solúveis em álcali linear (Madany *et al.*, 2021).

O ulvano possui diversas aplicações relatadas na literatura, abrangendo funções como anticoagulante (Guidara *et al.*, 2021), antioxidante (Chen *et al.*, 2021; Yaich *et al.*, 2017), antitumoral (Guidara *et al.*, 2021), modulador imunológico (Harikrishnan *et al.*, 2021) e propriedades de gelificação (Kidgell *et al.*, 2021). Além disso, desempenha um papel fundamental na composição de nanofibras (Madany *et al.*, 2021), hidrogéis (Sulastri *et al.*, 2021), *scaffolds* biológicos (estruturas tridimensionais temporárias e biodegradáveis) (Madub *et al.*, 2021) e demonstra potencial para efeitos antienvhecimento na pele (Liu *et al.*, 2022).

A quantidade, estrutura e composição química do ulvano em espécies de *Ulva* podem variar significativamente de acordo com diferentes fatores, como a espécie, o tamanho das partículas usadas na extração, as condições de crescimento celular (controlado ou natural) e o processo de extração. Na literatura a seguir, observa-se uma ampla variação na composição de espécies do gênero *Ulva* em relação ao ulvano, que pode representar de 2,52% a 73,2% do peso seco da biomassa (Quadro 2). Essa variação depende tanto do método de extração empregado quanto ao grau de pureza alcançado.

Diversos métodos podem ser utilizados para extrair o ulvano de *Ulva*, incluindo:

- a) extração em água quente (Chen *et al.*, 2021; Madany *et al.*, 2021);
- b) extração ácida utilizando ácido sulfúrico (Glasson *et al.*, 2019), oxalato de sódio (Glasson *et al.*, 2017) e ácido clorídrico (Guidara *et al.*, 2021; Wahlström *et al.*, 2020; Yaich *et al.*, 2013);
- c) extração enzimática, envolvendo o uso de protease e celulase (Guidara *et al.*, 2021; Yaich *et al.*, 2017), α -amilase e proteinase K (Wahlström *et al.*, 2020) e celulase (Chen *et al.*, 2021);
- d) extração por ultrassom (Chen *et al.*, 2021).

Observa-se que a combinação de diferentes etapas em um único método de extração tem sido investigada como uma abordagem para otimizar a obtenção do ulvano (Chen *et al.*, 2021; Yaich *et al.*, 2017).

Quadro 2 – Métodos de extração de ulvano de diferentes espécies de *Ulva*

Referência	Espécie	Extração	Rendimento
Madany et al. (2021)	<i>U. fasciata</i>	Pré-tratamento com e sem solvente orgânico (diclorometano e etanol) e extração com água quente a 120 °C por 30 min	Entre: 6,80 a 22,90 % Maior rendimento: sem solvente e moído duas vezes
Guidara et al. (2021)	<i>U. lactuca</i>	Extração ácida com ácido clorídrico por 1 h a 80 ou 90 °C ou extração química enzimática com água, celulose e protease a 50 °C por 2 h	Entre: 3,40 a 17,95 % Maior rendimento: extração enzimática
Glasson et al. (2019)	<i>U. ohnoi</i>	Extração ácida: Ácido sulfúrico com pH 1,0, 2,0 ou 4,0, aquecido a 40, 65 ou 90 °C por 10, 50 ou 90 min	Entre: 15,1 a 73,2 % Maior rendimento: pH 2,5, 90 °C e 90 min
Chen et al. (2021)	<i>U. pertusa</i>	T1: Água quente a 90 °C por 30 min T2: Água quente a 90 °C por 30 min, ultrassom e 90 °C por 2,5 h T3: Água com pH ajustado para 4,5 adicionando celulase a 50 °C por 2,5 h, seguido por elevação da temperatura para 90 °C por 30 min T4: Água com pH ajustado para 4,5, adicionando celulase a 50 °C por 2,5 h, seguido por elevação da temperatura para 90 °C por 30 min com ultrassom	Entre: 17,8 a 26,7 % Maior rendimento: extração ultrassônica-enzimática assistida (T4)
Wahlström et al. (2020)	<i>Ulva spp.</i>	Extração de água quente: pré-tratamento com etanol, seguida por extração em água em temperaturas elevadas, com subsequente purificação através de tratamento enzimático utilizando α -amilase e proteinase K Extração ácida: compreendeu o fracionamento em HCl diluído em temperaturas elevadas, seguido por purificação através da precipitação em etanol	Entre: 11 a 18 % Maior rendimento: extração ácida
Yaich et al. (2013)	<i>U. lactuca</i>	Extração ácida: HCl variando o pH (1,5 ou 2), a temperatura (80 ou 90 °C) e o tempo (1, 2 ou 3 h), com ou sem precipitação em álcool	Entre: 21,68 a 32,67 % com precipitação em álcool e de 2,52 a 3,43 % sem precipitação em álcool
Yaich et al. (2017)	<i>U. lactuca</i>	Extração ácida: HCl com pH de 1,5 ou 2 aquecida a 80 ou 90 °C. Extração enzimática-química combinada: imersão em água quente contendo celulase (a 50 °C por 2 h), seguida por tratamento com protease (a 50 °C por 2 h) e, um período de 30 min em banho-maria em fervura	Entre: 3,04 a 17,14 % Maior rendimento: enzimática-química
Glasson et al. (2017)	<i>U. ohnoi</i>	Mistura dos tratamentos com e sem eles: T1: extração de sal em água quente (40 °C por 30 min) T2: submerso em etanol T3: oxalato de sódio 0,05 M aquecido por 1 h a 85 °C T4: ácido clorídrico 0,05 M aquecido por 1 h a 85 °C	Entre: 3,7 a 8,2 % Maior rendimento: mistura dos tratamentos de redução de sal e com ácido clorídrico (T1+T4)
Glasson et al. (2022)	<i>U. ohnoi</i> <i>U. tepida</i> <i>U. proliferam</i>	Extração ácida: HCl com pH ajustado para 2 e aquecimento a 37 °C por 3 h	Entre: 3,5 a 6,7 % Maior rendimento: para a espécie <i>U. proliferam</i>

Fonte: elaborado pelo autor

Para garantir a pureza do ulvano, é importante notar que alguns componentes, como amido, proteínas, pigmentos e sais, muitas vezes são coextraídos com o polissacarídeo, reduzindo sua pureza. Portanto, em processos de extração e subsequente purificação do ulvano, é comum o uso de solventes orgânicos, como etanol e diclorometano (Chen *et al.*, 2021; Madany *et al.*, 2021). Esses solventes ajudam a remover lipídios, pigmentos, aminoácidos e alguns polifenóis da matriz, resultando em um ulvano mais puro.

As condições de extração desempenham um papel crucial na eficiência do processo. Geralmente, temperaturas de extração mais elevadas favorecem a solubilização do ulvano, enquanto um pH mais baixo melhora a seletividade da extração do polissacarídeo. Além disso, o aumento da duração da extração pode aumentar o rendimento do ulvano (Glasson *et al.*, 2017). Considerando critérios como alto rendimento, alta seletividade e baixa degradação, as condições ideais para a extração do ulvano costumam incluir uma temperatura de 80 a 90°C, uma faixa de pH de 2,0 a 4,5 e uma duração de extração de 1 a 3 horas, conforme sugerido pelo mesmo autor.

No entanto, é possível melhorar ainda mais a eficiência da extração do ulvano por meio de pré-tratamentos na biomassa. Um desses métodos envolve a redução do teor de sal na alga, realizado por meio de extração em banho-maria a uma temperatura controlada de 40 °C por 30 minutos. A redução do teor de sal tem o efeito de diminuir as propriedades de agregação do ulvano, e o choque osmótico resultante aumenta a exposição dos componentes da parede celular ao solvente, melhorando assim a eficiência da extração (Glasson *et al.*, 2017). Outra abordagem eficaz é a redução do tamanho das partículas do pó de *Ulva*. Ao diminuir o tamanho das partículas, a difusão dos solventes através da parede celular é facilitada, o que aumenta o contato entre o solvente e as partículas de *Ulva*, resultando em uma extração mais eficiente do ulvano (Madany *et al.*, 2021).

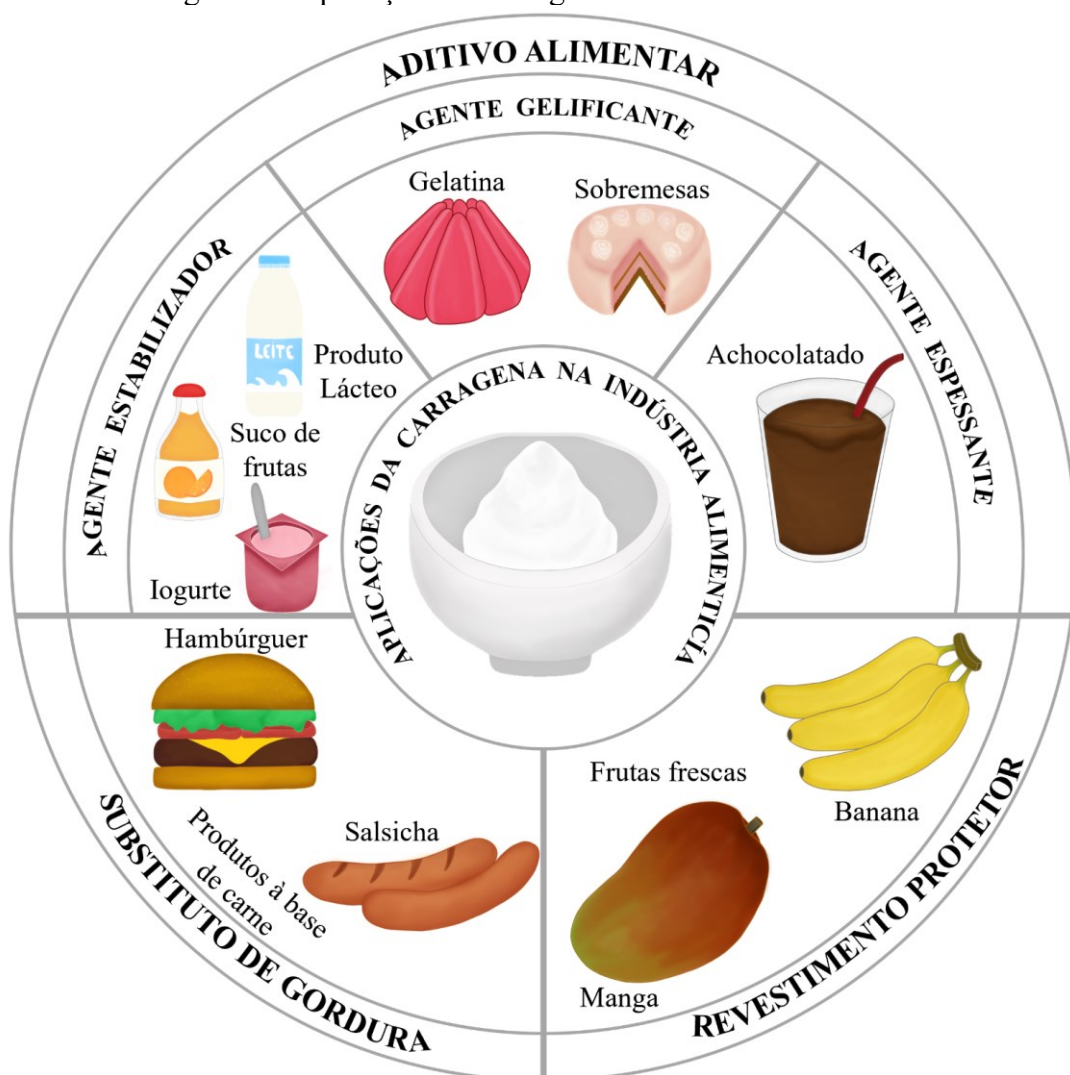
3.4.2 Carragena

A carragena é um polissacarídeo extraído de algas vermelhas e é amplamente utilizado na indústria alimentícia, sendo aprovado para consumo humano pela Food and Drug Administration (FDA) (Das *et al.*, 2021; David *et al.*, 2018; Rhim, 2012). A carragena é considerada um dos hidrocoloides de algas marinhas mais utilizados em produtos alimentícios, com suas principais fontes provenientes de algas vermelhas, como *K. alvarezii*, *Eucheuma*

denticulatum, *Chondrus crispus* e *Sarcothalia crispate* (Ili Balqis *et al.*, 2017; Mustapha *et al.*, 2011; Naseri; Løvstad Holdt; Jacobsen, 2019).

A carragena pode ser obtida em sua forma refinada de alta pureza ou semi-refinada (SRC). A forma SRC contém, além da carragena, matérias insolúveis, como a celulose (Farhan; Hani, 2017; Qin, 2018). Devido às suas propriedades gelificantes, a carragena é utilizada como emulsificante e espessante em diversos produtos, incluindo pasta de dente, cosméticos, sorvetes, alimentos para animais de estimação, bebidas, produtos farmacêuticos, cuidados pessoais e na indústria leiteira (Mantri *et al.*, 2017). A Figura 4 apresenta as principais aplicações alimentares desse polissacarídeo, juntamente com exemplos de alimentos que o utilizam.

Figura 4 – Aplicações da carragena na indústria alimentícia



Fonte: adaptado de Gullón *et al.* (2020) e Dong, Xei e Xue (2021)

A carragena é classificada em seis tipos principais com base em suas propriedades físicas e na estrutura das unidades repetitivas de dissacarídeos: kappa (κ -), lambda (λ -), iota (ι -), nu (ν -), mi (μ -) e teta (θ) (Khotimchenko *et al.*, 2020). Entre esses tipos, os mais relevantes comercialmente são (Fellows, 2016; Khotimchenko *et al.*, 2020):

- a) κ -carragena: obtida da espécie *K. alvarezii*, caracteriza-se por formar géis duros e quebradiços;
- b) λ -carragena: isolada de espécies pertencentes aos gêneros *Gigartina* e *Chondrus*, possui como característica ser solúvel tanto em água fria quanto quente e não formar gel;
- c) ι -carragena: extraída da alga marinha *E. denticulatum*, forma géis macios e resilientes, com boa estabilidade durante processos de congelamento e descongelamento.

Dentre esses tipos, a κ -carragena é a mais amplamente explorada, especialmente nas indústrias de alimentos e bebidas (Das *et al.*, 2021). Para a produção de SRC de alta qualidade, é essencial atender a critérios como viscosidade e resistência do gel. Comparando esses critérios com parâmetros de processos industriais e pesquisas anteriores, as condições ideais para a extração com tratamento alcalino seriam: temperatura de cozimento de 80 °C, tempo de cozimento de 30 minutos e concentração de KOH de 10 % (m/m). (Bono; Anisuzzaman; Ding, 2014).

3.5 SECAGEM

A secagem é o processo de remoção de água de um material sólido (PARK *et al.*, 2007). Esse fenômeno ocorre devido à diferença entre a pressão de vapor da água contida no material e a pressão de vapor da água no ambiente circundante. A umidade presente no material sólido exerce uma pressão de vapor, que é influenciada pela maneira como a água está ligada, pela estrutura do material sólido e pela temperatura. Por outro lado, o ar ambiente possui uma pressão parcial de vapor que depende de sua umidade relativa e temperatura. Durante o processo de secagem, o material, seja ele sólido, suspensão ou solução, perde gradualmente umidade para o ambiente até que a pressão parcial da água no material se iguale à pressão parcial da água no ar de secagem (Geankoplis, 1993).

Na indústria alimentícia, a secagem é uma técnica amplamente empregada para preservar alimentos devido à redução da atividade de água (a_w). Ademais, a secagem permite a redução do peso e do volume do alimento, o que, por sua vez, diminui os custos relacionados ao transporte e armazenamento. Isso facilita a oferta diversificada de produtos alimentícios (Ordóñez, 2005). Além disso, a redução da atividade de água inibe o crescimento de microrganismos e a atividade enzimática, prolongando, assim, a vida útil dos alimentos (Fellows, 2016). No entanto, é importante notar que qualquer aumento no teor de umidade durante o armazenamento pode levar à rápida deterioração dos produtos (Fellows, 2016).

A taxa de secagem e as propriedades do produto final são diretamente afetadas por condições externas do processo, como temperatura do ar, umidade, velocidade e direção do fluxo de ar. Além disso, a taxa de secagem é igualmente dependente de fatores internos, incluindo a geometria, espessura, formato e estrutura do produto (Castro; Mayorga; Moreno, 2018).

Na literatura consultada (Tabela 2), observa-se que uma parcela significativa dos estudos relacionados à secagem da biomassa de algas marinhas dos gêneros *Ulva* e *Kappaphycus* se concentra na secagem em condições não controladas, seja ao ar livre, diretamente exposta ao sol ou na sombra. A opção por abordagens não controladas se deve à simplicidade e ao menor custo, e muitas vezes a biomassa é seca perto do local de coleta para economizar em transporte e equipamentos.

No entanto, em aplicações que exigem rigoroso controle de qualidade e precisão científica, como a produção de filmes, métodos de secagem controlada, como o uso de estufas, são frequentemente empregados. Essas abordagens permitem reduzir o tempo de secagem e controlar os parâmetros, incluindo temperatura e umidade relativa do ar.

Tabela 2 – Revisão de artigos sobre a secagem de espécies dos gêneros *Ulva* e *Kappaphycus* e dos filmes obtidos a partir da biomassa ou extratos dessas algas marinhas

Amostra	Referência	Condições de Secagem			
		Método	T (°C)	t	
Gênero <i>Ulva</i>	Pádua, Fontoura e Mathias (2004)	Estufa	50	-	
	Rasyid (2017)	Solar	-	5 dias	
	Udayangani, Wijesekara e Wickramasinghe (2019)	Estufa	60	8 h	
	Guidara et al. (2020)	Ar livre	38	84 h	
	Davoodi, Milani e Farahmandfar (2021)	Estufa	60	-	
		Temperatura ambiente	-	4 dias	
	Sravani et al. (2023)	Secador solar com exposição ao sol de 6 h		45	24 h
		Estufa		50	15 h
	Gênero <i>Kappaphycus</i>	Bono, Anisuzzaman e Ding (2014)	1° secagem: Solar	-	-
2° secagem: Estufa			60	15 - 16 h	
Suresh Kumar, Ganesan e Rao (2015)		Estufa	60	-	
Soliman et al. (2017)		Estufa a vácuo com pressões de 10, 15 ou 20 kPa	50, 60 ou 70	9 - 30 h	
Abdul Khalil et al. (2018)		Estufa	40	72 h	
Lopes (2020)		1° secagem: Na sombra	-	7 dias	
		2° secagem: Estufa convectiva	40	9,5 - 10 h	
Murugan et al. (2023)		Na sombra	25	5 dias	
Filmes com biomassa ou compostos extraídos das espécies do gênero <i>Ulva</i> ou <i>Kappaphycus</i>	Rhim (2012)	Temperatura ambiente	22	24 h	
	Cian et al. (2014)	Estufa convectiva	60	05 h	
	Farhan e Hani (2017)	Temperatura ambiente	25	36 h	
	Abdul Khalil et al. (2018)	Estufa	40	24 h	
	Ramu Ganesan, Shanmugam e Bhat (2018)	Estufa	50	24 h	
	Wahyuni et al. (2019)	Estufa	60	15 h	
	Guidara et al. (2020)	Estufa	45	24 h	
	Jayakody, Vanniarachchy e Wijesekara (2021)	Estufa	60	15 h	
	Sinurat, Fransiska e Livia (2021)	Estufa	45	24 h	
	Davoodi, Milani e Farahmandfar (2021)	Estufa	35	16 h	

Fonte: elaborado pelo autor

3.5.1 Atividade de água e isotermas de sorção

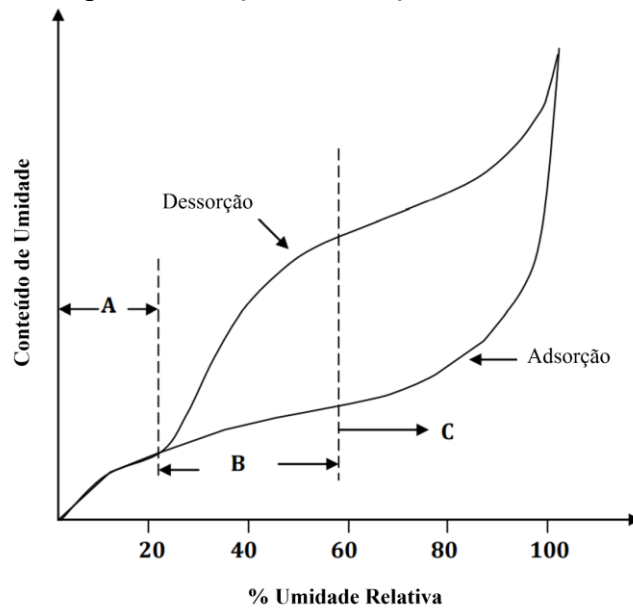
A água é um dos constituintes mais significativos nos alimentos, tendo um impacto direto em sua qualidade, estabilidade e propriedades físicas (Simão, 2018). O grau de disponibilidade de água em um alimento pode ser expresso como atividade de água (a_w), sendo estimada como a razão entre a pressão do vapor da água no alimento (P) e a pressão da água pura (P_o) à mesma temperatura (Fellows, 2016):

Os valores de atividade de água variam de 0 a 1,0, sendo que, para a_w abaixo de 0,6 quase toda atividade microbiana é inibida, abaixo de 0,7 a maioria dos fungos são inibidos, abaixo de 0,8 a maioria das leveduras são inibidas e abaixo de 0,9 a maioria das bactérias são inibidas. A troca do vapor da água entre um alimento e o ar ambiente em que se encontra depende tanto do alimento (seu teor de umidade e composição) quanto das condições de ar (temperatura e umidade). A uma temperatura constante, o teor de umidade do alimento se altera até entrar em equilíbrio com o vapor de água do ar ambiente. O teor de umidade de um alimento em equilíbrio com uma determinada umidade do ar e temperatura constante é denominado de umidade de equilíbrio (X_{eq}). A relação entre o teor de umidade de equilíbrio e a umidade relativa do ar (pode ser trocada pela a_w) em uma determinada temperatura, define a isoterma de sorção de umidade de um alimento (Fellows, 2016).

Cada alimento possui uma forma típica de isoterma de sorção, que é causada por diferenças na estrutura física, composição química e extensão da ligação da água no alimento. Essas isotermas podem ser determinadas por meio de processos de adsorção, umedecendo alimentos secos, ou por meio de processos de dessorção, obtidos por meio da secagem de alimentos úmidos, como ilustrado na Figura 5. A isoterma de sorção pode ser dividida em três regiões distintas (Fellows, 2016; Jangam; Mujumdar, 2010):

- a) região A: a água está fortemente ligada e não está disponível para reação. Esta região há essencialmente uma monocamada de adsorção de vapor de água e não existe distinção entre as isotermas de adsorção e dessorção;
- b) região B: a água está mais fracamente ligada, adsorvida nas multicamadas acima da monocamada e condensada em capilares menores;
- c) região C: a água está mais livre e encontra-se em capilares maiores, além disso apresenta-se disponível para as reações e uso como solvente.

Figura 5 – Isoterma típicas de sorção e dessorção de umidade em um alimento

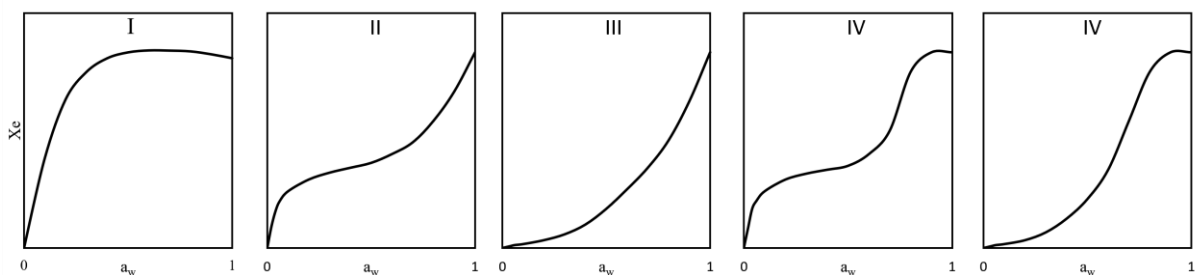


Fonte: adaptado de Jangam e Mujumdar (2010)

A diferença entre essas curvas de adsorção e dessorção é definida como histerese. Uma das razões para as curvas em um mesmo ponto apresentarem diferentes teores de umidade, é que durante o processo de dessorção, alguns solutos a uma determinada a_w podem supersaturar abaixo da sua cristalização, dessa forma, mais água é retida à medida que a a_w é reduzida. Outra explicação é que os capilares podem esvaziar de forma distintas na dessorção, as extremidades estreitas deles absorvem e retêm água abaixo da a_w , enquanto, que no processo de adsorção, esses capilares restringem a entrada de água (Barbosa-Cánovas *et al.*, 2007).

As isotermas de sorção de umidade podem ser categorizadas em cinco tipos (Figura 6), levando em consideração a variação do teor de umidade em relação à atividade de água do produto. Em contextos alimentícios, as isotermas de maior relevância são as do tipo II e III, referentes a produtos higroscópicos (Brunauer; Emmett; Teller, 1938).

Figura 6 – Tipos de isotermas de sorção



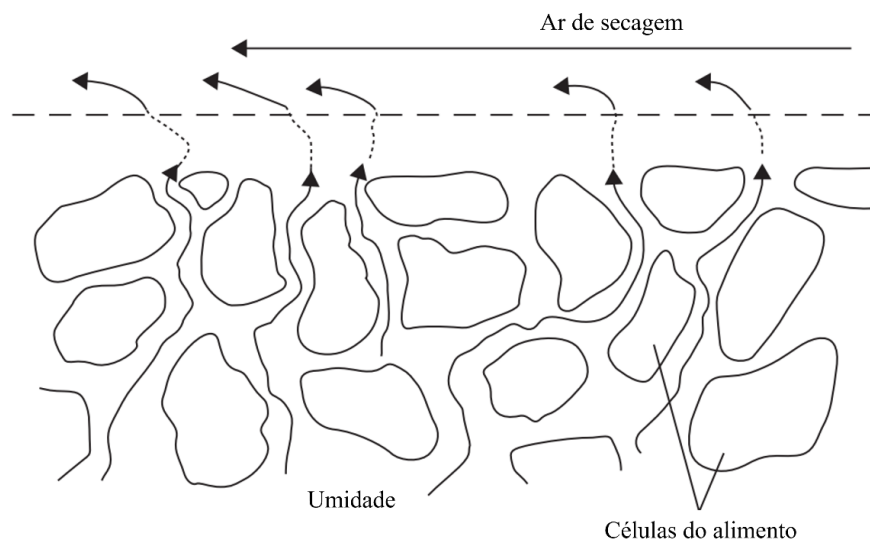
Fonte: adaptado de Brunauer; Emmett; Teller, (1938)

3.5.2 Secagem convectiva

A secagem convectiva é um dos métodos de desidratação mais amplamente empregados na indústria, envolvendo a remoção de água por meio da transferência simultânea de calor e massa. Nesse processo, o calor necessário é fornecido ao produto por meio de uma corrente de ar quente (Castro; Mayorga; Moreno, 2018).

Durante a secagem convectiva, um fluxo de ar quente é direcionado sobre um alimento úmido. O vapor de água presente no alimento se difunde através de uma camada limite de ar que o rodeia e é transportado pelo fluxo de ar, saindo do interior do produto para o ambiente circundante (Figura 7). Os principais fatores que influenciam a taxa de secagem são a umidade, a temperatura e a velocidade do ar.

Figura 7 – Representação esquemática do movimento da umidade durante a secagem



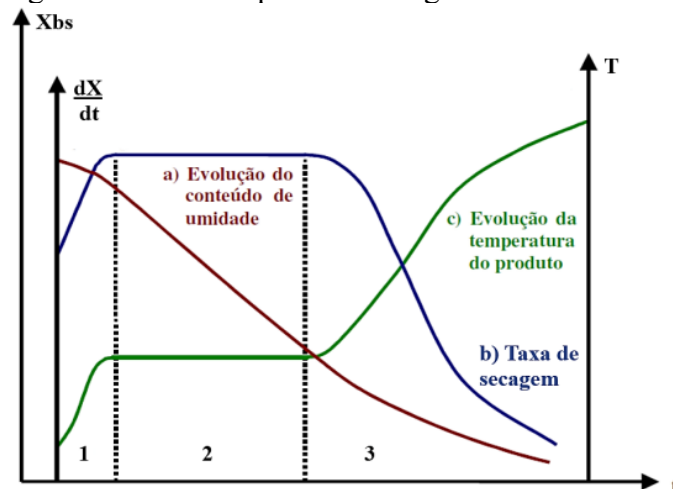
Fonte: adaptado de Fellows (2016)

Na Figura 8 são apresentadas as curvas de evolução temporal da umidade, em base seca (X_{bs}), a curva da taxa de secagem (dX/dt) e a curva da evolução temporal de temperatura do produto (T) durante o processo de secagem. Essas curvas revelam três períodos distintos do processo de secagem, que são descritos a seguir (FELLOWS, 2009; Geankoplis, 1993):

- a) período 1 – Fase de adaptação: neste estágio, o produto está a uma temperatura menor do que a temperatura de secagem, mas essa temperatura aumenta rapidamente até alcançar a temperatura de bulbo úmido do ar;

- b) período 2 – Taxa constante: nesta região, ocorre a secagem à taxa constante, onde a superfície do material está saturada de água. Isso continua até que a água do interior do material se mova para a superfície à mesma taxa em que evapora. O término desse período ocorre quando a superfície do produto fica insaturada de água, ou seja, quando a umidade crítica (X_c) é atingida. A partir desse ponto, a taxa de secagem começa a diminuir;
- c) período 3 – Taxa decrescente: nesse período, a velocidade de difusão da água do interior do produto para a superfície é menor do que a velocidade de evaporação da água. Portanto, a temperatura do material aumenta até alcançar a temperatura de bulbo seco do ar de secagem. O processo de secagem termina quando o material atinge a umidade de equilíbrio (X_{eq}), que corresponde à menor umidade que o material pode atingir no processo de secagem, nas condições em que está submetido.

Figura 8 – Curvas típicas da secagem convectiva



Fonte: adaptado de Park et al. (2007 apud SIMÃO, 2018)

3.6 MÉTODOS DE OBTENÇÃO DE FILMES

A técnica mais amplamente empregada para a produção de filmes em laboratório é conhecida como *casting*, que envolve o derramamento de uma suspensão em um molde (como uma placa de Petri) e a subsequente secagem em uma estufa com circulação de ar forçada (Monte, 2016). Esse método é especialmente indicado para a fabricação de filmes comestíveis, uma vez que as altas temperaturas usadas em outras técnicas podem degradar a maioria dos

biopolímeros, resultando na perda de propriedades físicas desejáveis e na formação de materiais secos e amorfos (vítreos e quebradiços) (Viana *et al.*, 2018).

Na literatura, filmes comestíveis baseados em algas marinhas são produzidos quase que exclusivamente pelo método de *casting*. No entanto, segundo Moraes (2013), esse método de preparação apresenta algumas desvantagens, como a dificuldade de incorporar materiais de naturezas distintas, problemas na remoção dos filmes do suporte utilizado, desafios na escalabilidade e tempos de secagem prolongados.

3.7 PROPRIEDADES DOS FILMES

A seguir estão descritos os principais parâmetros de qualidade dos filmes comestíveis.

3.7.1 Espessura

O controle da espessura dos filmes desempenha um papel fundamental na garantia da uniformidade, repetibilidade e validade das comparações das propriedades dos filmes. Uma falta de uniformidade na espessura pode resultar em problemas mecânicos e de conservação (Amaral, 2014). No entanto, o controle da espessura dos filmes pode ser um desafio, especialmente quando eles são produzidos por meio do método de "casting", pois suspensões filmogênicas com alta concentração de polímeros tendem a ser viscosas e, portanto, dificultam a obtenção de uma distribuição homogênea (Sobral, 2000).

Além disso, a espessura dos filmes pode ser influenciada por várias condições, tais como:

- a) uso de polissacarídeos na produção de filmes, devido as condições utilizadas na extração e a concentração nos filmes (Guidara *et al.*, 2020; Sulastri *et al.*, 2021);
- b) uso de plastificantes na produção de filmes, em decorrência do tipo de plastificante a as concentrações utilizadas (Guidara *et al.*, 2020; Ili Balqis *et al.*, 2017);
- c) composição das matérias-primas utilizadas na produção de filmes, em decorrência por exemplo do teor de proteínas (Blanco-Pascual; Gómez-Guillén; Montero, 2014);
- d) as condições de secagem utilizadas na produção de filmes (Moraes; Reszka; Laurindo, 2014; Simão *et al.*, 2021).

3.7.2 Textura

A textura de alimentos pode ser definida como uma propriedade sensorial e funcional relacionada às características estruturais, mecânicas e à superfície dos alimentos. Ela é percebida por receptores humanos, incluindo os sentidos mecânicos, táteis, visuais e auditivos (Szczeniak, 2002). A textura desempenha um papel fundamental na aceitabilidade dos produtos alimentícios pelos consumidores e, portanto, é considerada uma das características sensoriais mais importantes em termos de qualidade (Simão, 2018).

Durante o processo de mastigação, diversas informações sobre a textura dos alimentos são transmitidas ao cérebro a partir de sensores na boca, bem como do sentido da audição e da memória. Isso ocorre em várias etapas (Fellows, 2016):

- a) inicialmente observa-se a dureza, a capacidade de ruptura e a consistência do alimento durante a primeira mordida;
- b) em sequência, durante a mastigação, percebemos a mastigabilidade, adesividade, gomosidade, umidade e oleosidade do alimento;
- c) por fim, avaliamos a taxa de desintegração do alimento durante a mastigação, os tipos de pedaços formados, a liberação ou absorção de umidade e qualquer revestimento da boca ou língua formado pelo alimento.

Além de análises sensoriais, podem ser avaliados os atributos de textura dos alimentos por meio de análises instrumentais. A avaliação sensorial fornece uma descrição mais completa da textura dos produtos, no entanto, tem havido um grande interesse no desenvolvimento de métodos instrumentais para avaliar os atributos de textura. Os testes instrumentais apresentam algumas vantagens, principalmente para a indústria, onde métodos rápidos e fáceis de usar são muito procurados e economicamente mais rentáveis (Roudaut *et al.*, 2002).

No contexto dos filmes de algas, a textura é uma característica importante. Por exemplo, os filmes de nori são conhecidos por sua crocância elevada, e, portanto, são frequentemente embalados com absorvedores de umidade para preservar sua qualidade e textura crocante (Jung; Yoon; Matsukawa, 2022). No entanto, é importante observar que a textura do nori torna-se rígida quando exposta a altos níveis de umidade devido à sua capacidade de absorver água do ambiente. Portanto, compreender os mecanismos que afetam a textura em relação ao teor de umidade é essencial para manter e controlar a qualidade desses produtos e produtos similares.

Em relação à produção de filmes comestíveis à base da alga marinha *K. alvarezii*, é crucial equilibrar a concentração dessa alga na formulação. Isso ocorre porque essa espécie contém carragena em sua composição, e, quanto maior a concentração utilizada, espera-se uma maior plasticidade devido à ação gelificante desse polissacarídeo. A análise sensorial realizada em filmes comestíveis produzidos a partir de mamão da montanha (*V. pubescens*) adicionado de açúcar e diferentes concentrações de *K. alvarezii* (1, 2 e 3%), demonstrou que a preferência desejada para textura foi de filmes com 2% da alga marinha (Sukotjo; Nurani; Juliansyah, 2021). Isso se deve ao fato de que concentrações mais elevadas de *K. alvarezii* resultaram em filmes com uma textura plástica, tornando sua mastigação mais difícil.

3.7.3 Propriedades mecânicas

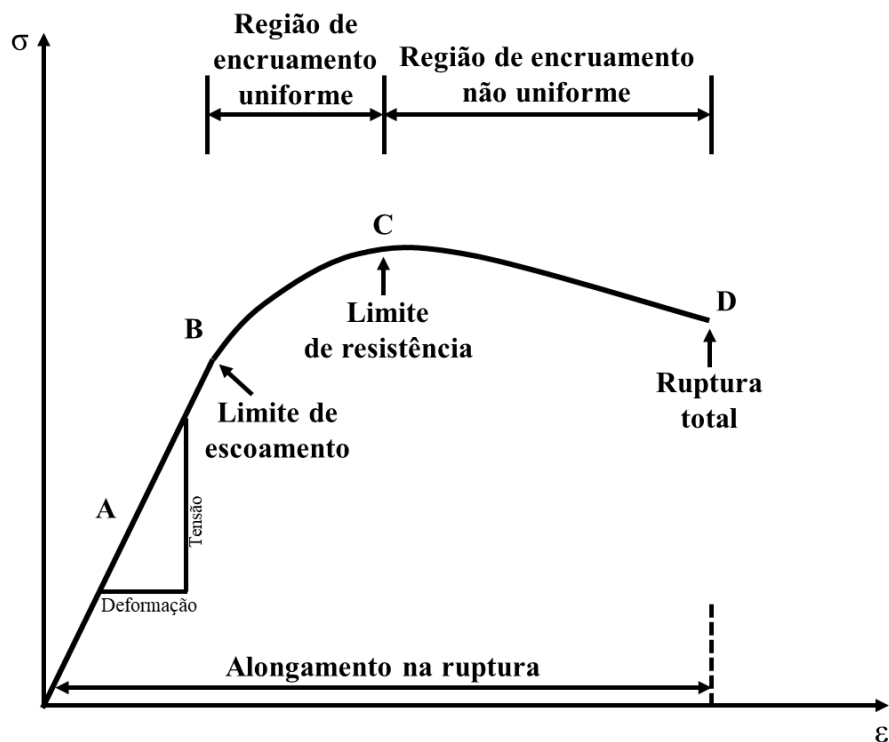
Nos filmes flexíveis, as propriedades mecânicas são influenciadas por diversos fatores, incluindo a espessura, as características intrínsecas do material e o processo de fabricação. A avaliação das propriedades mecânicas de filmes flexíveis é frequentemente realizada por meio de ensaios de tração, que são fundamentais para identificar e caracterizar esses materiais, além de desempenhar um papel crucial no desenvolvimento, especificação e avaliação da qualidade dos filmes (SARANTÓPOULOS et al, 2002, apud MORAES, 2013).

As principais propriedades mecânicas avaliadas nos testes mecânicos de tensão incluem:

- a) tensão de ruptura (σ_{rup}), que geralmente é expressa em unidades de tensão (Pa), refere-se a tensão máxima suportada pelo filme, sob as condições de ensaio, que depende da velocidade de deformação aplicada;
- b) alongamento na ruptura (ϵ_{rup}) informa sobre a capacidade de alongamento do filme. Seu resultado é geralmente expresso em porcentagem;
- c) módulo de Young (Y), cuja unidade é dada em unidades de tensão (Pa), diz a respeito da rigidez do filme, sendo calculada pelo coeficiente angular da porção linear da curva de tensão-deformação.

Na Figura 9, apresenta uma curva típica de um ensaio de tração em filme polimérico.

Figura 9 – Curva típica de tensão-deformação para filme polimérico submetido a um ensaio de tração



Fonte: adaptado de Lim e Hoag (2013)

Neste cenário, o filme é fixado em garras e submetido a uma tensão com taxa constante até que ocorra a ruptura. A curva tensão-deformação mostrada na Figura 9 pode ser dividida em várias regiões (Lim; Hoag, 2013; Shackelford, 2008):

- região A→B: representa a deformação elástica, que é uma deformação temporária, onde caso a aplicação de carga for cessada o material retornará as dimensões originais;
- região B→D: representa a deformação plástica, que é uma deformação permanente, ou seja, caso a aplicação de carga for cessada o material não retornará as dimensões originais. O início da deformação plástica é definido pela tensão limite de escoamento, que é a interseção da curva de deformação com uma linha reta paralela a linha de deformação elástica, deslocada 0,2% no eixo de deformação. Dentro da deformação plástica existe ainda duas outras regiões:
 - Região B→C: representa a região de encruamento uniforme, caracterizada pelo aumento da resistência do material com o aumento da deformação, até a tensão limite de resistência a tração, que é a tensão máxima alcançada;

- Região C→D: representa a região de encruamento não uniforme, que ocorre após a tensão limite de resistência a tração, onde, inicia-se o processo de ruptura que se estende até a ruptura total do material.

No Quadro 3, encontra-se algumas propriedades mecânicas avaliadas em filmes comestíveis produzidos com extratos ou com a biomassa *in natura* de algas marinhas. Em filmes comestíveis, foi observado que o aumento na quantidade de plastificantes, como glicerol e sorbitol, resulta em uma redução da σ_{rup} e um aumento no ϵ_{rup} (Guidara *et al.*, 2020). Em outras palavras, a incorporação de uma quantidade significativa de plastificantes melhoram a elasticidade e flexibilidade dos filmes, mas, por outro lado, reduz sua resistência. A análise revela que a composição das algas e outros componentes desempenha um papel crucial nas propriedades mecânicas dos filmes à base de algas. Variações nas concentrações, especialmente de plastificantes, têm um impacto significativo nas propriedades finais desses filmes. Os estudos enfatizam, assim, que os filmes à base de algas marinhas possuem uma notável capacidade de gerar diversidade nas propriedades mecânicas, destacando sua adaptabilidade para uma ampla gama de aplicações na indústria alimentar.

Quadro 3 – Filmes comestíveis produzidos com o uso de biomassa de algas marinhas ou extratos delas. Onde, σ_{rup} é tensão de ruptura, ϵ_{rup} é alongamento de ruptura e Y é módulo de Young

(continua)

Aplicação	Referência	Matéria-Prima	Resultados
Filmes com possíveis aplicações em embalagens ou revestimentos de alimentos			
	Rhim (2012)	Diferentes concentrações de ágar e kappa-carragena com ou sem nanoargila e glirescol	Espessura: 0,058 – 0,0673 mm σ_{rup} : 31,03 – 45,0 Mpa ϵ_{rup} : 19,5 – 45,2 %
	Blanco-Pascual, Gómez-Guillén e Montero (2014)	Extratos aquosos de <i>Mastocarpus stellatus</i> com adição de 30 % de glicerol (m/m)	Umidade: 12,10 – 20,08 % Espessura: 0,043 – 0,088 mm σ_{rup} : 13,88 – 16,16 MPa ϵ_{rup} : 1,28 – 4,11 % Y: 316,56 – 552,63 MPa
	Cian et al. (2014)	Frações de proteínas extraídas de <i>Porphyra columbina</i>	Umidade: 11,19 – 20,72 % Espessura: 0,0129 – 0,02723 mm σ_{rup} : ± 2 – 50 MPa ϵ_{rup} : ± 3 – 50 % Y: ± 1 – 17,5 MPa
	Siah, Aminah e Ishak (2015)	<i>K. alvarezii</i>	Espessura: 0,076 mm σ_{rup} : 6,82 Mpa ϵ_{rup} : 17,90 %
	Farhan e Hani (2017)	Kappa-carragena semirefinada sem ou com adição de 20, 25 ou 30 % de Glicerol ou Sorbitol (m/m)	Umidade: 7,7 – 14,5 % Espessura: 0,057 – 0,079 mm σ_{rup} : 40,30 – 48,74 MPa ϵ_{rup} : 1,77 – 10,01 %
	Ili Balqis et al. (2017)	Kappa-carragena com adição de 10, 20, 30, 40, 50 ou 60 % de Glicerol, Sorbitol ou PEG-300 (m/m)	Umidade: 2,61 – 35,41 % Espessura: 0,031 – 0,056 mm σ_{rup} : 40 – 70 MPa ϵ_{rup} : 3 – 16 %
	Abdul Khalil et al. (2018)	Amido de milho e <i>K. alvarezii</i> com adição de 30% de glicerol (m/m)	Espessura: 0,0587 – 0,1451 mm σ_{rup} : 17,73 – 65,73 MPa ϵ_{rup} : 6,17 – 18,40 % Y: 1,64 – 7,06 %

Quadro 2 – Filmes comestíveis produzidos com o uso de biomassa de algas marinhas ou extratos delas. Onde, σ_{rup} é tensão de ruptura, ϵ_{rup} é alongamento de ruptura e Y é módulo de Young

(continua)

Aplicação	Referência	Matéria-Prima	Resultados
Filmes com possíveis aplicações em embalagens ou revestimentos de alimentos			
	Ramu Ganesan, Shanmugam e Bhat (2018)	Diferentes concentrações de carragena extraída de <i>K. alvarezii</i> e ulvano de <i>U. fasciata</i> , adicionado de 30% de glicerol	Umidade: 14,44 – 17,86 % Espessura: 0,088 – 0,118 mm σ_{rup} : 36,78 – 49,12 MPa ϵ_{rup} : 7,98 – 11,02 %
	Guidara et al. (2020)	Ulvano extraído de <i>U. lactuca</i> misturado com diferentes concentrações de glicerol e sorbitol (1 ou 2% p/v)	Umidade: 10,12 – 31,29 % Espessura: 0,11 – 0,17 mm σ_{rup} : \pm 0,10 – 3,5 MPa ϵ_{rup} : \pm 10 – 39 %
	Abdillah e Charles (2021)	Iota-carragena e amido de araruta com adição de 30% de glicerol (v/v)	Umidade: 13,06 – 18,02 % Espessura: 0,066 – 0,084 mm σ_{rup} : 0,1684 – 2,204 MPa ϵ_{rup} : 32,649 – 72,616 %
	Davoodi, Milani e Farahmandfar (2021)	Polissacarídeos sulfatados extraídos de <i>U. intestinalis</i> misturados com diferentes concentrações de glicerol e polietilenoglicol	Umidade: 16,03 – 32,86 % Espessura: 0,041 – 0,083 mm σ_{rup} : 5,91 – 36,95 MPa ϵ_{rup} : 11,79 – 38,79 % Y: 75,44 – 1.048,36 MPa
	Yuan et al. (2021)	Polissacarídeos de <i>Sargassum palidatos</i> com de quitosana, ácido acético e glicerol	Espessura: 0,046 – 0,163 mm σ_{rup} : 2,45 – 12,07 N ϵ_{rup} : 16,38 – 54,18 %
	Zhang et al. (2021)	Ágar extraído de <i>Gracilaria lemaneiformis</i> misturado com alginato de sódio e cloreto de cálcio, sendo vertido sobre uma solução composta por ágar também extraído de <i>G. lemaneiformis</i> , alginato de sódio, Tween 80 e diferentes óleos essenciais	Espessura: 0,12757 – 0,2128 mm σ_{rup} : 1,42 – 12,44 Mpa ϵ_{rup} : 73,54 – 120,42 %
	Murugan et al. (2023)	Biomassa de <i>K. alvarezii</i> com ou sem glicerol (v/v) mais compostos fitoterápicos	Umidade: 11,0 – 19,9 % Espessura: 0,01 – 0,10 mm σ_{rup} : 1,157 – 6,727 MPa ϵ_{rup} : 0,4 – 7,8 %

Quadro 2 – Filmes comestíveis produzidos com o uso de biomassa de algas marinhas ou extratos delas. Onde, σ_{rup} é tensão de ruptura, ϵ_{rup} é alongamento de ruptura e Y é módulo de Young

(Conclusão)

Aplicação	Referência	Matéria-Prima	Resultados
Filmes comestíveis para serem utilizados como alimento			
		Diferentes concentrações de <i>Gracilaria</i> sp. e <i>Arenga pinnata</i> tingidas com corante verde natural de <i>Pleomele angustifolia</i>	Espessura: 0,17 – 0,58 mm σ_{rup} : 0,03 – 0,16 Mpa
		Diferentes concentrações de kappa-carragena com folhas de <i>kelor (Moringa 51leifera L.)</i>	Espessura: 0,015 – 0,095 mm ϵ_{rup} : 9,0 – 13,0 %
		Biomassa de <i>Ulva fasciata</i> com pulverização de oleoresina de gengibre depois de seco	Análise sensorial demonstrou que o odor, sabor, sensação bucal e aceitabilidade geral é melhor para o snack de algas incorporadas com oleoresina de gengibre. O perfil de textura demonstrou que o lanche apresentava os seguintes valores: 0,1 N para dureza; -5,46 para consistência; 14,87 mm para elasticidades; 54,6 g para gomosidade; -7,99 mJ para mastigabilidade
		Mistura de 1:1 de <i>Gracilaria</i> sp. e <i>Ulva</i> sp. com diferentes concentrações de glicerol	Umidade: 9,15 – 13,19 % Espessura: 0,261 – 0,507 mm σ_{rup} : 0,77 – 267 MPa ϵ_{rup} : 8,16 – 13,62 %
		Mistura de fruta <i>Vasconcellea pubescens</i> , açúcar e alga <i>K. alvarezii</i>	Espessura: 1,7 – 2,0 mm O filme da fruta com 1 % da alga marinha foi o preferido pelos provadores da análise sensorial. O filme pôde ser enrolado o que mostra uma boa elasticidade do produto

Fonte: elaborado pelo autor

3.7.4 Cor

A cor dos alimentos desempenha um papel fundamental na aceitação do consumo, sendo um dos atributos de qualidade mais significativos, muitas vezes superando o sabor e a

textura (Frabetti, 2017). A cor de um alimento é influenciada por três fatores principais: *i*) luminosidade que indica o quão próximo a cor está do preto ou do branco; *ii*) tonalidade, que se refere à cor percebida, como verde, vermelho, etc. e *iii*) saturação, que representa a intensidade ou pureza da cor (FELLOWS, 2009).

Nas algas marinhas, a presença de pigmentos, como carotenoides, feofitina e clorofila *a*, desempenha um papel crucial na determinação da cor dos filmes produzidos a partir delas (Naguit; Tisera, 2009). Quando se trata de filmes comestíveis à base de algas, como o nori, eles geralmente são mais bem aceitos pelos consumidores quando apresentam uma coloração mais verde (Sari *et al.*, 2019). Em filmes produzidos a partir de *K. alvarezii* e amido de milho, observou-se que quanto maior a concentração da alga marinha utilizada na produção, maior era a tendência de esses filmes adquirirem tonalidades mais escuras e amareladas (Abdul Khalil *et al.*, 2018).

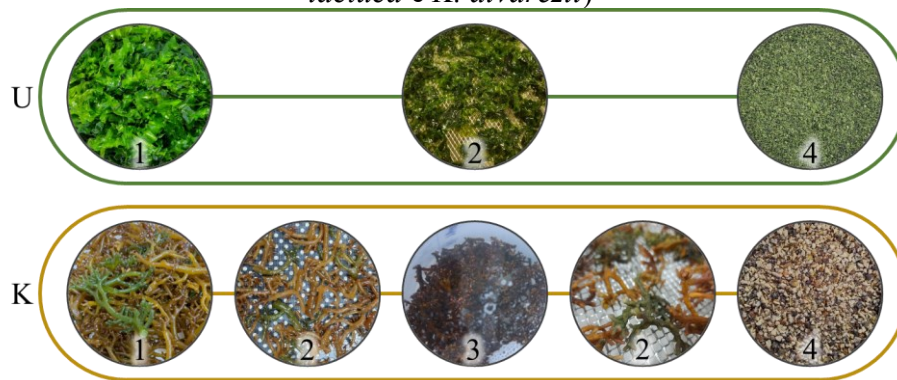
Vale ressaltar que o processo de secagem em temperaturas elevadas pode influenciar negativamente o teor da cor verde nos filmes. Isso ocorre porque as clorofilas, que contribuem para a coloração verde, contêm o elemento químico magnésio no centro da estrutura molecular, o qual pode ser facilmente eliminado por reações com ácidos fracos, resultando dessa reação a feofitina, de cor verde-oliva, insolúvel em água. Além disso, temperaturas elevadas de secagem da biomassa pode gerar as pirofeofitinas (PPP) que são compostos de degradação do pigmento da clorofila (Jayakody; Vanniarachchy; Wijesekara, 2021).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 COLETA E PREPARO DA BIOMASSA DAS ALGAS MARINHAS

A Figura 10 ilustra um resumo gráfico dos processos realizados para obtenção dos pós das algas marinhas *U. lactuca* e *K. alvarezii*. Os detalhes específicos desses processos serão elucidados nas subseções subsequentes.

Figura 10 – Imagens ilustrativas das etapas de produção dos pós das algas marinhas (*U. lactuca* e *K. alvarezii*)



Fonte: elaborado pelo autor

Nota: 1: alga bruta e higienizada; 2: secagem; 3: reidratação; 4: alga moída; U: *Ulva lactuca*; K: *Kappaphycus alvarezii*

4.1.1 *Ulva lactuca*

A biomassa da macroalga *U. lactuca* foi coletada no município de Imbituba, Santa Catarina (28°20'16"S, 48°42'14"W) (Figura 11a). A coleta da biomassa foi realizada em diferentes períodos (janeiro, março, junho e setembro de 2022) com o objetivo de obter uma quantidade de biomassa necessária para a condução dos experimentos. Durante as coletas, as condições do mar registraram um pH de $8,03 \pm 0,11$, salinidade de $33,64 \pm 2,51$ e temperatura de $20,18 \pm 3,48$ °C.

A *U. lactuca* depois de coletada foi transportada em caixa térmica para o Laboratório de Cultivo e Biotecnologia de Algas (LCBA), do Centro de Educação Superior da Região Sul (CERES) da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), localizado no município de Laguna, Santa Catarina. Todas as epífitas, invertebrados e sedimentos foram retirados através da lavagem em água doce. Após isso, a biomassa permaneceu submersa por 15 minutos em

suspensão de água doce com hipoclorito de sódio (200 ppm) para higienização. A amostra foi então embalada e congelada. Posteriormente, os pacotes contendo a biomassa foram transportados em caixa térmica até o Laboratório de Tecnologia de Pescados e Derivados, localizado no Centro de Ciências Agrárias (CCA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em Florianópolis, Santa Catarina e mantidos congelados até posterior uso.

A biomassa foi seca em estufa com circulação e renovação de ar (Novatecnica, Modelo NT 535, Brasil) a 40 °C, sendo cuidadosamente espalhada para evitar sobreposição. Optou-se por uma temperatura mais branda para prevenir possíveis degradações durante o procedimento de secagem. A alga foi seca e depois triturada no moinho de facas (7lab, Modelo Macro930, Brasil) até atingir uma espessura de 30 mesh. Esse processo teve como finalidade reduzir o tamanho das partículas ao máximo, aumentando assim a área de contato. O material resultante foi armazenado em um dessecador para uso posterior.

Figura 11 – Ponto de coleta da *U. lactuca* (a) e do cultivo da *K. alvarezii* (b)



Fonte: Google Earth (2023)

4.1.2 *Kappaphycus alvarezii*

A biomassa da macroalga *K. alvarezii* foi fornecida pela empresa Cavalo Marinho Criação e Beneficiamento de Frutos do Mar, localizada na Enseada do Brito, Palhoça, Santa Catarina (Figura 11b). Depois de coletada foi transportada em caixa térmica para o LCBA (CERES/UFDESC). Todas as epífitas, invertebrados e sedimentos foram retirados através da lavagem em água doce. Após isso, a biomassa permaneceu submersa por 15 minutos em suspensão de água doce com hipoclorito de sódio (200 ppm) para higienização. A amostra foi cuidadosamente distribuída em telas vazadas e submetida à secagem a uma temperatura de 40 °C utilizando uma desidratadora de alimentos (DAS, Modelo DS-800, Brasil). Após a secagem, a biomassa foi devidamente transportada até o Laboratório de Tecnologia de Pescados e Derivados (CCA/UFSC).

Para empregar a biomassa desta alga marinha como ingrediente, é necessário retirar o excedente de sal presente. Nesse sentido, seguindo a metodologia proposta por Lopes et al. (2023) com algumas modificações, a alga desidratada foi reidratada em água destilada, passando por três ciclos consecutivos de 5 min, cada um envolvendo a substituição da água, seguidos por um último ciclo de 10 min, sob agitação suave. A proporção utilizada foi de 100 g de alga bruta para 4 L de água. Após o processo de reidratação, a biomassa foi distribuída uniformemente em estruturas vazadas, com o objetivo de evitar sobreposição, e em seguida foi colocada em uma estufa com circulação e renovação de ar (Novatecnica, Modelo NT 535) a uma temperatura de 40 °C para secagem. A alga, após o processo de secagem, foi triturada no moinho de facas (7lab, Modelo Macro930, Brasil) até alcançar uma espessura de 10 mesh. A intenção desse procedimento foi maximizar a redução do tamanho das partículas, aumentando, por conseguinte, a área de contato. No entanto, devido à resistência da parede celular dessa alga, que é superior à da *Ulva*, foi essencial adotar uma malha de dimensões diferentes. O material resultante desse processo foi armazenado em um dessecador para uso futuro.

4.2 CARACTERIZAÇÃO CENTESIMAL DAS ALGAS MARINHAS

As amostras das algas marinhas secas foram analisadas quanto aos teores de cinzas e lipídeos seguindo os métodos analíticos descritos pelo Instituto Adolfo Lutz (2008). A proteína bruta foi determinada conforme o método n° 991.20 (AOAC International, 2016), enquanto o

carboidrato foi definido pela diferença entre 100 e soma dos valores de proteínas, lipídeos, umidade e cinzas conforme descrito na RDC nº 360 (BRASIL, 2003).

4.3 PREPARO DAS SUSPENSÕES FILMOGÊNICAS E DOS FILMES COMESTÍVEIS

Para a formulação das suspensões foi usado como base a metodologia proposta por Fakhouri et al. (2015), mas, devido à utilização de matérias-primas distintas, durante os testes preliminares demonstraram-se mais apropriado realizar os passos ilustrados na Figura 12.

Figura 12 – Etapas do preparo das suspensões e obtenção dos filmes



Fonte: elaborado pelo autor

A seguir, apresenta-se uma descrição detalhada da metodologia empregada na formulação das suspensões e, subsequente, na produção dos filmes comestíveis:

- a) suspensão de *U. lactuca* (100U): o pó pesado (7,8% m/m) foi hidratado com água destilada, sob agitação magnética constante por 1 h e 30 min. Após esse período, a suspensão foi homogeneizada em Ultra-Turrax por 2 minutos a 14.000 rpm;
- b) suspensão de *K. alvarezii* (100K): pó pesado (3% m/m) foi despejado em becker com água destilada e homogeneizado em sequência em Ultra-Turrax por 3 minutos a 14.000 rpm. A suspensão foi vedada com parafilm e papel alumínio, e colocada sob refrigeração a 4 °C por 24 h. Após esse período, a suspensão foi homogeneizada novamente em Ultra-Turrax por 2 minutos a 14.000 rpm.

Após o processo de hidratação realizado para cada matéria-prima, as suspensões foram misturas usando um Ultra-Turrax por 3 minutos a 14.000 rpm em diferentes concentrações de pó de *U. lactuca* (U) por de *K. alvarezii* (K) (Tabela 3) O aquecimento das suspensões foi realizado colocando a suspensão em banho-maria a 90 °C com agitação constante por 3 ou 5 min, foi realizado o monitoramento da temperatura através de termômetro de mercúrio.

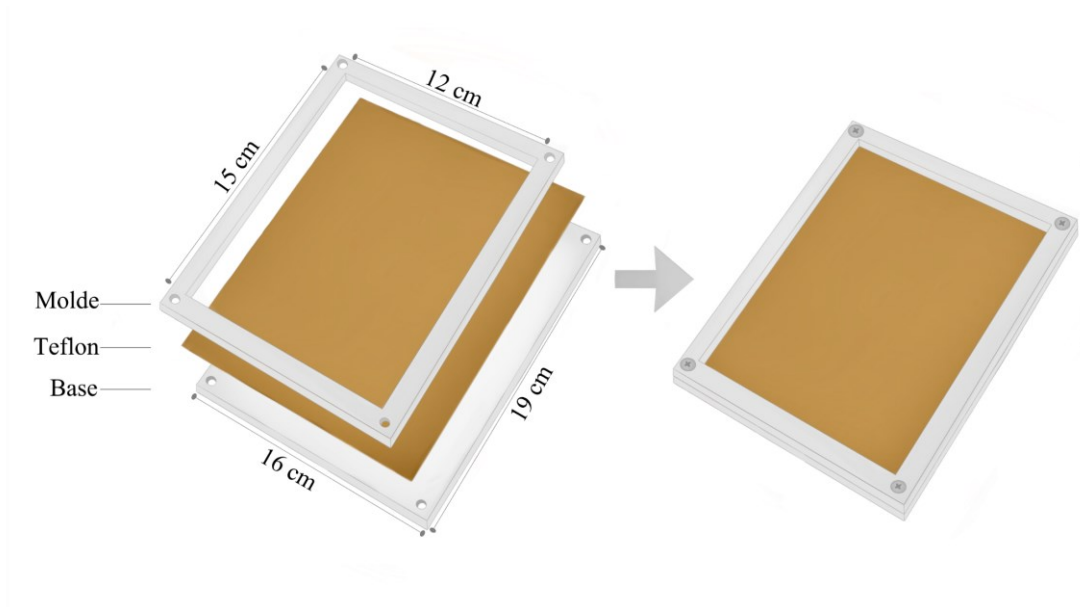
Tabela 3 – Códigos dos tratamentos elaborados variando as concentrações de *U. lactuca* (U) e *K. alvarezii* (K) e os seus respectivos tempos de aquecimento (t)

Código	U (%)	K (%)	Aquecimento (°C)	t (min)
100U	100	-	-	-
100K	-	100	-	-
80U20K	80	20	-	-
80U20K-3	80	20	90	3
80U20K-5	80	20	90	5
70U30K	70	30	-	-
70U30K-3	70	30	90	3
70U30K-5	70	30	90	5
60U40K	60	40	-	-
60U40K-3	60	40	90	3
60U40K-5	60	40	90	5
50U50K	50	50	-	-
50U50K-3	50	50	90	3
50U50K-5	50	50	90	5

Fonte: elaborado pelo autor

Com base em testes preliminares, observou-se que a produção de filmes sem o processo de aquecimento resultava em produtos finais com muitas falhas e frágil. Dessa forma, após a conclusão dos processos citados anteriormente, apenas as suspensões aquecidas foram vertidas em uma estrutura composta por uma base de acrílico de 19 x 16 x 0,6 cm, uma manta de teflon e um molde de 0,2 cm de espessura com uma abertura de 15 x 12 cm (conforme ilustrado na Figura 13). A seguir colocadas para secar em estufa circulação e renovação de ar (Novatecnica, Modelo NT 535, Brasil) a 40 °C.

Figura 13 – Esquema ilustrativo da placa de acrílico utilizada como molde para os filmes comestíveis



Fonte: elaborado pelo autor

4.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

No Quadro 4, encontra-se um resumo das análises conduzidas neste estudo, abrangendo as amostras dos pós das algas marinhas, as suspensões elaboradas, os filmes e o nori.

Quadro 4 – Análises realizadas com os pós, suspensões e filmes das algas marinhas

Parâmetro	Metodologia e análise	Algas marinhas	Suspensões filmogênicas	Filmes	Nori
Composição centesimal	LABCAL, CCA/UFSC	X			
Potencial hidrogeniônico (pH)	pHmetro		X		
Comportamento reológico	Cilindros concêntricos, Reômetro (Central de Análises, EQA/UFSC)		X		
Força do gel	Texturômetro (Central de Análises, EQA/UFSC)		X		
Umidade	AOAC (2005)	X		X	X
Atividade de água	Higrômetro digital	X		X	X
Cinética de secagem	Estufa convectiva	X		X	
Microscopia eletrônica de varredura	LCME	X		X	X
Microscopia óptica e Lupa	LCBA, CERES/UFSC	X	X	X	X
Cor	Colorímetro, escala CIELAB (PROFI, EQA/UFSC)	X		X	X
Opacidade e Transparência	Espectrofotômetro (LABCAL, CCA/UFSC)			X	X
Espessura	Micrômetro digital			X	X
Solubilidade	Dacanal e Megenalli (2009), Lupina et al. (2019), Li et al. (2021)			X	X
Higroscopicidade	Cai e Corke (2000)			X	X
Mecânica	Texturômetro (Central de Análises, EQA/UFSC)			X	X
Isoterma de sorção de umidade	PROFI, EQA/UFSC			X	

Fonte: elaborado pelo autor

4.5 CARACTERIZAÇÃO DAS SUSPENSÕES FILMOGÊNICAS

4.5.1 Potencial hidrogeniônico (pH)

O pH das suspensões foi medido utilizando um pHmetro (Hanna instruments, Modelo HI2020-02, Itália), previamente calibrado com soluções padrão de pH ácido (pH 4) e básico (pH 7). A análise foi realizada em triplicata.

4.5.2 Comportamento reológico

O comportamento reológico das suspensões filmogênicas não aquecidas foi determinado utilizando um reômetro (Anton Paar, Modelo MCR 72, Áustria), empregando-se uma geometria de cilindros concêntricos coaxial com 27 mm de diâmetro (CC 27). As curvas de viscosidade foram obtidas seguindo metodologia descrita por De Moraes et al. (2013) com

modificações, inicialmente houve um aumento da taxa de cisalhamento de $0,0001 \text{ s}^{-1}$ a 600 s^{-1} , durante 10 min. Após isso, manteve-se a 600 s^{-1} por 3 min e então, a taxa de cisalhamento foi variada de maneira decrescente, de 600 s^{-1} a $0,0001 \text{ s}^{-1}$, durante 10 min. As análises foram realizadas em duplicata, à $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

O modelo de Herschel-Bulkley (Equação (1)) foi aplicado nas curvas de tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento ascendente e descendente para todas as amostras.

$$\sigma = \sigma_0 + k\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

Onde, σ é a tensão de cisalhamento, σ_0 é a tensão de cisalhamento inicial, k é o índice de consistência ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$), $\dot{\gamma}$ é a taxa de cisalhamento e n é o índice de comportamento do fluxo. Os parâmetros foram estimados por regressão não linear, utilizando o método dos quadrados, com o programa Statistica 10.0 (StatSoft, Estados Unidos). A análise foi realizada em duplicata e para avaliar a adequação do modelo aos dados experimentais, utilizou-se o coeficiente de correlação (R^2) e a raiz do erro médio quadrático (RMSE).

4.5.3 Força do gel

A força de gel foi avaliada de acordo com Rudke et al. (2022) com adaptações, as suspensões filmogênicas hidratadas e aquecidas a $90 \text{ }^\circ\text{C}$ por 3 ou 5 min, foram armazenadas em recipiente cilíndricos de plástico (50 mm de diâmetro e 50 mm de altura) à $4 \text{ }^\circ\text{C}$ por 24 horas antes da análise. A resistência do gel foi avaliada usando um Texturômetro TA.HD plus (Stable Micro Systems, Inglaterra) e uma probe de aço cilíndrico (11,4 mm de diâmetro e 50 mm de altura). A célula de carga utilizada foi de 50 kg e a velocidade de penetração foi de $2 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ em uma profundidade de 10 mm. Foram realizadas sete leituras para cada amostra e a análise foi realizada em duplicata de amostra.

4.6 CINÉTICA DE SECAGEM

Para desenvolver a curva de secagem da *U. lactuca*, aproximadamente 200 g de biomassa úmida foi uniformemente espalhada em uma forma retangular vazada (48 cm de comprimento e 28 cm de largura), evitando sobreposições. Durante o processo de secagem,

pontos específicos foram selecionados para a coleta de amostras (Quadro 5), a fim de medir a umidade (4.7.1) e a_w (4.7.2). As análises foram conduzidas em duplicata de processo e em triplicata de amostra, em uma estufa com circulação e renovação de ar (Novatecnica, Modelo NT 535, Brasil) a 40 °C.

As curvas de secagem da *K. alvarezii* foram elaboradas para ambas as etapas de secagem realizadas: a primeira secagem e a segunda secagem (após reidratação para remover o excesso de sal). Para isso, placas petri previamente pesadas foram utilizadas para secar as amostras. A redução da massa ao longo do processo de secagem foi acompanhada por pesagens realizadas em pontos definidos (Quadro 5). A primeira secagem foi realizada em uma desidratadora de alimentos (DAS, Modelo DS-800, Brasil), enquanto que a segunda secagem, em estufa com circulação e renovação de ar (Novatecnica, Modelo NT 535, Brasil), ambas operando a 40 °C. As análises foram executadas em duplicata para cada processo de secagem, com seis réplicas de amostras cada.

Quadro 5 – Pontos pré-determinados de retirada para coleta de dados durante a secagem das algas marinhas e dos filmes

Tempo (min)	<i>U. lactuca</i>	1° Secagem - <i>K. alvarezii</i>	2° Secagem - <i>K. alvarezii</i>	Filmes
0	X	X	X	X
30	X	X	X	X
60	X	X	X	X
90	X	X	X	X
120	X	X	X	X
180	X	X	X	X
240	X	X	X	X
300	X	X	X	X
360	X	X	X	X
480	X	X	X	
1440		X		

Fonte: elaborado pelo autor

Quanto aos filmes, as curvas de secagem foram construídas monitorando a massa das amostras ao longo do tempo. Para isso, os moldes de acrílico foram previamente pesados, e em pontos definidos durante a secagem, seus pesos foram registrados (Quadro 5). Foram conduzidas análises em triplicata, com quatro réplicas de amostra para cada análise de secagem. O processo de secagem ocorreu em uma estufa com circulação e renovação de ar (Novatecnica, Modelo NT 535, Brasil), a uma temperatura de 40 °C.

Para as etapas da cinética descritas anteriormente para cada material, durante os pontos de pesagem das amostras, foi coletado dados de temperatura da superfície dos materiais com auxílio de um termômetro infravermelho (FLUKE, modelo 64 Max, USA).

A partir dos resultados obtidos, foi calculada a umidade em base seca (X_s) e foram construídas as curvas de cinética de secagem, expressas em X_s (g.g^{-1}) em função do tempo (minutos). Além disso, o período de secagem na taxa constante foi determinado por meio do ajuste da equação linear (Equação (2)) à primeira parte da curva de secagem. Para isso, foi avaliado desde o início do processo de secagem até o período em que foi possível realizar o ajuste linear, com coeficiente de determinação ($R^2 \geq 0,98$).

$$X = at + b \quad (2)$$

Onde, a é a taxa de secagem ($\text{g.g}^{-1}.\text{min}^{-1}$) e b é a umidade inicial (g.g^{-1} b.s.).

4.6.1 Modelagem matemática da cinética de secagem

Os dados experimentais obtidos na cinética de secagem (variação da umidade ao longo do tempo de secagem), foram adimensionalizados, aplicando-se o cálculo de razão de umidade (X_r):

$$X_r = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} \quad (3)$$

Onde, X_t é a umidade em base seca no tempo t , X_e é umidade de equilíbrio em base seca e X_0 é umidade inicial em base seca.

O ajuste dos modelos matemáticos (Quadro 6) aos dados experimentais foi realizado pela análise de regressão não linear, pelo método dos mínimos quadrados, utilizando o software Statística 10.0 (StatSoft, Estados Unidos). Para avaliar a qualidade dos ajustes dos modelos matemáticos, foram utilizados como parâmetros o valor do coeficiente de determinação (R^2) e a raiz do erro médio quadrático (RMSE).

Quadro 6 – Modelos matemáticos aplicados aos dados obtidos na cinética de secagem

Modelo	Equação	Referência
Page	$X_r = \exp(-kt^n)$	Page (1949)
Midilli	$X_r = a \times \exp(-kt^n) + bt$	Midilli, Kucuk e Yapar (2002)

Fonte: elaborado pelo autor

4.7 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE ALGAS E FILMES

Além dos pós das algas marinhas e dos filmes comestíveis elaborados, foi usado como comparação um nori comercial da marca Kenko.

4.7.1 Umidade

O teor de umidade foi determinado pelo método gravimétrico conforme o método da AOAC (2005), as amostras foram secas em estufa a 105 °C por 24 horas e depois pesadas em balança analítica com precisão de 0,0001 g.

4.7.2 Atividade de água

Para a determinação da atividade de água, as amostras foram previamente trituradas e as determinações realizadas com higrômetro digital pela medida do ponto de orvalho a 25 °C (DecagonDevices, Inc., Modelo Aqualab Series 4TE, EUA). As análises foram realizadas em triplicata.

4.7.3 Solubilidade

A solubilidade dos pós das algas marinhas (SOL_a) foi definida através do método descrito por Dacanal e Megenalli (2009), com algumas modificações. O procedimento em questão consiste na determinação da porcentagem de material não solúvel após 1 minuto de agitação. Inicialmente, foram adicionados aproximadamente 100 mL de água destilada a um béquer. A agitação da solução foi iniciada utilizando um agitador magnético, mantendo o vórtice a uma altura constante de cerca de 3 cm. Uma vez que a agitação do líquido foi estabilizada, introduziu-se aproximadamente 0,5 g da amostra a uma altura de 2 cm do vórtice.

Imediatamente após a inserção da amostra, foi iniciada a contagem do tempo com o auxílio de um cronômetro. Após exatamente 1 minuto de agitação, a solução foi submetida à filtração, utilizando um filtro de papel que havia sido previamente pesado. O filtro de papel, contendo o material retido, foi então colocado em uma estufa a uma temperatura de 105 °C, onde permaneceu por um período de 24 horas. Após a secagem, a massa seca da amostra retida no filtro foi determinada. O percentual de solubilidade do pó foi calculado de acordo com a Equação (4):

$$SOL_a\% = 100 - \left[\frac{m_2}{m_1(1 - X_0)} \times 100 \right] \quad (4)$$

Onde, m_1 é a massa inicial da amostra, m_2 é a massa da amostra remanescente no filtro e X_0 é a umidade inicial da amostra, em base úmida.

A solubilidade dos filmes foi definida pelo método descrito por Li et al. (2021), com algumas modificações. Inicialmente, os filmes foram fragmentados em peças de 4 x 4 cm e pesados (M_1). Esses filmes foram então imersos em 40 mL de água destilada (V_1) durante 24 horas a 25 °C. Após esse intervalo, os filmes comestíveis foram submetidos à centrifugação a 4.000 rpm por 10 minutos, e 25 mL do sobrenadante (V_2) foram retirados e transferidos para placas de Petri previamente pesadas. As placas de Petri foram posteriormente submetidas à secagem a 105 °C por 24 horas e, em seguida, pesadas novamente (M_2). A porcentagem de solubilidade de cada filme (SOL_f) foi calculada utilizando a Equação (5):

$$SOL_f\% = \left[\left(\frac{V_1 \times M_2}{V_2} \right) / M_1 \right] \times 100 \quad (5)$$

4.7.4 Higroscopicidade

A higroscopicidade foi determinada de acordo com a metodologia proposta por Cai e Corke (2000) com algumas modificações. Aproximadamente 0,5 g de cada amostra foram pesados em cápsulas plásticas, que foram colocadas em dessecador contendo uma solução saturada de NaCl (umidade relativa de 75 %) a 25 °C. Após 7 dias as amostras foram pesadas e a higroscopicidade foi expressa como g de umidade adsorvida por 100 g de massa seca da amostra ($\text{g} \cdot 100\text{g}^{-1}$).

4.7.5 Análise subjetiva

A avaliação subjetiva dos filmes foi conduzida seguindo os critérios estabelecidos por Gontard (1991), abrangendo os seguintes atributos: continuidade (ausência de ruptura após a secagem), uniformidade (ausência de partículas insolúveis visíveis a olho nu ou presença de cores diferentes) e manuseabilidade (possibilidade de ser manuseado sem riscos de ruptura).

4.7.6 Microscopia

A análise da superfície das amostras (pó das algas marinhas, filmes e nori) foram colocadas em lâminas, cobertas com lamínulas de vidro e observadas em microscópio óptico com aumentos de 4 e 10 vezes (Lumen, modelo LM3200TLI) e em um estereomicroscópio (Lumen, modelo LM360BZ).

A microestrutura da superfície dos pós das algas marinhas e filmes (superfície exposta ao ar de secagem e fratura) foram observadas pela microscopia eletrônica de varredura (MEV). As amostras foram recobertas com uma camada de ouro utilizando um metalizador (LEICA, Modelo SCD 500, EUA) e para as análises foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (Modelo JEOL JSM-6390LV, Japão), com fonte de elétrons de tungstênio de 8 kV.

4.7.7 Cor

A cor das amostras dos pós das algas marinhas e dos filmes foram analisados no Laboratório de Propriedades Físicas de Alimentos (PROFI/EQA/UFSC) através de um colorímetro de reflectância (Delta Color, Modelo Delta Vista, Brasil) e determinada de acordo com a escala CIELAB através dos parâmetros de luminosidade L^* ($L^* = 0$: preto; $L^* = 100$: branco), a^* ($+a^*$ = vermelho, $-a^*$ = verde) e b^* ($+b^*$ = amarelo; $-b^*$ = azul). As medições foram realizadas em triplicata de amostra, sendo que, para os filmes foram realizadas ainda quatro leituras por amostra. A diferença de cor (ΔE) entre os filmes com os pós de cada alga marinha, *U. lactuca* e *K. alvarezii*, e o nori, foi obtida através da Equação (6):

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2} \quad (6)$$

Onde ΔE é a variação de cor e o subscrito “0” representa o parâmetro respectivo da cor original da amostra.

4.7.8 Opacidade e Transparência

As propriedades óticas dos filmes na faixa espectral visível foram determinadas usando um espectrofotômetro UV-Vis (Kasvi, Modelo K37-UVVIS, Brasil). Os filmes foram cortados em tiras de 1 cm de largura por 4 cm de altura e colocados em cubeta de quartzo, a leitura foi realizada utilizando uma cubeta vazia como branco.

A opacidade dos filmes foi determinada de acordo com o método descrito por Hashemi Gahruie et al. (2020) e calculada usando a Equação (7). Enquanto a transparência dos filmes, foi determinada de acordo com o método descrito por Li et al. (2021). A transparência (T) foi calculada utilizando a Equação (8), de acordo com a Lei de Lambert-Beer.

$$O = \frac{A_{bs}}{x} \quad (7)$$

$$T\% = 10^{-A}x \times 100 \quad (8)$$

Onde O é a opacidade, A_{bs} é a absorvância dos filmes medida a 600 nm, x é a espessura do filme em mm e T% é a transparência em porcentagem.

4.7.9 Espessura

A espessura dos filmes foi medida utilizando um micrômetro digital (ZAAS Precision, Amatoools, Brasil) em 10 posições aleatórias. A análise foi realizada em quadruplicata.

4.7.10 Densidade

As densidades foram determinadas cortando-se amostras de 4 cm x 4 cm dos filmes e do nori (Scheibe, 2012). Essas amostras foram desidratadas em dessecador com sílica gel por três semanas e depois foram pesadas. O cálculo da densidade foi feito usando a Equação (9):

$$d = \frac{m}{V} = \frac{m}{Ax} \quad (9)$$

No qual, m é a massa da amostra pesada (g), A é a área da amostra (cm²) e x é a espessura da amostra (cm).

4.7.11 Determinação das propriedades mecânicas

A determinação das propriedades mecânicas foi realizada seguindo a metodologia descrita por Simão (2018). Os testes mecânicos foram realizados em um Texturômetro TA.HD plus (Stable Micro Systems, Inglaterra) com uma célula de carga de 50 kg, auxiliados pelo programa Texture Expert Exceed. Os filmes foram condicionados à 48 h antes dos testes em uma umidade relativa de 58 % e temperatura de 25 °C.

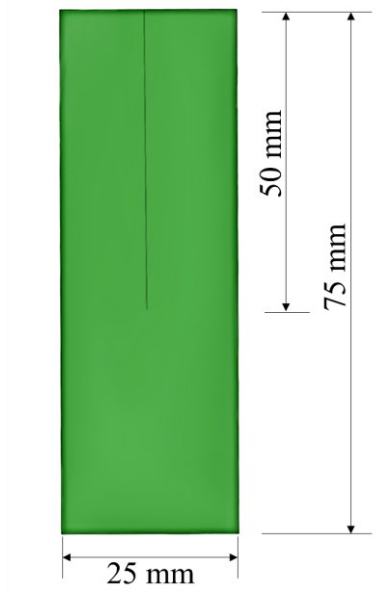
4.7.11.1 Ensaio de tração

Os testes de tração foram realizados com corpos de prova de 25 mm de largura e 100 mm de comprimento. Para cada formulação de filme, foram cortados 10 corpos de prova na direção perpendicular ao espalhamento da suspensão. A tensão de ruptura (σ_{rup}), o alongamento na ruptura (ε_{rup}) e o módulo de Young (Y) das amostras foram determinados conforme a norma D882-02 da American Society for Testing and Materials (ASTM, 2002b), com velocidade de tração de 0,8 mm.s⁻¹ e distância inicial das garras de 80 mm. Os testes de tração foram realizados em quadruplicata de processo.

4.7.11.2 Ensaio de resistência a propagação do rasgo

O teste de resistência à propagação do rasgo foi realizado com base na norma American Society for Testing and Materials - ASTM D1938-02 (ASTM, 2002a). Os corpos de prova foram cortados em dimensões de 25 mm de largura e 75 mm de comprimento, onde, exatamente no meio da largura do corpo de prova e paralelo à direção a ser testada foi realizado um corte inicial de 50 mm de comprimento (Figura 14).

Figura 14 – Esquema do corpo de prova



Fonte: elaborado pelo autor

Os corpos de prova foram acoplados em garras a uma distância inicial de 50 mm e velocidade de teste de $4,17 \text{ mm.s}^{-1}$. Para cada formulação de filme, foram utilizados 6 corpos de prova cortados na direção perpendicular ao espalhamento. A resistência média ao rasgamento foi calculada desprezando as porções inicial e final do gráfico força versus deformação, em uma extensão de 25 mm. Os ensaios de resistência a propagação do rasgo foram realizados em quadruplicata de processo.

4.7.12 Isotermas de sorção de umidade

As isotermas de sorção de umidade dos filmes foram determinadas pelo método estático em dessecadores. Os filmes foram desidratados com pentóxido de fósforo em dessecador por 14 dias, à temperatura ambiente. Após esse período, amostras de aproximadamente 0,5 g foram pesados em balança analítica e colocados em recipientes hermeticamente fechados contendo nove suspensões saturadas de sais, conforme descrito por Greenspan (1977) (Tabela 4). Os recipientes foram colocados em estufa do tipo B.O.D. à temperatura de 25 °C. Após 5 semanas, com o equilíbrio alcançado, o teor de umidade das amostras foi determinado conforme o item 4.7.1.

Tabela 4 – Atividade de água das soluções salinas saturadas a 25 °C

Solução salina saturada	Atividade de água
Cloreto de lítio	0,117
Acetato de potássio	0,210
Cloreto de magnésio	0,327
Carbonato de potássio	0,430
Nitrato de magnésio	0,517
Iodeto de potássio	0,685
Cloreto de sódio	0,755
Cloreto de potássio	0,834
Cloreto de bário	0,907

Fonte: elaborado pelo autor

O modelo matemático de GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer), apresentado na Equação (10), foi ajustado aos dados experimentais.

$$X_e = \frac{(C - 1)Ka_w X_m}{1 + (C - 1)Ka_w} + \frac{Ka_w X_m}{1 - Ka_w} \quad (10)$$

Onde X_e é a umidade de equilíbrio (g.g^{-1} b.s.), a_w é a atividade de água referente à umidade relativa de referência a qual a amostra foi condicionada, X_m é a umidade da monocamada (g.g^{-1} b.s.), C é a constante de Guggenheim relacionada à energia de interação das moléculas na monocamada, enquanto K é a constante de GAB relacionada à energia de interação das moléculas adsorvidas na multicamada. Os parâmetros foram estimados por regressão não linear, utilizando o método dos quadrados, com o programa Statistica 10.0

(StatSoft, Estados Unidos). Para avaliar a adequação do modelo aos dados experimentais, utilizou-se o coeficiente de correlação (R^2) e a raiz do erro médio quadrático (RMSE).

4.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Todos os resultados obtidos no estudo foram submetidos ao teste de Tukey a 95 % de confiança e análise de variância (ANOVA), sendo analisados no software Statistica 10.0 (Statsoft, Estados Unidos).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ALGAS MARINHAS

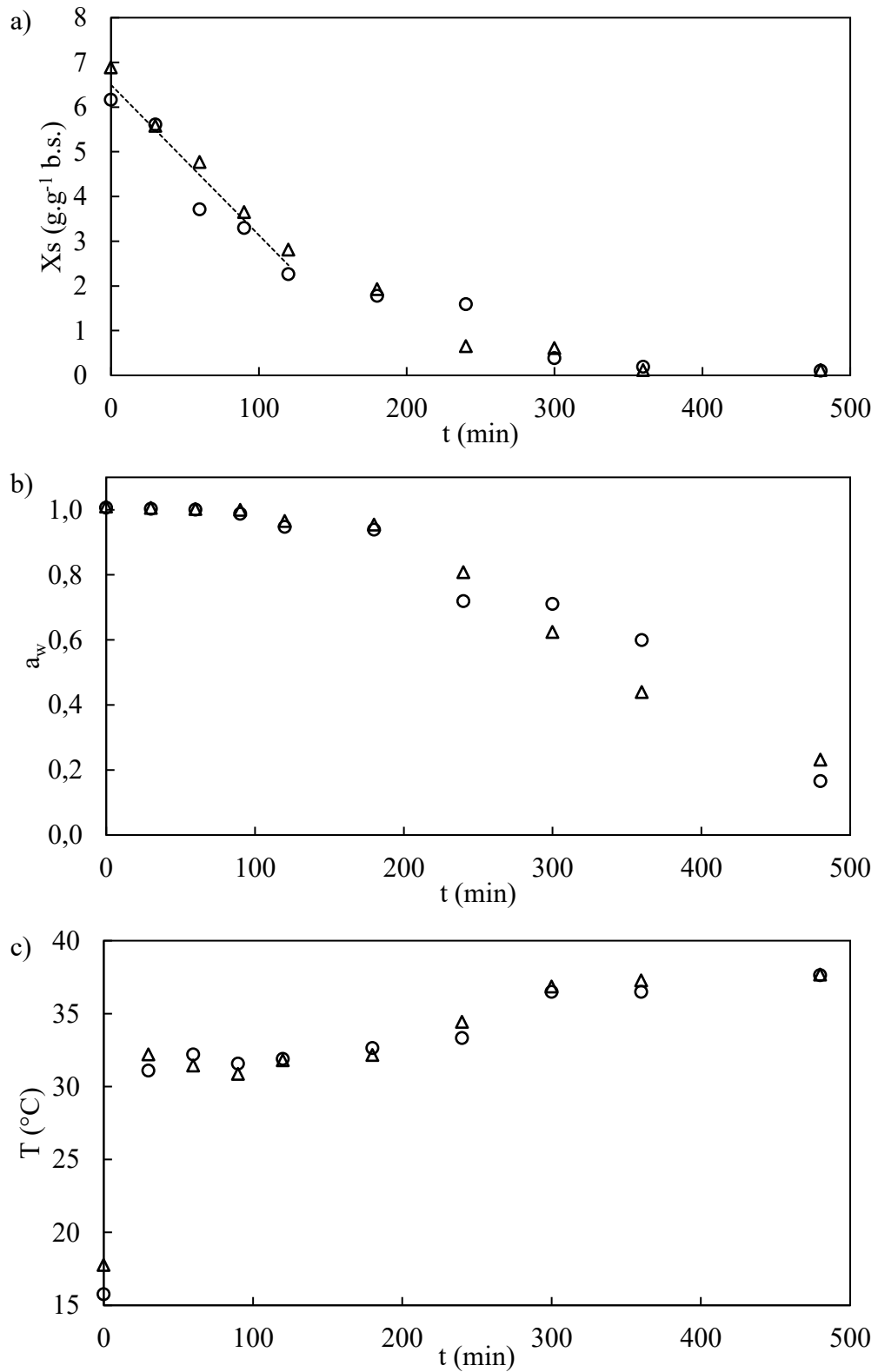
5.1.1 Cinética de secagem e modelagem matemática

Na Figura 15, são apresentadas as duplicatas da evolução temporal da umidade, atividade de água (a_w) e temperatura da *U. lactuca* durante a secagem.

No estágio inicial da secagem, pode ser observada uma taxa de secagem constante. Esse período pode ser descrito por ajuste linear que precede a mudança para a fase de secagem de taxa decrescente. Essas taxas de secagem constantes foram observadas até aproximadamente 120-180 minutos de secagem, quando a atividade de água era próxima de um. Em seguida, um período de taxa decrescente pode ser observado, que é evidenciado pela redução da atividade de água e pelo aumento da temperatura na superfície das amostras.

Foram necessárias 8 horas de secagem em uma estufa convectiva a 40 °C para alcançar a estabilidade de peso. Um estudo realizado por Vega-Gálvez et al. (2022) investigou diferentes métodos de secagem de *Ulva* spp., incluindo a utilização de uma estufa convectiva e outra a vácuo a 70 °C e a secagem solar, com uma densidade de aproximadamente 2 kg.m⁻². Nessas condições, os tempos necessários para alcançar a estabilidade de peso foram de 130, 540 e 390 min, respectivamente. Nas condições experimentais adotadas no presente estudo, mesmo com uma densidade de secagem inferior (1,5 kg.m⁻²), observou-se um período de secagem mais prolongado, possivelmente relacionado à escolha de uma temperatura de secagem mais moderada.

Figura 15 – Evolução temporal da umidade ajustado linearmente na taxa constante (a), atividade de água (a_w) (b) e temperatura da superfície (c) da *U. lactuca* durante a secagem. Símbolos diferentes representam as réplicas



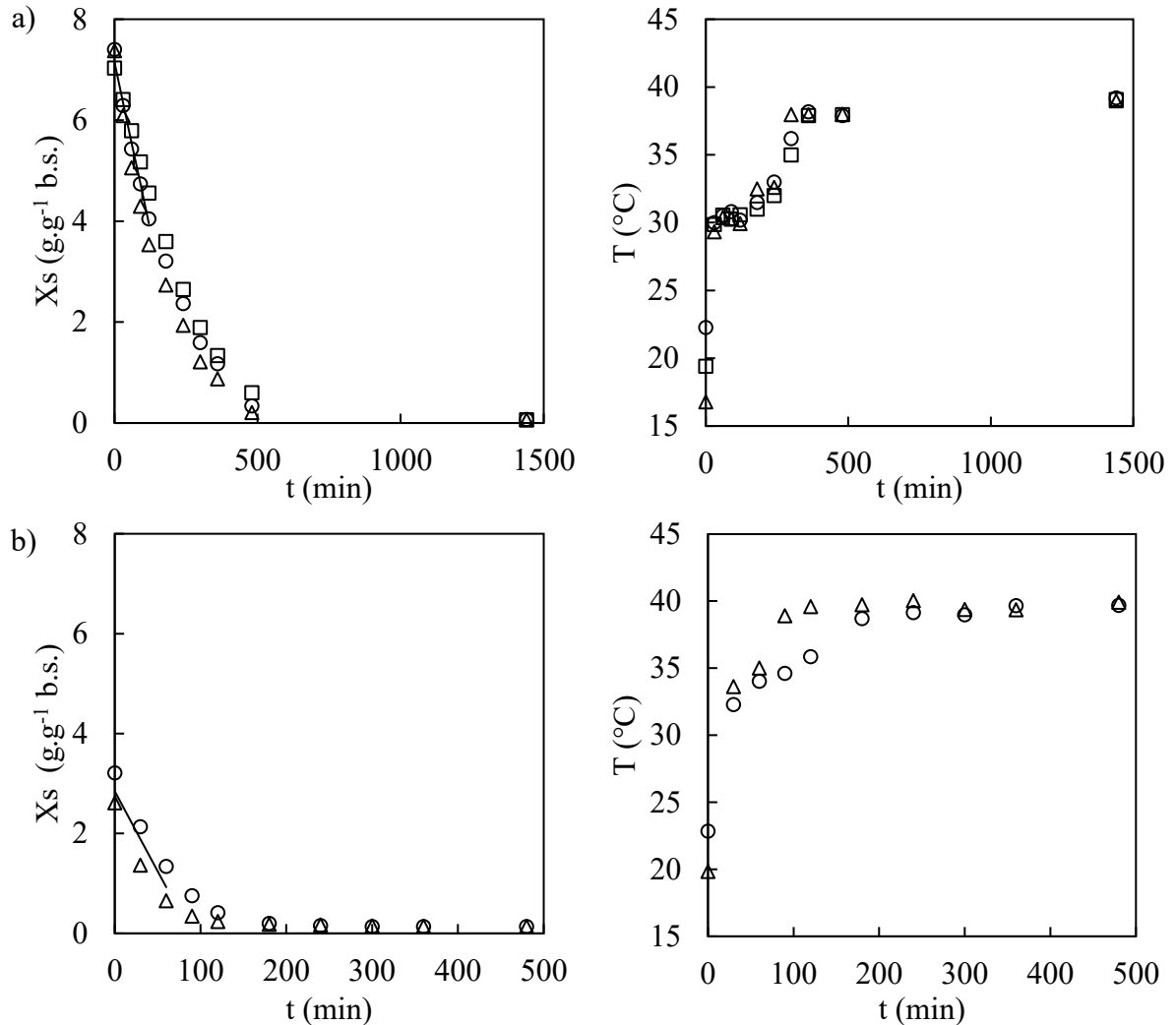
Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 16, são apresentados os dados da evolução temporal da umidade e temperatura da *K. alvarezii* durante a primeira e segunda secagem. Em ambas as secagens foram observadas um estágio inicial da secagem, exibindo uma taxa de secagem constante. Essas taxas de secagem constante foram mantidas até aproximadamente 120 minutos para a primeira secagem e 60 minutos para a segunda secagem. Isso fica evidenciado pelo aumento da temperatura na superfície das amostras.

A diferença no tempo necessário para concluir a fase de secagem constante entre as duas secagens pode ser explicada pois, na segunda secagem, a amostra passou por um processo de reidratação, necessário para a redução do teor de sais. No entanto, essa reidratação não foi suficiente para restaurar a umidade inicial da amostra. Como resultado, o processo de secagem na segunda ocasião foi mais rápido, uma vez que a amostra já havia perdido uma parte significativa de sua umidade na primeira secagem.

O tempo necessário para atingir baixas umidades na primeira etapa de secagem da *K. alvarezii* está em consonância com resultados reportados na literatura para essa espécie. De acordo com outros autores, a secagem em estufa convectiva a 50 °C levou aproximadamente 9 horas, enquanto a secagem ao sol demandou um período mais extenso de 40 horas (Rosario; Mateo, 2019). Em outro estudo, a secagem da espécie foi realizada em uma estufa convectiva com recirculação de ar, com o objetivo de atingir níveis de umidade na base seca inferiores a 0,43 (Faria, 2012). Os resultados demonstraram que, para as temperaturas de secagem de 40 °C, 60 °C e 90 °C, foram necessários respectivamente 360, 170 e 100 minutos para alcançar esses níveis de umidade.

Figura 16 – Evolução temporal da umidade ajustado linearmente na taxa constante (esquerda) e temperatura da superfície (direita) da *K. alvarezii* na primeira (a) e na segunda (b) secagem. Símbolos diferentes representam as réplicas



Fonte: elaborado pelo autor

Os valores das taxas de secagem à taxa constante determinados através do ajuste da equação linear e os parâmetros dos modelos aplicados aos dados de secagem das algas marinhas estão apresentadas na Tabela 5. O período de taxa constante foi delimitado como o conjunto de dados no qual o valor do R^2 fosse superior a 0,98.

A alga *U. lactuca* demonstrou uma taxa de secagem constante mais alta em comparação com as duas secagens da alga *K. alvarezii*. Conforme o esperado, a segunda secagem da *K. alvarezii* demonstrou uma taxa de secagem mais elevada, uma vez que o processo demandou menos tempo devido ao menor teor de água na alga. Os modelos matemáticos de Midilli e Page demonstraram uma boa adequação aos dados de secagem das

algas marinhas. Da mesma forma que se constatou no ajuste linear durante a taxa constante, os valores da constante "k" dos modelos ajustados neste estudo foram maiores para a segunda secagem da *K. alvarezii*. Essa constante indica a constante de secagem, estando relacionada com a velocidade durante a secagem (Erbay; Icier, 2010).

Na literatura, diversos estudos empregam a modelagem matemática, utilizando modelos semiempíricos, para descrever a cinética de secagem das algas marinhas. Essas pesquisas investigam como as condições de secagem, tais como os equipamentos empregados, a temperatura e a umidade relativa do ar, influenciam no processo de secagem das algas. Entre os estudos consultados, observou-se que diferentes modelos apresentaram um ajuste mais preciso aos dados, o que pode estar relacionado à espécie de alga marinha utilizada e dos métodos empregados para sua secagem (Fudholi *et al.*, 2014; Jamaluddin *et al.*, 2022; Kadam; Tiwari; O'Donnell, 2015; Kang *et al.*, 2022; Vega-Gálvez *et al.*, 2022). Ao analisar esses trabalhos, observou-se que os modelos mais adequados incluem aqueles empregados neste estudo.

Tabela 5 – Modelos matemáticos ajustados aos dados de cinética de secagem das algas marinhas

Modelo	Parâmetro	Amostra		
		U	K ₁	K ₂
Fase linear	a (g.g ⁻¹ .m ⁻¹)	-0,034	-0,027	-0,032
	b (g.g ⁻¹)	6,496	7,148	2,846
	Intervalo de ajuste (min)	0 - 120	0 - 120	0 - 60
	R ²	0,993	0,993	0,986
Page	k	0,004	0,005	0,011
	n	1,137	1,006	1,143
	R ²	0,992	0,997	1,000
	RMSE	0,029	0,017	0,003
Midilli	a	1,011	0,990	1,000
	b	-5,10E-05	-7,00E-06	1,00E-06
	k	0,005	0,005	0,011
	n	1,083	1,017	1,144
	R ²	0,993	0,997	1,000
	RMSE	0,028	0,017	0,003

Fonte: elaborado pelo autor

5.1.2 Composição centesimal das algas

Na Tabela 6 está apresentada a composição centesimal das biomassas das algas marinhas *U. lactuca* e *K. alvarezii*, desidratadas em estufa convectiva a 40 °C.

Tabela 6 – Composição centesimal das algas marinhas secas *U. lactuca* e *K. alvarezii*

	<i>Ulva lactuca</i>	<i>Kappaphycus alvarezii</i>
Umidade inicial (g.g⁻¹ b.s.)	5,8289 ± 0,5304	7,8124 ± 0,5150
Umidade final (g.g⁻¹ b.s.)	0,1445 ± 0,0020	0,1028 ± 0,0022
a_w da alga seca	0,2104 ± 0,0123	0,2161 ± 0,0073
t (h)	8	1° secagem: 24 2° secagem: 8
Composição centesimal (g.g⁻¹ b.s.)		
Carboidrato	0,6033	0,5025
Cinzas	0,1062 ± 0,0027	0,2277 ± 0,0005
Proteína	0,2679 ± 0,0010	0,2585 ± 0,0020
Lipídio	0,0273 ± 0,0068	0,0115 ± 0,0010
Saturado	0,0154 ± 0,0039	0,0064 ± 0,0005
Insaturado	0,0031 ± 0,0008	0,0013 ± 0,0001
Monoinsaturado	0,0012 ± 0,0003	0,0005 ± 0,0000
Poliinsaturado	0,0019 ± 0,0005	0,0008 ± 0,0001
Não identificado	0,0087 ± 0,0022	0,0036 ± 0,0003
Sódio	0,0040 ± 0,0001	0,0053 ± 0,0002

Fonte: elaborado pelo autor

SRAVANI et al., (2023) avaliaram o efeito de diferentes tipos de secagem nas características da *U. lactuca*, usando uma estufa convectiva a 50 °C por 15 horas e uma secadora solar por 24 horas. Foram alcançadas umidades de 0,083 e 0,164 e atividades de água de 0,35 e 0,65, para a estufa convectiva e secadora solar, respectivamente. No presente estudo, foram alcançados valores para *U. lactuca* de atividade de água inferiores e a umidade dentro os valores alcançados no trabalho citado.

Em outro estudo, as linhagens vermelhas de *K. alvarezii* foram submetidas a processos de secagem em estufa a vácuo a diferentes temperaturas: 50, 60 e 70 °C. O tempo necessário para atingir um teor de umidade final entre 0,087 e 0,111 g.g⁻¹ b.s. variou, demandando respectivamente 23, 14 e 9 horas para cada uma das temperaturas (Soliman *et al.*, 2017). Esses valores estão dentro das umidades alcançadas para *K. alvarezii* no presente estudo.

Como citado na revisão bibliográfica, a composição das algas marinhas é dependente de espécie, local e tempo de colheita, exposição a ondas e temperatura da água (Rioux; Beaulieu; Turgeon, 2017). Foi observado que a *U. lactuca* apresenta teores superiores de carboidratos e lipídios, enquanto a *K. alvarezii* apresenta uma proporção mais elevada de cinzas.

Os polissacarídeos ulvano e carragena semirrefinada, extraídos das algas *U. fasciata* e *K. alvarezii*, respectivamente, demonstraram seguir o mesmo padrão (Ramu Ganesan; Shanmugam; Bhat, 2018). Onde, o ulvano apresentou uma concentração de carboidratos superior, enquanto a carragena semirrefinada tem uma concentração de cinzas superior.

Na literatura, verifica-se uma variação nas concentrações dos constituintes das algas marinhas, mesmo se tratando da mesma espécie. No entanto, é importante ressaltar que a composição da *U. lactuca* (Barakat *et al.*, 2021; de Melo *et al.*, 2021; Erniati *et al.*, 2018; Ortiz *et al.*, 2006; Pádua; Fontoura; Mathias, 2004; Rasyid, 2017; Sravani *et al.*, 2023) e da *K. alvarezii* (ABDUL KHALIL *et al.*, 2018; LOPES *et al.*, 2023; MASARIN *et al.*, 2016; SURESH KUMAR; GANESAN; SUBBA RAO, 2015) utilizadas neste estudo está em conformidade com os valores encontrados em algumas pesquisas anteriores.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS SUSPENSÕES FILMOGÊNICAS

5.2.1 pH

Conforme evidenciado na Tabela 7, é possível observar que as suspensões puras de *U. lactuca* e *K. alvarezii*, denominadas 100U e 100K, respectivamente, exibem uma diferença estatisticamente significativa entre si. Além disso, é possível ver uma tendência de aumento do pH, proporcional ao incremento na proporção de *K. alvarezii*.

Tabela 7 – pH das suspensões elaboradas

Amostra	pH
100U	5,63 ± 0,03 ^a
100K	6,73 ± 0,04 ^e
80U20K	5,84 ± 0,07 ^b
80U20K-3	5,89 ± 0,05 ^{bcd}
80U20K-5	5,89 ± 0,03 ^{bcd}
70U30K	5,85 ± 0,06 ^b
70U30K-3	5,90 ± 0,04 ^{bcd}
70U30K-5	5,92 ± 0,14 ^{b^c}
60U40K	5,97 ± 0,02 ^{bcd}
60U40K-3	6,02 ± 0,06 ^d
60U40K-5	6,03 ± 0,02 ^d
50U50K	5,98 ± 0,07 ^{bcd}
50U50K-3	6,01 ± 0,07 ^{cd}
50U50K-5	5,98 ± 0,09 ^{bcd}

Fonte: elaborado pelo autor

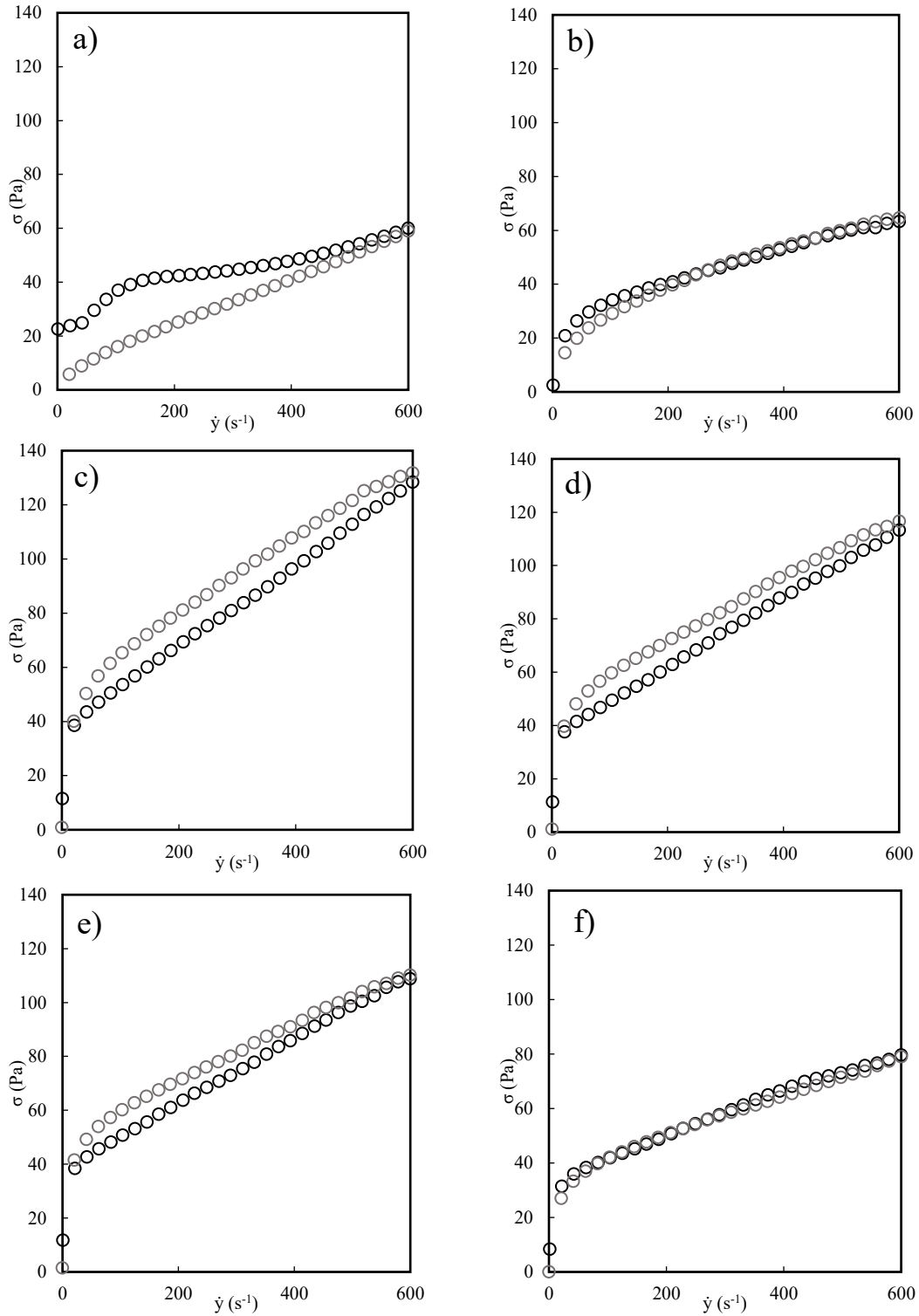
Nota: médias seguidas de letras diferentes representam diferenças significativas ($p \leq 0,05$) segundo teste de Tukey

5.2.2 Comportamento reológico

As propriedades de escoamento das suspensões filmogênicas são apresentadas nas Figura 17 e Figura 18. Na Figura 17 são apresentadas as curvas de tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento e na Figura 18 são apresentadas as curvas de viscosidade aparente em função da taxa de cisalhamento

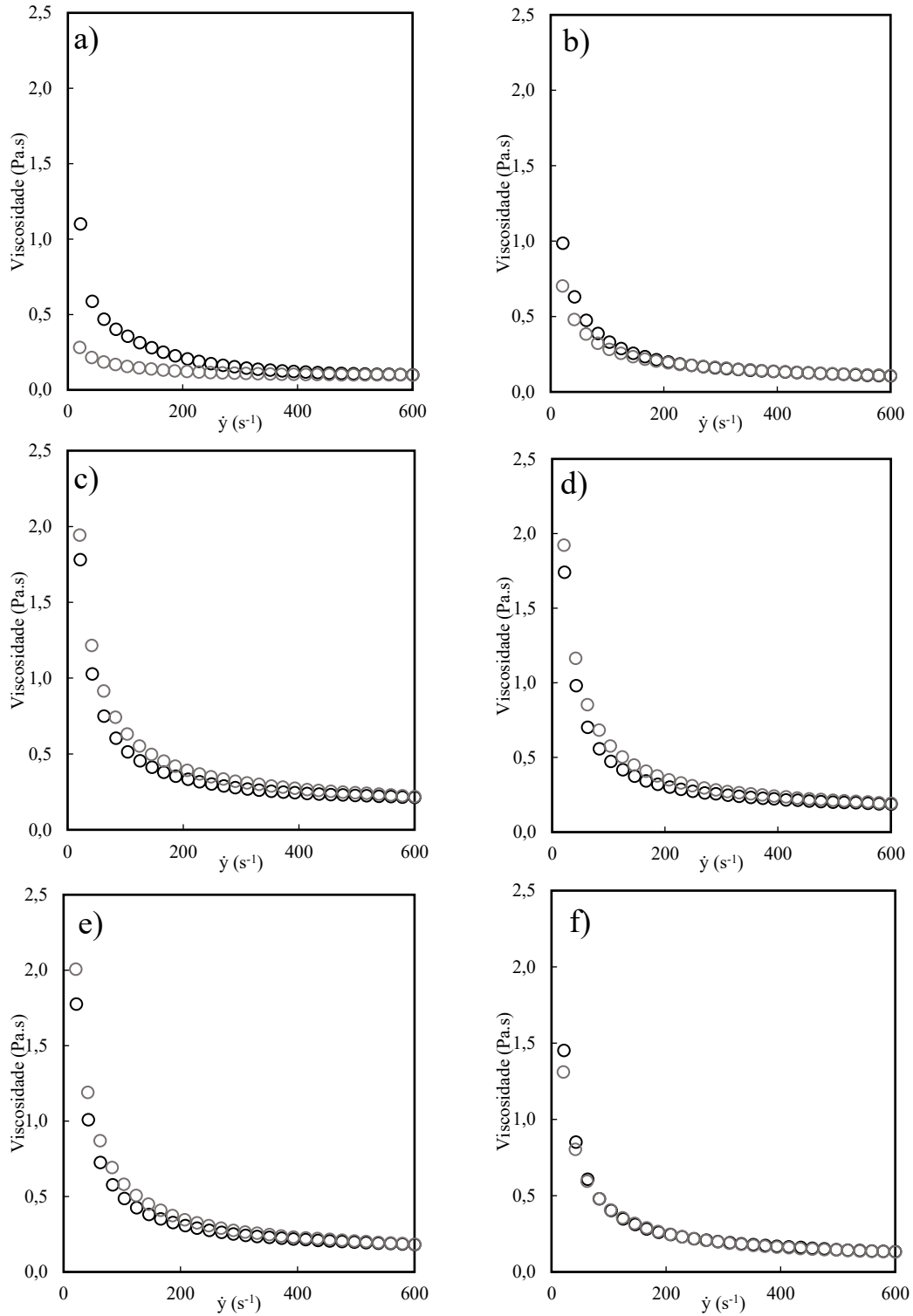
As suspensões exibiram um comportamento pseudoplástico como evidenciado pelos índices de fluxo calculados, os quais variaram entre 0 e 1 (Tabela 8). Um fluido é classificado como pseudoplástico, quando a viscosidade diminui à medida que a taxa de cisalhamento aplicada aumenta (Mathias *et al.*, 2013). No entanto, é importante notar que, a carragena encontrada na *K. alvarezii* pode manifestar um comportamento de fluxo newtoniano em altas temperaturas (por exemplo, a 75°C), mas tende a exibir maior pseudoplasticidade à medida que a concentração de carragena aumenta (Marcotte; Hoshahili; Ramaswamy, 2001; Webber, 2010). Outros autores também relataram um comportamento pseudoplástico para a carragena (ADAMANTE; MINOSSO, 2012; Oliveira, 2017) e ulvano (Sari-Chmayssem *et al.*, 2019; Yaich *et al.*, 2014).

Figura 17 – Curvas de escoamento (σ) versus taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) das suspensões filmogênicas preparadas com algas *U. lactuca* (a) e *K. alvarezii* (b), e suas misturas de 80U20K (c), 70U30K (d), 60U40K (e) e 50U50K (f). Os círculos pretos representam a curva ascendente, enquanto o círculo cinza a curva descendente



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 18 – Viscosidade *versus* taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) das suspensões filmogênicas preparadas com algas *U. lactuca* (a) e *K. alvarezii* (b), e suas misturas de 80U20K (c), 70U30K (d), 60U40K (e) e 50U50K (f). Os círculos pretos representam a curva ascendente, enquanto o círculo cinza a curva descendente



Fonte: elaborado pelo autor

Como pode ser observado na Figura 17, as amostras apresentaram características tixotrópicas, uma vez que, houve diferença entre as curvas de aumento e decréscimo da taxa de cisalhamento. A histerese pode ser quantificada como a área entre as curvas de fluxo, quanto maior a área contida entre as curvas, maior o efeito tixotrópico (Mathias *et al.*, 2013). Observa-se claramente que, na suspensão contendo 100% de *K. alvarezii*, as curvas se cruzam ou se sobrepõem durante a variação da taxa de cisalhamento. Conseqüentemente, à medida que a concentração de *K. alvarezii* nas suspensões filmogênicas aumentou, foi evidente uma redução na área de histerese entre as curvas de tensão de cisalhamento.

Quando nos referimos a um líquido tixotrópico, estamos falando da sua capacidade de retornar à estrutura inicial quando em repouso, após ter sido submetido a uma força. Este fenômeno permite que o material transite entre os estados de "gel" e "sol" em resposta à aplicação de forças de cisalhamento. No estado inicial de "gel", as partículas ou moléculas formam uma estrutura tridimensional coesa, conferindo maior viscosidade. Ao aplicar força, essa estrutura é quebrada, levando à transição para o estado de "sol" (líquido) com viscosidade reduzida. Quando em repouso, ocorre a reconstrução gradual da estrutura, retornando ao estado de "gel". A preferência por líquidos com menor efeito tixotrópico, ou seja, menor área de histerese, proporciona um controle mais preciso da viscosidade e das propriedades de dispersão ao longo do tempo. Essa característica assegura uma boa dispersão de ingredientes durante o processamento, evitando separações indesejadas quando o líquido está em repouso (Schramm, 2004). Assim, nota-se que a estabilidade da suspensão aumenta proporcionalmente à concentração de *K. alvarezii*.

Este comportamento também foi visualizado para ulvano em concentrações de 1,6 % (m/m) a 20 °C (Yaich *et al.*, 2014). Em um estudo conduzido por Faria (2012), observou-se que tanto a carragena refinada quanto a semirrefinada exibiram um comportamento pseudoplástico similar. Além disso, esses compostos, obtidos a partir da secagem da alga *K. alvarezii* em estufa convectiva com recirculação de ar a 40 °C, apresentaram uma curva de tensão de cisalhamento em relação à taxa de deformação semelhante a observada no presente estudo para a suspensão de 100K.

Na Tabela 8 encontram-se valores dos parâmetros obtidos pelo ajuste do modelo de Herschel-Bukley aos dados das curvas de escoamentos de ascendentes e decrescentes. O modelo se ajustou bem aos dados experimentais, obtendo um $R^2 > 0,960$.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 8, o índice de consistência (k) apresentou uma tendência em aumentar com o aumento da concentração de *K. alvarezii* na suspensão (curvas crescentes). Quanto maior o valor desse parâmetro, mais consistente será o fluido. Notou-se uma tendência de redução no valor do parâmetro 'n' à medida que a concentração de *K. alvarezii* na suspensão aumentou. Isso indica que amostras com concentrações mais elevadas dessa alga apresentam um comportamento pseudoplástico maior, indicando uma redução mais acentuada na viscosidade à medida que a taxa de cisalhamento aumenta.

Tabela 8 – Ajuste do modelo matemático de Herschel-Bulkley aos dados de escoamento das curvas ascendentes e descendentes

Tratamento	k (Pa.s ⁿ)	n	σ_0	R^2
100U	0,282 - 1,281	0,527 - 0,826	2,073 - 19,791	0,961 - 0,998
100K	3,536 - 6,272	0,358 - 0,455	0,000 - 0,113	0,991 - 1,000
80U20K	1,107 - 8,154	0,426 - 0,709	5,015 - 21,807	0,987 - 0,991
70U30K	1,785 - 8,284	0,401 - 0,609	5,237 - 19,287	0,985 - 0,986
60U40K	1,785 - 10,660	0,354 - 0,609	4,226 - 19,288	0,984 - 0,986
50U50K	4,543 - 7,887	0,350 - 0,425	1,353 - 8,841	0,983 - 0,991

Fonte: elaborado pelo autor

Nota: k : índice de consistência; n : índice de comportamento do fluxo; σ_0 : tensão de cisalhamento inicial

5.2.3 Força do gel

Na Tabela 9, são apresentados os dados de força na ruptura (N), distância (cm) e força do gel (N.cm⁻²). Neste estudo, somente as suspensões submetidas a aquecimento foram avaliadas, uma vez que aquelas não aquecidas não demonstraram capacidade de gelificação. Quando uma solução de carragena quente é resfriada, sua viscosidade aumenta gradualmente até a temperatura de gelificação, momento em que ocorre um aumento rápido e intenso na viscosidade (ADAMANTE; MINOSSO, 2012). Além disso, as suspensões contendo 100% de *U. lactuca* também não foram passíveis de análise devido à ausência de gelificação.

Tabela 9 – Dados de força de gel das suspensões aquecidas

Amostra	F _{máx} (N)	D (mm)	Força do gel (N.cm ⁻²)
100K-3	2,670 ± 0,221 ^g	5,813 ± 0,437 ^b	4,056 ± 0,503 ^g
100K-5	3,387 ± 0,291 ^h	6,461 ± 0,577 ^b	4,639 ± 0,628 ^h
80U20K-3	0,850 ± 0,072 ^a	4,439 ± 0,471 ^a	1,697 ± 0,205 ^a
80U20K-5	0,999 ± 0,084 ^{ab}	4,505 ± 0,485 ^a	1,967 ± 0,269 ^{ab}
70U30K-3	1,129 ± 0,044 ^b	4,435 ± 0,371 ^a	2,254 ± 0,258 ^{bc}
70U30K-5	1,414 ± 0,120 ^c	4,643 ± 0,410 ^a	2,681 ± 0,234 ^{cd}
60U40K-3	1,481 ± 0,090 ^{cd}	4,781 ± 0,560 ^a	2,740 ± 0,228 ^{de}
60U40K-5	1,657 ± 0,158 ^{de}	4,631 ± 0,514 ^a	3,156 ± 0,281 ^{ef}
50U50K-3	1,613 ± 0,119 ^{de}	4,856 ± 0,516 ^a	2,952 ± 0,415 ^{de}
50U50K-5	1,893 ± 0,102 ^f	4,975 ± 0,684 ^a	3,398 ± 0,463 ^f

Fonte: elaborado pelo autor

Nota: F_{máx}: força máxima; D: profundidade. Médias seguidas de letras diferentes representam diferenças significativas ($p \leq 0,05$) segundo teste de Tukey

Apesar da impossibilidade de avaliar as suspensões com 100% de *U. lactuca*, um estudo anterior que investigou diversos métodos de extração do ulvano da mesma espécie alcançou uma força de gel variando entre 0,30 e 0,52 N (Yaich *et al.*, 2014). Foram examinados cinco métodos de extração do ulvano, incluindo extração ácida (com pH de 1,5 ou 2,0 e temperaturas de 80 ou 90 °C) e extração química enzimática. Nota-se que apenas o tratamento de extração ácida a 90 °C com um pH de 1,5 não pôde ser analisado, pois não resultou na formação de gel.

Observa-se que, para todas as amostras, os tempos de aquecimento de 5 minutos requereram uma maior força para penetrar a superfície em comparação aos de 3 minutos. Conforme a concentração de *K. alvarezii* na suspensão foi aumentada, houve um consequente aumento na resistência das amostras, demandando maior força para a penetração. Embora não tenham sido detectadas diferenças significativas entre as amostras, é possível observar uma tendência na qual as suspensões com concentrações mais elevadas de *K. alvarezii* permitiram que a sonda penetrasse a uma maior profundidade antes de perfurar.

O estudo conduzido por Wu *et al.* (2020) investigou a influência do grau de desacetilação do glucomanano na formação de géis mistos com k-carragena e cloreto de potássio (KCl). Os resultados obtidos para a força de ruptura (2,0 - 3,0 N) e a distância (0,4 - 0,6 cm) foram semelhantes aos resultados deste estudo. Assim como o trabalho de Bono, Anisuzzaman e Ding (2014), que relataram valores de força variando de 0,3 a 11,4 N.cm⁻² em géis produzidos com carragena semi-refinada, explorando diferentes condições de temperatura, tempo de aquecimento do gel e concentrações de hidróxido de potássio (KOH).

As suspensões contendo 100% de *K. alvarezii*, aquecidas por 3 ou 5 minutos, apresentaram valores de força superiores aos resultados obtidos por Rudke et al. (2020), que utilizaram a mesma metodologia de análise. Nesse estudo, foram avaliados diferentes métodos de extração de carragena para a produção de géis, obtendo valores que variaram de 2,5 a 3,6 N·cm⁻². No entanto, é importante observar que, ao comparar com um gel produzido com uma amostra comercial de carragena (13,1 N·cm⁻²), conforme citado pelos próprios autores, a força de gel obtida foi inferior.

Outra pesquisa destacou que géis produzidos a partir de carragena refinada e semirrefinada, extraídas da alga *K. alvarezii* seca em diferentes temperaturas (27, 40, 60 e 90 °C), exibiram uma faixa de força de gel de 13 a 17 N.cm⁻² (Faria, 2012). É importante salientar que os resultados obtidos em nosso estudo podem ter sido afetados negativamente devido ao uso de *K. alvarezii* seca em vez da carragena diretamente extraída da alga. Isso pode ter impactado desfavoravelmente na capacidade de gelificação das suspensões.

5.3 EVOLUÇÃO TEMPORAL DA UMIDADE E TEMPERATURA DURANTE O PROCESSO DE SECAGEM DOS FILMES E MODELAGEM MATEMÁTICA

O teor de umidade e atividade de água das amostras de filme das algas marinhas com diferentes tempos de aquecimento, utilizadas neste estudo, são mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 – Umidade (X_s) e atividade de água (a_w) dos filmes

Amostra	X_s (g·g ⁻¹ b.s.)	a_w
Nori	0,103 ± 0,003 ^c	0,449 ± 0,004 ^c
80U20K-3	0,091 ± 0,007 ^{bc}	0,157 ± 0,004 ^{ab}
80U20K-5	0,090 ± 0,005 ^{bc}	0,151 ± 0,004 ^a
70U30K-3	0,092 ± 0,008 ^c	0,165 ± 0,006 ^{abc}
70U30K-5	0,090 ± 0,010 ^{bc}	0,167 ± 0,003 ^{abcd}
60U40K-3	0,088 ± 0,008 ^{bc}	0,170 ± 0,004 ^{bcd}
60U40K-5	0,085 ± 0,007 ^b	0,178 ± 0,005 ^{cd}
50U50K-3	0,075 ± 0,009 ^a	0,182 ± 0,008 ^{cd}
50U50K-5	0,074 ± 0,013 ^a	0,185 ± 0,013 ^d

Fonte: elaborado pelo autor

Nota: médias seguidas de letras diferentes representam diferenças significativas ($p \leq 0,05$) segundo teste de Tukey

Nota-se que as atividades de água se encontram em uma faixa de elevada estabilidade ($a_w = 0,157 - 0,185$). Além disso, observa-se uma tendência marcante de redução na umidade com o aumento da concentração de Kappaphycus. Como indicado na Tabela 6, observou-se

que, para uma atividade de água semelhante, o pó de *K. alvarezii* apresentou níveis de umidade comparativamente mais baixos em comparação com o pó de *U. lactuca*.

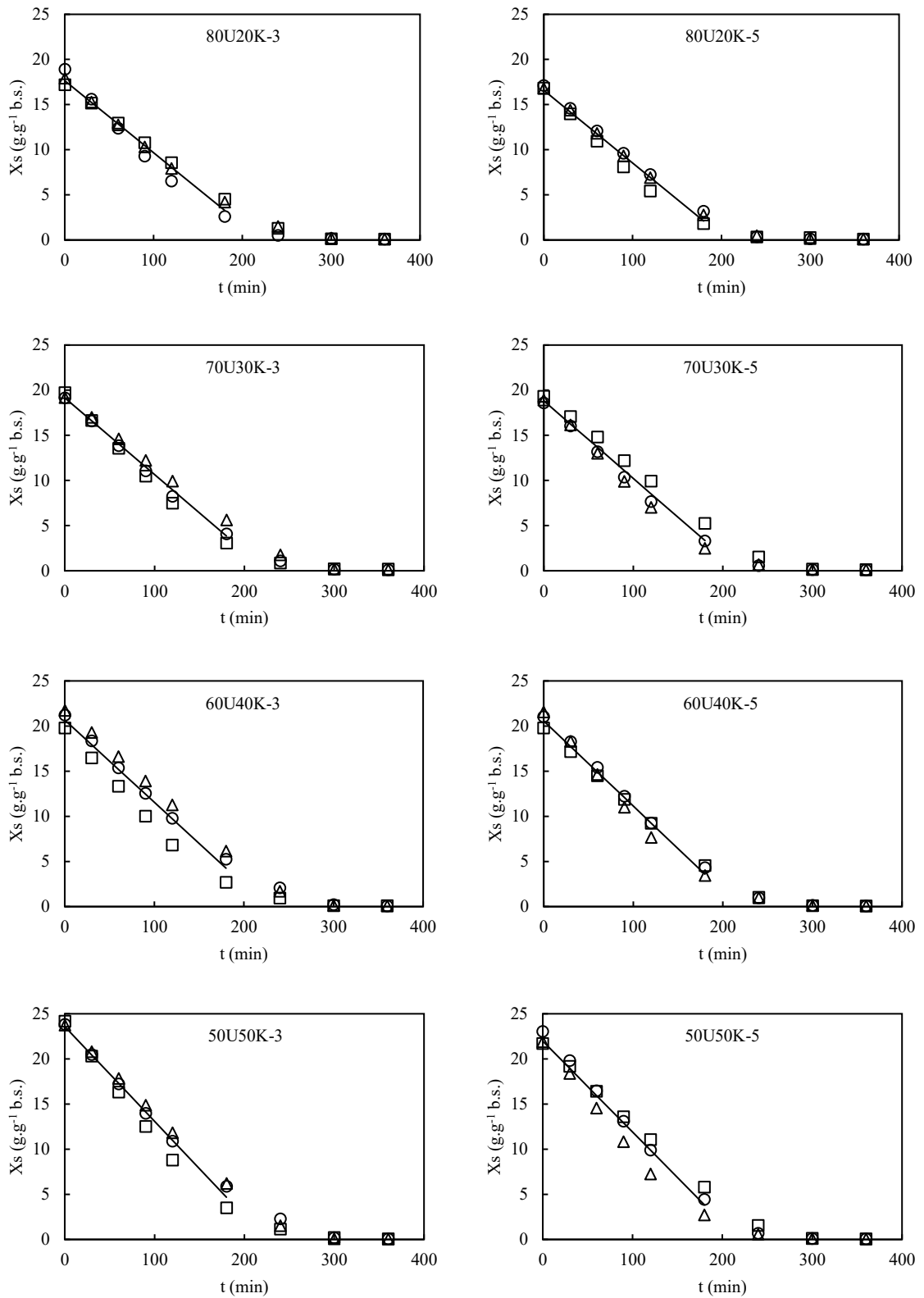
Nas Figuras 19 e 20, são apresentadas as triplicatas da evolução temporal da umidade com o ajuste linear e as temperaturas dos filmes em função do tempo para cada tratamento, respectivamente. As triplicatas mostram uma boa reprodutibilidade dos resultados.

Há uma diferença entre as curvas de secagem dos diferentes tratamentos. Esse padrão pode ser explicado pelo fato de que os tratamentos com uma concentração mais elevada de *K. alvarezii* na suspensão apresentaram maior quantidade de água. Isso se deve ao fato de que a suspensão de *K. alvarezii* (0,03 m_{alga}:m_{água}) continha uma quantidade menor de soluto em relação ao solvente quando comparada à suspensão de *U. lactuca* (0,078 m_{alga}:m_{água}).

Consequentemente, os tratamentos com uma maior proporção de *K. alvarezii* iniciaram o processo de secagem com um teor de umidade mais elevado. Além disso, observou-se uma discrepância no teor de umidade inicial entre os tratamentos que tinham a mesma concentração, mas diferentes tempos de aquecimento. Os tratamentos com um tempo de aquecimento mais longo (5 minutos) começaram com uma umidade mais baixa. Isso era previsível, uma vez que um período de aquecimento mais longo resultou em uma maior evaporação da água da suspensão ao longo desse intervalo de tempo.

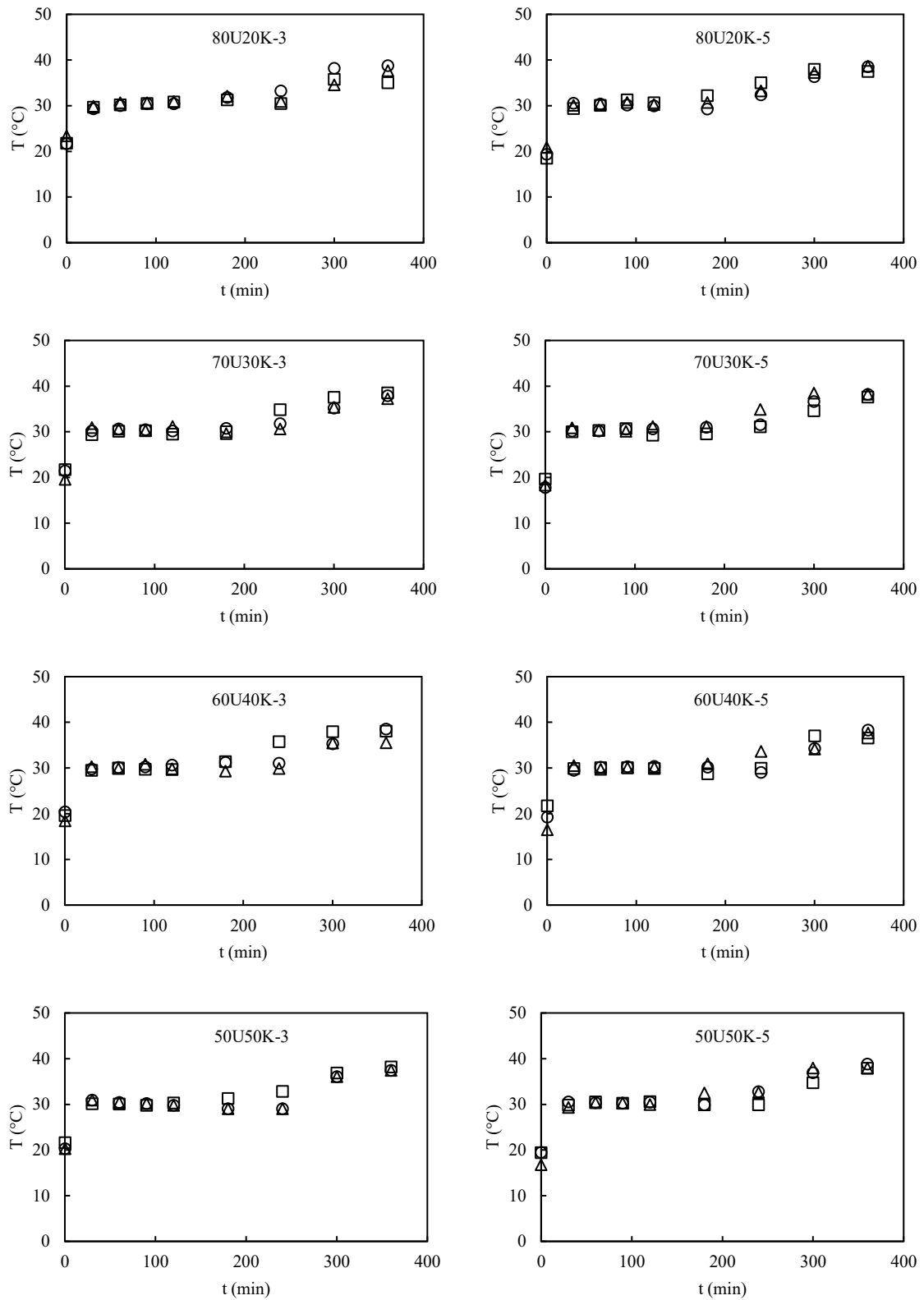
Conforme evidenciado nos gráficos (Figuras 19 e 20), o término do período de taxa constante em todos os tratamentos (ocorrendo aos 180 minutos) coincide com o ponto em que a temperatura na superfície do filme apresenta um aumento gradativo.

Figura 19 – Evolução temporal da umidade (X_s) com o ajuste linear durante a secagem convectiva a 40 °C. Símbolos diferentes representam as réplicas das secagens



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 20 – Evolução temporal da temperatura durante a secagem convectiva a 40 °C.
 Símbolos diferentes representam as réplicas das secagens



Fonte: elaborado pelo autor

Os valores das taxas de secagem à taxa constante determinados através do ajuste da equação linear e os parâmetros dos modelos aplicados aos dados de secagem dos filmes estão apresentados na Tabela 11. O período de taxa constante foi definido como o conjunto de dados para o qual o coeficiente de determinação (R^2) obtido a partir da regressão fosse superior a 0,99.

Tabela 11 – Modelos matemáticos ajustados aos dados de cinética de secagem dos filmes

Modelo	Parâmetro	Amostra							
		80U20K-3	80U20K-5	70U30K-3	70U30K-5	60U40K-3	60U40K-5	50U50K-3	50U50K-5
Fase linear	a ($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)	-0.080	-0.081	-0.085	-0.086	-0.091	-0.094	-0.105	-0.101
	b ($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	17.647	16.591	19.153	18.824	20.671	20.566	23.584	21.971
	Intervalo de ajuste (min)	0 -180							
	R^2	0.995	0.995	0.997	0.998	0.997	0.996	0.997	0.997
Page	k	8.94E-04	7.91E-04	6.49E-04	5.72E-04	7.31E-04	6.80E-04	7.77E-04	6.71E-04
	n	1.447	1.497	1.504	1.539	1.477	1.506	1.468	1.509
	R^2	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997
	RMSE	0.018	0.018	0.018	0.017	0.018	0.017	0.018	0.018
Midilli	a	0.987	0.984	0.986	0.985	0.987	0.987	0.986	0.986
	b	-1.02E-04	-6.20E-05	-9.70E-05	-7.60E-05	-1.09E-04	-8.10E-05	-1.06E-04	-8.30E-05
	k	1.02E-03	7.57E-04	7.12E-04	5.76E-04	8.49E-04	7.18E-04	8.83E-04	7.00E-04
	n	1.406	1.495	1.470	1.524	1.430	1.482	1.426	1.487
	R^2	0.998	0.998	0.998	0.998	0.999	0.998	0.998	0.998
	RMSE	0.013	0.015	0.013	0.013	0.012	0.013	0.013	0.014

Fonte: elaborado pelo autor

Nota: modelo linear = a: taxa de secagem e b: umidade inicial. Modelo de Page e Midilli = $a/b/n$: constante adimensional e k-constante de secagem

Foi observada uma tendência nas taxas de secagem durante o período constante, evidenciando um aumento gradual à medida que a concentração de *K. alvarezii* aumentava. Esse comportamento é plausivelmente atribuído à maior disponibilidade de água nos tratamentos com concentrações mais elevadas de *K. alvarezii* durante o processo de secagem.

Conforme discutido anteriormente em relação às umidades iniciais dos filmes, observou-se que, ao final do período de secagem a taxa constante, as umidades dos tratamentos com maior concentração de *K. alvarezii* era gradativamente superior. Adicionalmente, notou-se que, para o mesmo tratamento, houve uma redução na umidade nos filmes submetidos a um maior tempo de aquecimento ao final do período de taxa de secagem constante.

Os modelos de Midilli e Page demonstraram um excelente ajuste aos dados coletados durante o processo de secagem dos filmes. Sendo que, o modelo de Midilli destacou-se como o mais adequado para todos os tratamentos, apresentando os valores mais elevados de R^2 e os menores RMSE. No entanto, é importante notar que o modelo de Midilli, embora preciso em se ajustar aos dados, não oferece uma descrição detalhada dos fenômenos físicos envolvidos no processo.

O modelo de Midilli considera que os dados experimentais seguem um comportamento exponencial ao longo de todo o processo de secagem. Contrariamente, as curvas de secagem de ambos os processos sugeriram um período de taxa de secagem constante no início de cada procedimento, quando uma elevada percentagem de umidade foi evaporada. Os modelos semiempíricos avaliados demonstraram o ajuste eficaz aos dados experimentais, uma vez que, envolvem conjuntos distintos de constantes, nomeadamente a , b , n (adimensionais) e k (constante de velocidade de secagem, em min^{-1}), levando em consideração o tempo do processo (em minutos) (Midilli; Kucuk; Yapar, 2002; Page, 1949).

Resultados similares foram obtidos em estudos prévios sobre a cinética de secagem em outras matrizes alimentares, como filmes de *Ugni molinae* com carragena (Gómez-Pérez *et al.*, 2020) e filmes comestíveis de pululano e alginato (Zhou *et al.*, 2018), bem como na secagem de algas marinhas, incluindo *Ascophyllum nodosum* (Zhu *et al.*, 2021), *Laminaria japonica* (Kang *et al.*, 2022) e *Mastocarpus stellatus* (Arufe *et al.*, 2018), nos quais os modelos de Midilli e Page também se destacaram como os mais apropriados.

5.4 CARACTERIZAÇÃO DOS FILMES DE ALGAS

A estratégia metodológica adotada, que consistiu na preparação de suspensões individuais para cada alga marinha na formulação dos filmes, foi concebida com o propósito de assegurar a produção de filmes mais uniformes e, concomitantemente, garantir uma hidratação adequada das algas. Contudo, essa decisão introduziu alguns desafios na análise comparativa dos resultados, notadamente devido à variabilidade nas concentrações de matéria seca em cada tratamento.

Na literatura encontram-se diversos estudos dedicados à avaliação dos impactos da adição de diferentes concentrações de compostos nos filmes ou suspensões, como polissacarídeos ou plastificantes, resultando também em teores distintos de matéria seca entre

os tratamentos confeccionados (Abdul Khalil *et al.*, 2018; Balti *et al.*, 2020; Basiak; Debeaufort; Lenart, 2016; Fakhouri *et al.*, 2015; Gomaa *et al.*, 2022; Ili Balqis *et al.*, 2017; Kadzińska *et al.*, 2020; Sari *et al.*, 2019; Setyorini; Nurcahyani, 2016; Wahyuni *et al.*, 2019).

5.4.1 Análises qualitativas

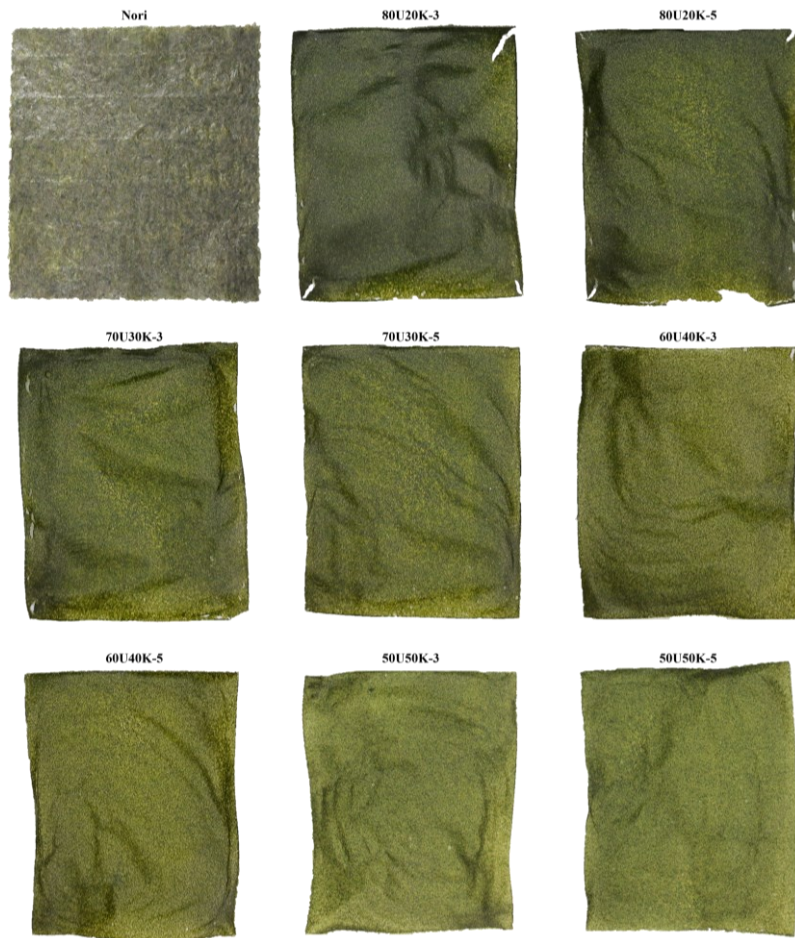
A avaliação qualitativa dos filmes de algas marinhas foi realizada logo após o processo de secagem. Observou-se que os filmes contendo as concentrações mais baixas de *K. alvarezii* (80U20K e 70U30K) apresentaram algumas falhas nas bordas, ao contrário dos filmes com concentrações mais elevadas, que não exibiram tal característica. No entanto, notou-se que o tempo de aquecimento a 90 °C influenciou essa característica dos filmes. Para a mesma concentração, os filmes submetidos a 5 minutos de aquecimento apresentaram menos imperfeições do que aqueles aquecidos por apenas 3 minutos. Essa diferença pode ser atribuída, possivelmente, a uma maior liberação de polissacarídeos na suspensão durante o processo de aquecimento mais prolongado.

É importante destacar que concentrações mais elevadas de *K. alvarezii* não foram usadas nos filmes comestíveis, uma vez que o objetivo era produzir um filme flexível com *U. lactuca*. Portanto, estabelecemos um limite máximo de 50% para cada alga marinha, garantindo que não houvesse mais *K. alvarezii* do que *U. lactuca*. Além disso, foi determinado um limite máximo de aquecimento de 5 minutos a 90 °C, pois, em períodos mais longos, a espalhabilidade da suspensão era prejudicada, uma vez que ela gelificava mais rapidamente ao ponto de não conseguir espalhar-se no molde.

Em relação à uniformidade, todos os grupos apresentaram variações de cor em certos pontos devido ao método de secagem empregado. Isso se deve ao fato de que algumas áreas dos filmes secavam mais rapidamente durante o processo, levando a enrugamentos e, conseqüentemente, a áreas mais escuras. Além disso, apesar de ser realizada uma desareação das soluções, os filmes exibiram pequenas bolhas de ar aprisionadas e exibiram tonalidade esverdeada, a qual se tornava menos intensa à medida que a concentração de *K. alvarezii* aumentava.

Na Figura 21 são apresentadas imagens dos filmes comestíveis produzidos a partir das algas marinhas *U. lactuca* e *K. alvarezii* e do filme comestível comercial (Nori).

Figura 21 – Imagens dos filmes comestíveis produzidos e do filme comercial (nori) usado como referência

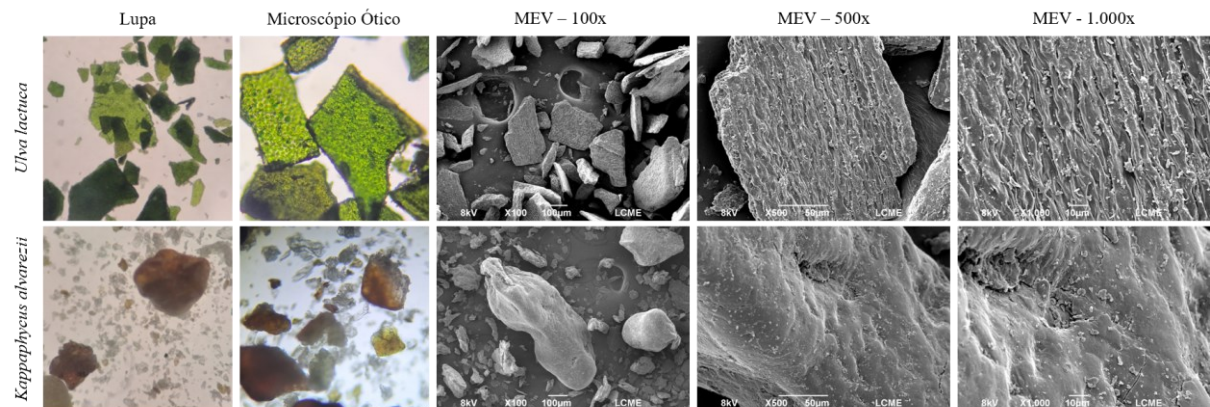


Fonte: elaborado pelo autor

5.4.2 Microscopia

Através da Figura 22, é possível visualizar as imagens capturadas por microscópio estereoscópico, óptico e eletrônico de varredura (MEV) das amostras de pó de algas. Ao analisar as imagens das amostras em pó, foi evidenciado um padrão no tamanho das partículas de *U. lactuca*. No entanto, no caso de *K. alvarezii*, observa-se uma falta de uniformidade nas dimensões das partículas, isso ocorre devido ao processo utilizado para moer e a não classificação posterior.

Figura 22 – Micrografias da superfície das amostras de pó das algas marinhas

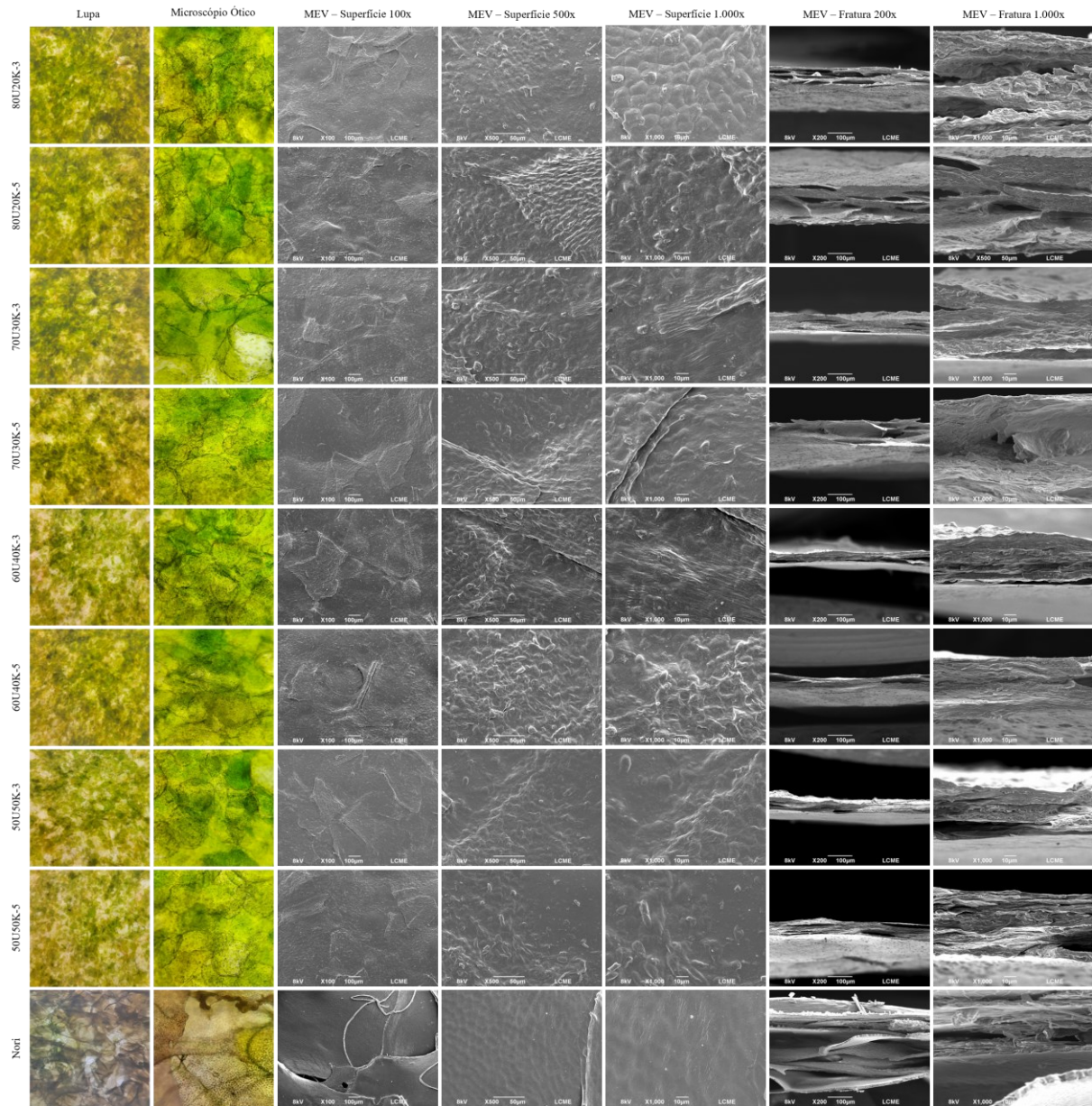


Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 23, exibimos as micrografias que capturam as características das superfícies expostas ao ar durante o processo de secagem e fraturas dos filmes comestíveis e nori, respectivamente. No caso dos filmes, à medida que a proporção de *K. alvarezii* aumentou, os filmes exibiram áreas mais transparentes. Essas áreas correspondem às partes compostas por esta alga. Quanto ao nori, devido ao seu processo de preparação com a alga *in natura*, torna-se possível observar que o filme se estrutura em camadas de alga, incluindo até a presença de outras variedades algais. Todas as amostras de filmes exibem superfícies irregulares, no entanto, observa-se que à medida que a concentração de *K. alvarezii* aumenta as irregularidades diminuem.

As imagens das fraturas revelam que todos os filmes exibem orifícios, acompanhados por uma diminuição na espessura à medida que a concentração de *K. alvarezii* aumenta. Para o nori, fabricado com a biomassa *in natura* da alga *Porphyra*, é perceptível a presença de camadas que refletem as estruturas formadas durante o processo de preparo da suspensão e prensagem no molde.

Figura 23 – Micrografias da superfície e das fraturas dos filmes comestíveis e nori



Fonte: elaborado pelo autor

5.4.3 Cor, opacidade e transparência

Na Tabela 12, estão apresentados os dados referentes à coloração dos pós das algas marinhas, filmes e nori.

A partir da análise dos parâmetros de cor foi encontrada uma diferença significativa entre os pós derivados das algas marinhas. O pó de *U. lactuca* exibe uma tonalidade esverdeada, evidenciada ao elevado teor de clorofilas (*a* e *b*) presente nas espécies desse gênero (Magdugo *et al.*, 2020; Martins *et al.*, 2021). Em contraste, o pó de *K. alvarezii* demonstra uma coloração amarronzada, uma vez que, para este estudo, as amostras selecionadas eram predominantemente marrons, com uma menor presença de coloração verde. No entanto, é importante destacar que, de acordo com a literatura, as espécies de *K. alvarezii* podem assumir tonalidades que variam do avermelhado ao amarelado, do marrom ao verde, dependendo da concentração do pigmento ficoeritrina (Rudke; de Andrade; Ferreira, 2020).

Tabela 12 – Parâmetros de cor dos pós das algas marinhas, filme e nori

Amostra	L*	a*	b*
<i>U. lactuca</i>	31,22 ± 0,00 ^{ab}	-7,41 ± 0,00 ^a	14,41 ± 0,00 ^{abc}
<i>K. alvarezii</i>	59,30 ± 0,02 ^e	2,97 ± 0,02 ^e	16,01 ± 0,04 ^{bcd}
Nori	31,48 ± 2,54 ^{ab}	-0,81 ± 1,10 ^d	17,47 ± 2,93 ^c
80U20K-3	29,30 ± 0,78 ^a	-3,62 ± 0,60 ^c	10,18 ± 1,22 ^a
80U20K-5	29,54 ± 1,46 ^a	-3,73 ± 0,61 ^c	10,99 ± 2,19 ^{ab}
70U30K-3	32,91 ± 0,79 ^b	-5,27 ± 0,42 ^b	16,52 ± 0,96 ^c
70U30K-5	32,53 ± 0,93 ^b	-4,74 ± 0,54 ^{bc}	15,02 ± 0,24 ^c
60U40K-3	37,34 ± 1,23 ^c	-4,78 ± 0,53 ^{bc}	20,56 ± 1,37 ^{de}
60U40K-5	36,87 ± 1,19 ^c	-5,13 ± 0,40 ^b	22,38 ± 1,49 ^e
50U50K-3	43,41 ± 0,90 ^d	-5,49 ± 0,61 ^{ab}	28,99 ± 1,22 ^f
50U50K-5	44,48 ± 2,13 ^d	-5,69 ± 0,40 ^{ab}	28,88 ± 1,43 ^f

Fonte: elaborado pelo autor

Nota: médias seguidas de letras diferentes representam diferenças significativas ($p \leq 0,05$) segundo teste de Tukey

Assim, os resultados da análise de cor refletem as características intrínsecas das algas marinhas utilizadas, com base em suas composições de pigmentos distintas. Os valores obtidos para o pó de *U. lactuca* mostraram semelhança com os resultados obtidos para os snacks produzidos a partir de *U. fasciata*. Os parâmetros de cor L*, a* e b* foram registrados como $9,28 \pm 1,14$, $-6,16 \pm 0,25$ e $12,52 \pm 0,81$, respectivamente (Jayakody; Vanniarachchy; Wijesekara, 2021).

Ao analisarmos os dados dos filmes, é evidente que à medida que a concentração de *K. alvarezii* aumenta, os filmes se tornam mais claros e adquirem um tom de verde mais luminoso. Essa característica pode ser atribuída à diminuição da proporção de *U. lactuca* presente nos filmes, o que naturalmente resulta em uma tonalidade verde menos intensa devido a menor concentração da alga. Portanto, valores mais baixos de L* indicam filmes com cores

mais escuras, ao passo que valores mais elevados de L^* sugerem filmes mais claros (Abdillah; Charles, 2021).

Da mesma forma que observado neste estudo, uma pesquisa anterior também constatou que o aumento da concentração de *K. alvarezii* resultou em uma tonalidade mais pronunciadamente amarelada e saturada (Abdul Khalil *et al.*, 2018).

Para uma comparação mais precisa entre os tratamentos com os pós das algas marinhas e o nori, foi analisada a diferença de cor de cada tratamento com essas amostras (Tabela 13). É possível notar que à medida que se aumentou a concentração de *K. alvarezii* no filme, ele apresentou menos diferença em relação ao pó de *K. alvarezii* e maior em relação a *U. lactuca*. Ao analisar os dados em relação ao nori, nota-se que o tratamento mais parecido é o de 70U30K e que o menos parecido é o de 50U50K.

Tabela 13 – Diferença de cor dos filmes com os pós das algas marinhas e nori

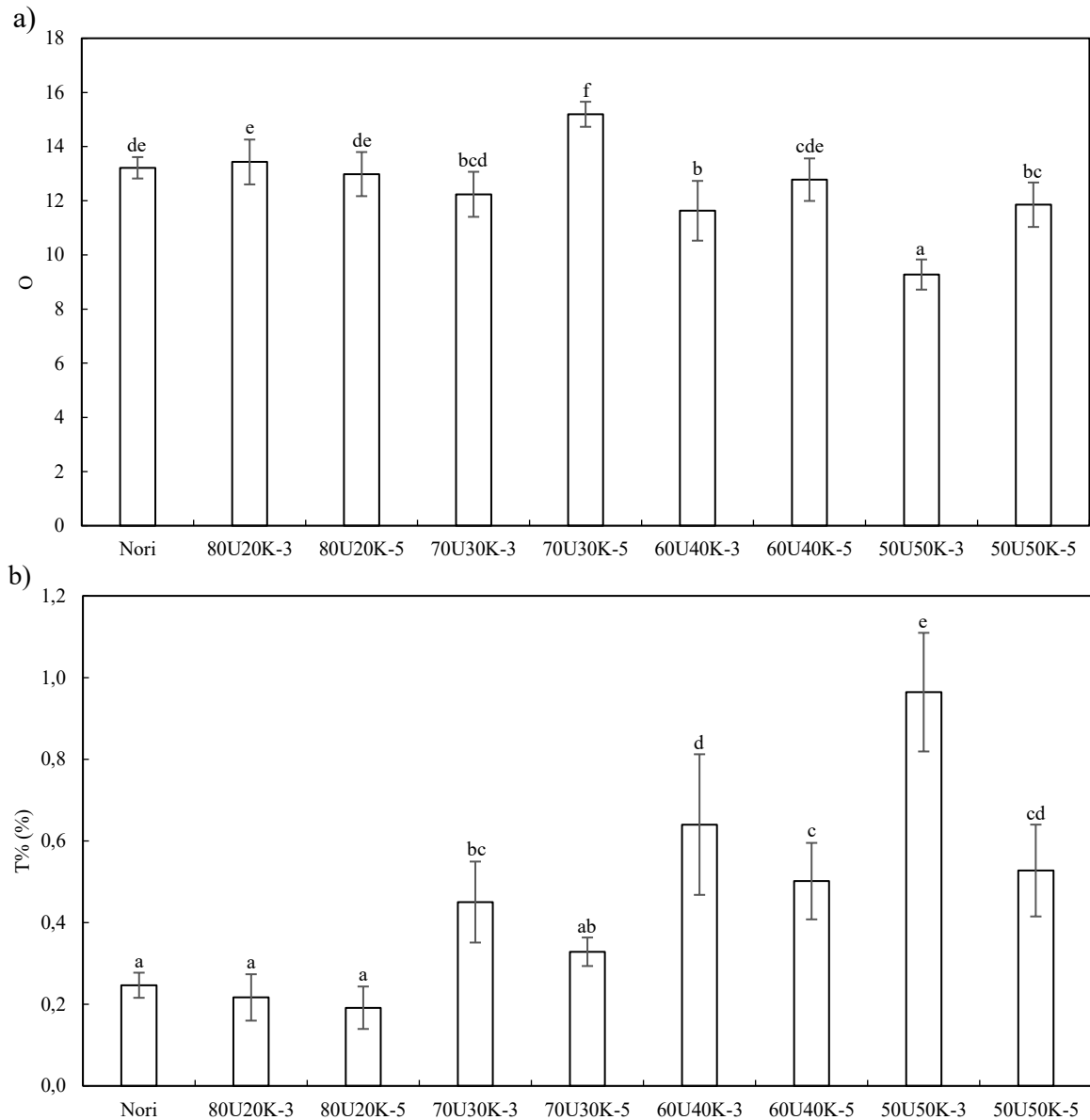
Amostra	ΔE		
	<i>U. lactuca</i>	<i>K. alvarezii</i>	Nori
80U20K-3	6,00	31,26	8,11
80U20K-5	5,30	30,92	7,37
70U30K-3	3,45	27,65	4,79
70U30K-5	3,03	27,88	4,75
60U40K-3	9,06	23,73	7,73
60U40K-5	10,03	24,68	8,48
50U50K-3	19,10	22,19	17,24
50U50K-5	19,70	21,45	17,97

Fonte: elaborado pelo autor

Os dados relativos à opacidade, transparência e absorvância no comprimento de onda de 400 a 800 nm dos filmes e nori estão apresentados na Figura 24. A opacidade é uma característica que se opõe à transparência, ou seja, quanto menor a opacidade, maior será a transparência do filme (Abdul Khalil *et al.*, 2018). É possível notar uma tendência de redução na opacidade à medida que a concentração de *K. alvarezii* nos filmes é incrementada.

Segundo Ramu Ganesan, Shanmugam e Bhat (2018), filmes produzidos com ulvano tendem a exibir maior opacidade do que os filmes feitos com carragena semirrefinada, devido à presença do pigmento clorofila. Da mesma forma, filmes produzidos com celulose e ulvano também apresentaram maior opacidade à medida que a concentração de ulvano aumentou (Gomaa *et al.*, 2022). De maneira geral, as opacidades mais baixas podem ser atribuídas à diminuição na concentração de *U. lactuca*, bem como à redução na espessura dos filmes.

Figura 24 – Opacidade (a) e transparência (b) dos filmes comestíveis e nori



Fonte: elaborado pelo autor

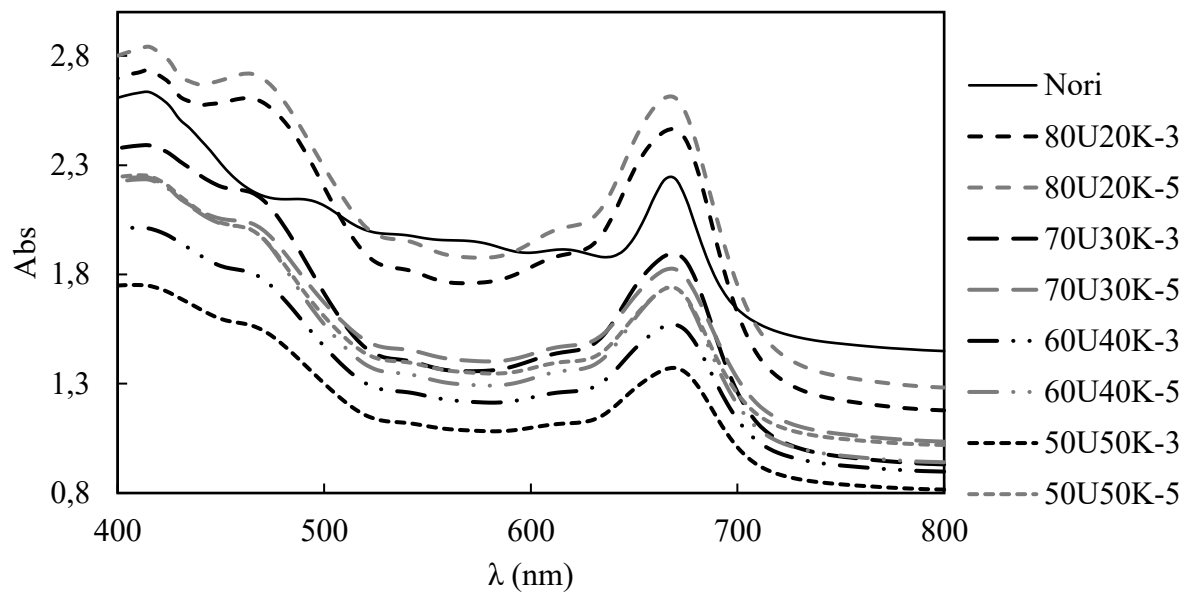
Nota: médias seguidas de letras diferentes representam diferenças significativas ($p \leq 0,05$) segundo teste de Tukey

Em relação à transparência, à medida que houve um aumento da concentração da *K. alvarezii* a transparência aumentou. Além disso, para tratamentos com a mesma concentração, destaca-se ainda, que aqueles submetidos a um período de aquecimento de 5 minutos apresentaram menor transparência em comparação com os tratamentos de 3 minutos. Esse padrão provavelmente está relacionado ao fato de que o aumento no tempo de aquecimento da amostra resultou na concentração mais acentuada da matéria presente na suspensão, devido à

evaporação da água. Além disso, outra possível explicação seria pela degradação da clorofila devido ao tempo prolongado em temperaturas elevadas (Santiago; Moreira, 2020).

Conforme evidenciado por Aguirre-Von-Wobeser, Figueroa e Cabello-Pasini (2001), a clorofila a extraída de diferentes morfotipos de *K. alvarezii*, sejam eles de tonalidades verdes ou vermelhas, apresentou notáveis picos de absorção na faixa de 400 a 500 e 650 a 700 nm. Esse padrão de absorção semelhante foi também constatado para *Ulva* spp. (Rehm *et al.*, 2018) e para extratos obtidos por meio da técnica de extração assistida por micro-ondas aplicada a *Ulva flexuosa* (Fabrowska *et al.*, 2018). No presente estudo, observamos picos de absorção na faixa de 400 a 500 nm e 650 a 700 nm, os quais são indicativos da presença de pigmentos típicos de algas marinhas, como clorofilas, carotenoides, ficoeritrina e ficocianina (Figura 25).

Figura 25 – Espectro de absorção dos filmes comestíveis elaborados com diferentes concentrações de *U. lactuca* e *K. alvarezii* na região de comprimento de onda visível



5.4.4 Solubilidade e higroscopicidade

Na Tabela 14, apresentam-se os dados de solubilidade e higroscopicidade dos pós e filmes das algas marinhas e nori, além dos dados de espessura, densidade e massa dos filmes.

Tabela 14 – Solubilidade e higroscopicidade dos pós das algas marinhas, filmes comestíveis e nori e, espessura, densidade e massa dos filmes comestíveis.

Solubilidade (%)	H (%)	x (mm)	d (g.cm ⁻³)	m (g)
------------------	-------	--------	-------------------------	-------

<i>U. lactuca</i>	18,26	±	0,17 ^b	11,34	±	0,15 ^a							
<i>K. alvarezii</i>	11,89	±	0,59 ^a	14,32	±	0,06 ^b							
Nori	33,55	±	1,21 ^{de}	14,80	±	0,48 ^{bc}	0,156	±	0,021 ^f	0,054	±	0,001 ^{bc}	
80U20K-3	29,00	±	2,62 ^c	15,79	±	0,35 ^{cd}	0,136	±	0,012 ^e	0,065	±	0,005 ^d	1,608 ± 0,071 ^e
80U20K-5	28,67	±	1,39 ^c	16,61	±	0,11 ^d	0,134	±	0,010 ^e	0,061	±	0,003 ^{cd}	1,513 ± 0,077 ^{de}
70U30K-3	30,77	±	0,70 ^{cd}	16,52	±	0,32 ^d	0,124	±	0,009 ^d	0,060	±	0,003 ^{cd}	1,387 ± 0,174 ^{cd}
70U30K-5	32,34	±	0,98 ^{cd}	15,73	±	0,46 ^{cd}	0,116	±	0,009 ^{cd}	0,055	±	0,004 ^{bc}	1,356 ± 0,201 ^c
60U40K-3	36,43	±	1,37 ^e	16,22	±	0,48 ^d	0,112	±	0,009 ^{bc}	0,052	±	0,002 ^{ab}	1,315 ± 0,050 ^{bc}
60U40K-5	36,39	±	1,89 ^e	16,58	±	0,05 ^d	0,106	±	0,009 ^b	0,052	±	0,004 ^{ab}	1,277 ± 0,055 ^{abc}
50U50K-3	41,86	±	0,57 ^f	16,63	±	0,38 ^d	0,105	±	0,011 ^b	0,048	±	0,002 ^{ab}	1,178 ± 0,049 ^{ab}
50U50K-5	48,10	±	0,87 ^g	16,03	±	0,07 ^d	0,095	±	0,008 ^a	0,044	±	0,005 ^a	1,151 ± 0,046 ^a

Fonte: elaborado pelo autor

Nota: H: higroscopicidade; x: espessura; d: densidade; m: peso dos filmes. Médias seguidas de letras diferentes representam diferenças significativas ($p \leq 0,05$) segundo teste de Tukey

Os filmes que apresentaram em sua composição maior concentração de *K. alvarezii* foram mais solúveis em água. De acordo com a literatura, a espessura dos filmes e a natureza hidrofílica da k-carragena e da biomassa da *K. alvarezii* podem influenciar na solubilidade (Ili Balqis *et al.*, 2017; Murugan *et al.*, 2023; Rhim, 2012).

Em relação ao nori, observa-se que a solubilidade alcançada foi similar aos tratamentos com concentrações intermediárias. Um filme comestível obtido a partir de *K. alvarezii*, conforme descrito por Siah, Aminah e Ishak (2015), alcançou uma solubilidade de aproximadamente 66% ao ser submetido a uma abordagem com um tempo de imersão em água deionizada reduzido (30 min). Além disso, filmes elaborados com carragena semirrefinada exibiram uma solubilidade de 42% (Farhan; Hani, 2017). Esse resultado evidencia a tendência de filmes produzidos com esta alga de apresentarem solubilidades mais elevadas, assim como observado neste estudo.

No entanto, ao compararmos os resultados obtidos com os filmes comestíveis destinados a aplicações em embalagens e revestimentos, notamos que a solubilidade alcançada neste caso foi comparativamente menor na maioria dos casos (Davoodi; Milani; Farahmandfar, 2021; Farhan; Hani, 2017; Goma *et al.*, 2022; Guidara *et al.*, 2020). A capacidade de se dissolver em água é uma propriedade importante dos filmes comestíveis empregados na indústria de alimentos. Essa característica é benéfica quando os filmes são ingeridos juntamente com os alimentos ou quando é necessário que se dissolvam em água antes de serem utilizados. No entanto, em determinados cenários, é essencial que os filmes sejam insolúveis em água para conferir maior resistência à umidade da embalagem e manter a integridade do produto, especialmente em situações que envolvem alimentos com elevado teor de umidade (Hashemi Gahrue *et al.*, 2020, 2022).

A higroscopicidade é uma medida da capacidade de adsorção de água das partículas. Os valores de higroscopicidade entre os tratamentos foi similar com valores próximos a 16% e sem diferença significativa entre si. Em relação ao nori, esse foi similar a 80U20K-3 e 70U20K-5.

5.4.5 Espessura e densidade

Os resultados decorrentes da análise de espessura e densidade encontram-se apresentados na Tabela 14. Observa-se uma tendência tanto nos valores de espessura quanto de densidade: à medida que a concentração de *K. alvarezii* é incrementada nos filmes, estes parâmetros exibem uma perceptível redução. De fato, isso era esperado, dado que as suspensões de *K. alvarezii* levam uma proporção menor de soluto em relação ao solvente, ao contrário das suspensões de *U. lactuca*. Conseqüentemente, a diminuição na espessura e densidade dos filmes, como resposta à presença mais marcante de *K. alvarezii*, encontra justificativa no fato de que os filmes com teores mais elevados desta alga marinha carregam uma maior proporção de água na suspensão prévia à etapa de secagem.

Os filmes comestíveis foram pesados imediatamente após a etapa de secagem, com um total de 12 repetições realizadas para cada tratamento. Os resultados da pesagem dos filmes corroboram com essa influência da concentração de *K. alvarezii* na densidade dos filmes, uma vez que os pesos dos filmes diminuíram à medida que a concentração de *K. alvarezii* aumentou. Esse mesmo padrão é esperado e já foi constatado em outros estudos, onde o aumento da matéria seca resultou em um aumento correspondente na espessura dos filmes (Abdillah; Charles, 2021; Abdul Khalil *et al.*, 2018; Gomaa *et al.*, 2022; Wahyuni *et al.*, 2019).

Ao compararmos os resultados obtidos com os filmes comestíveis destinados a aplicações em embalagens e revestimentos, notamos que a espessura alcançada neste estudo foi na maioria dos casos superior ao encontrado na literatura (Davoodi; Milani; Farahmandfar, 2021; Farhan; Hani, 2017; Gomaa *et al.*, 2022; Guidara *et al.*, 2020; Murugan *et al.*, 2023). Essa observação está de acordo com as expectativas, uma vez que, para aplicações nesse contexto, espessuras menores é esperada. No entanto, houve casos em que as espessuras foram similares ou superiores ao do presente trabalho (Abdul Khalil *et al.*, 2018; Murugan *et al.*, 2023; Ramu Ganesan; Shanmugam; Bhat, 2018; Yuan *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2021).

Ao analisar os filmes comestíveis ou *leathers* que incluem algas marinhas ou polissacarídeos extraídos, destinados ao consumo como alimento, observa-se que as espessuras alcançadas são consistentes com as descobertas anteriormente documentadas. No entanto, é importante notar uma notável variação entre os estudos consultados. Por exemplo, um material semelhante ao nori, produzido pela combinação das espécies de algas *Gracilaria* e *Ulva* com diferentes concentrações de glicerol, apresentou espessuras que variavam de 0,26 a 0,50 mm. Esses valores são consideravelmente superiores à espessura do nori comercial utilizado como referência (0,16 mm), conforme relatado por Sinurat et al. (2021).

Outro estudo conduzido por Wahyuni et al. (2019) investigou o efeito da concentração de k-carragena em couros vegetais provenientes da planta *Moringa oleifera*, resultando em espessuras que variaram de 0,015 a 0,095 mm com o aumento da concentração de carragena. Enquanto isso, filmes comestíveis compostos por maçã, alginato de sódio e diferentes óleos vegetais exibiram espessuras situadas na faixa de 1,22 a 1,60 mm, conforme relatado por Kadzińska et al. (2020).

A espessura do nori se mostrou em conformidade com os valores relatados na literatura (Sinurat; Fransiska; Livia, 2021).

5.4.6 Propriedades mecânicas dos filmes

Os resultados dos testes de tensão de ruptura (MPa), alongamento na ruptura (%), módulo de Young (MPa.%⁻¹) e resistência média à propagação do rasgo para os filmes das algas marinhas e nori estão apresentados na Tabela 15.

Foi observado que a combinação contendo 60% de *U. lactuca* e 40% de *K. alvarezii* apresentou as maiores tensões de ruptura em comparação com as demais composições. Esse aumento na resistência, relacionado à maior concentração de *K. alvarezii*, pode ser explicado pela formação de uma estrutura de dupla hélice pelos polímeros de carragena presentes na alga marinha (Abdul Khalil *et al.*, 2018). Essa estrutura proporciona uma maior coesão e resistência mecânica aos filmes, contribuindo para os resultados observados.

Tabela 15 – Tensão de ruptura (MPa), alongamento na ruptura (%), módulo de Young (MPa.%⁻¹) e resistência média à propagação do rasgo (N) para os filmes e nori

Amostra	σ_{rup} (MPa)	ϵ_{rup} (%)	Y (Mpa.% ⁻¹)	Força Média (N)
Nori	1,289 ± 0,467 ^a	0,020 ± 0,042 ^a	0,188 ± 0,114 ^a	0,089 ± 0,014 ^c

80U20K-3	7,072 ± 0,548 ^{bcd}	0,445 ± 0,159 ^{cd}	6,602 ± 0,707 ^b	0,069 ± 0,013 ^{cd}
80U20K-5	8,102 ± 1,360 ^{bcd}	0,517 ± 0,169 ^d	8,153 ± 0,973 ^{cd}	0,078 ± 0,011 ^{de}
70U30K-3	7,403 ± 1,167 ^{bc}	0,725 ± 0,135 ^e	7,684 ± 1,122 ^{bc}	0,059 ± 0,006 ^{abc}
70U30K-5	7,237 ± 1,636 ^b	0,402 ± 0,113 ^{bcd}	9,796 ± 1,013 ^e	0,061 ± 0,005 ^{abc}
60U40K-3	9,020 ± 2,791 ^{cde}	0,320 ± 0,147 ^{bc}	8,926 ± 0,607 ^{de}	0,064 ± 0,009 ^{bc}
60U40K-5	10,135 ± 2,388 ^e	0,437 ± 0,171 ^{cd}	9,623 ± 0,824 ^e	0,060 ± 0,009 ^{abc}
50U50K-3	7,999 ± 1,190 ^{bcd}	0,411 ± 0,102 ^{bcd}	8,076 ± 1,203 ^{cd}	0,051 ± 0,005 ^a
50U50K-5	9,169 ± 1,427 ^{de}	0,304 ± 0,139 ^b	9,529 ± 1,065 ^e	0,055 ± 0,007 ^{ab}

Fonte: elaborado pelo autor

Nota: médias seguidas de letras diferentes representam diferenças significativas ($p \leq 0,05$) segundo teste de Tukey

No que diz respeito ao alongamento na ruptura, foi notada uma variação considerável nos resultados dentro de um mesmo tratamento, o que sugere uma elevada variabilidade nas amostras. No entanto, é possível observar uma diminuição gradual com o aumento da concentração de *K. alvarezii*. Essa tendência pode ser explicada à luz de estudos anteriores que destacaram a relação entre o teor de material seco nos filmes e sua elasticidade, indicando que um aumento na quantidade de matéria seca tende a resultar em maior elasticidade (Abdillah; Charles, 2021; Ekrami; Emam-Djomeh, 2014).

Adicionalmente, é importante notar que uma maior espessura e teor de água podem influenciar positivamente o alongamento na ruptura (Blanco-Pascual; Gómez-Guillén; Montero, 2014). Esses fatores podem explicar a variação observada nos resultados, uma vez que diferentes concentrações de *K. alvarezii* também ocasionaram variações na espessura e no teor de água dos filmes. Nesse contexto, vale ressaltar que um estudo anterior observou um padrão semelhante, em que o aumento da concentração de carragena nos filmes resultou em maior tensão e menor alongamento na ruptura (Rhim, 2012).

No que se refere ao módulo de Young, observou-se uma influência do tempo de aquecimento nas misturas de cada proporção. Para a mesma proporção de algas, as amostras aquecidas por 5 minutos mostraram valores mais elevados do que as aquecidas por 3 minutos. Em resumo, aquecer a suspensão por mais tempo resultou em filmes com maior rigidez.

Um filme produzido com a combinação das algas *Gracilaria* sp. e *Ulva* sp. com diferentes concentrações de glicerol, tiveram como objetivo produzir um filme similar ao nori (Sinurat; Fransiska; Livia, 2021). Neste trabalho, os filmes produzidos obtiveram alongamentos na ruptura significativamente maior (8,16 a 13,62%) e uma menor resistência à tração (0,77 a 2,67 MPa). Os resultados corroboram com achados similares em outras pesquisas, indicando que o aumento do teor de plastificante nos filmes desempenha um papel crucial no

aprimoramento da elasticidade e flexibilidade. No entanto, essa melhoria na maleabilidade dos filmes ocorre concomitantemente com uma redução em sua resistência (Guidara *et al.*, 2020). Filmes obtidos a partir da combinação de *K. alvarezii* com aditivos naturais, tanto com quanto sem a adição de glicerol, destinados ao uso em embalagens, exibiram tensões de ruptura inferiores (variando entre 1,15 e 6,73 MPa) e alongamentos na ruptura superiores (variando entre 0,4 e 7,8 %) em comparação com os resultados obtidos neste estudo (Murugan *et al.*, 2023).

De forma geral, ao compararmos com a literatura, notamos que os filmes comestíveis desenvolvidos para serem usados como revestimentos ou embalagens de alimentos exibem maiores alongamentos na ruptura em comparação com os filmes comestíveis produzidos no presente estudo (Davoodi; Milani; Farahmandfar, 2021; Farhan; Hani, 2017; Guidara *et al.*, 2020; Ramu Ganesan; Shanmugam; Bhat, 2018). Essa é uma importante característica para esse tipo de aplicação, uma vez que esses filmes precisam possuir boa elasticidade para desempenhar suas funções.

Foi observado que o nori exibiu os valores menores dentre todos os parâmetros analisados. No entanto, é fundamental enfatizar que o nori apresentou um padrão de ruptura distinto em comparação aos filmes formulados com algas marinhas. Enquanto os filmes passaram por uma fase de alongamento antes de romperem, apresentando um padrão de ruptura linear horizontal, o nori rompeu instantaneamente no primeiro movimento do dispositivo de teste, demonstrando um padrão de ruptura vertical.

Para a resistência média à propagação do rasgo dos filmes de algas marinhas e nori, se observa que o nori foi o filme que apresentou a maior resistência ao rasgo. Além disso, é possível identificar um padrão de decaimento da resistência à medida que se aumenta a concentração de *K. alvarezii* no filme. Uma hipótese para esse fenômeno é que o aumento da concentração da suspensão de *K. alvarezii* nos filmes, conforme mencionado no Capítulo 5.4.5, conduz a uma diminuição da espessura deles e, isso, pode torná-los mais frágeis, o que leva a uma redução na força necessária para rasgar os filmes.

Com o objetivo de mitigar a influência da espessura nos dados mecânicos, optou-se em avaliar a normalização por divisão dos resultados obtidos pela espessura de cada filme, conforme demonstrado na Tabela 16.

Tabela 16 – Dados normalizados da tensão de ruptura ($\text{MPa}\cdot\text{mm}^{-1}$), alongamento na ruptura ($\%\cdot\text{mm}^{-1}$), módulo de Young ($\text{MPa}\cdot\%\cdot\text{mm}^{-1}$) e resistência média à propagação do rasgo ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$) pela espessura dos filmes comestíveis e nori

Amostra	σ_{rup} ($\text{MPa}\cdot\text{mm}^{-1}$)	ϵ_{rup} ($\%\cdot\text{mm}^{-1}$)	Y ($\text{Mpa}\cdot\%\cdot\text{mm}^{-1}$)	Força Média ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$)
Nori	9,678 ± 3,800 ^a	0,020 ± 0,400 ^a	1,116 ± 2,230 ^a	0,592 ± 0,100 ^{bc}
80U20K-3	44,045 ± 12,755 ^b	3,217 ± 1,349 ^b	48,617 ± 12,230 ^b	0,509 ± 0,095 ^{ab}
80U20K-5	70,397 ± 29,274 ^c	3,781 ± 1,629 ^{bc}	57,619 ± 9,188 ^{bc}	0,573 ± 0,073 ^{bc}
70U30K-3	69,453 ± 14,851 ^c	5,725 ± 1,388 ^d	66,222 ± 23,207 ^c	0,492 ± 0,050 ^a
70U30K-5	70,073 ± 26,055 ^c	3,261 ± 1,307 ^b	69,448 ± 22,266 ^{cd}	0,578 ± 0,058 ^{bc}
60U40K-3	77,421 ± 22,588 ^{cd}	4,322 ± 1,501 ^{bcd}	84,909 ± 10,257 ^e	0,555 ± 0,056 ^{abc}
60U40K-5	100,563 ± 33,607 ^e	4,270 ± 1,487 ^{bc}	85,918 ± 12,392 ^e	0,521 ± 0,070 ^{abc}
50U50K-3	81,997 ± 28,801 ^{cde}	5,038 ± 1,800 ^{cd}	80,610 ± 11,293 ^{de}	0,515 ± 0,058 ^{abc}
50U50K-5	97,407 ± 18,503 ^{de}	3,638 ± 1,767 ^b	84,380 ± 19,077 ^e	0,587 ± 0,114 ^c

Fonte: elaborado pelo autor

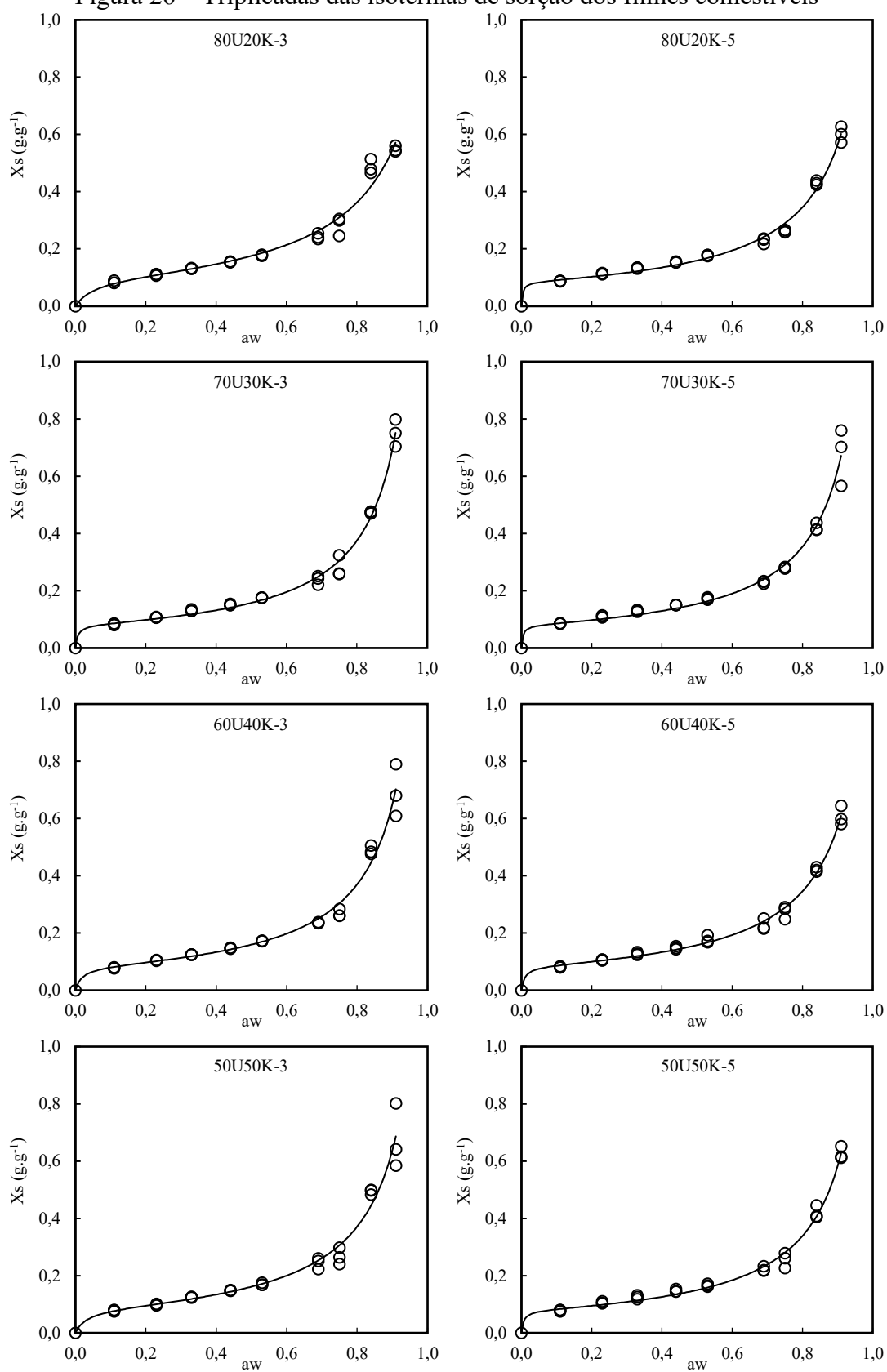
Nota: médias seguidas de letras diferentes representam diferenças significativas ($p \leq 0,05$) segundo teste de Tukey

Na busca de reduzir a influência da espessura nos dados mecânicos, os resultados se alinharam de maneira mais consistente com as expectativas. A inclusão adicional de *K. alvarezii* tinha como objetivo fundamental melhorar as propriedades mecânicas, especialmente a flexibilidade e resistência dos filmes comestíveis. Nota-se que os dados de tração na ruptura e módulo de Young apresentam uma tendência, indicando que o aumento na concentração de *K. alvarezii* contribuiu para melhorias nessas propriedades. De maneira análoga, percebeu-se uma diminuição nas disparidades dos parâmetros de alongamento na ruptura e força média ao rasgo. Esses achados indicam que, embora, nos resultados iniciais, os filmes com maior quantidade de *K. alvarezii* parecessem mais frágeis, essa aparente fragilidade provavelmente foi influenciada pela espessura dos filmes e não exclusivamente pela concentração da alga marinha.

5.4.7 Isotermas de sorção de umidade

As isotermas de sorção de umidade dos filmes de algas marinhas, aquecidos a 90 °C por 3 ou 5 minutos, juntamente com os ajustes do modelo de GAB aos dados experimentais, são apresentadas na Figura 26.

Figura 26 – Triplicadas das isothermas de sorção dos filmes comestíveis



Fonte: elaborado pelo autor

As curvas de isoterma de sorção exibem um formato sigmoidal, em conformidade com a classificação do modelo de BET (Brunauer *et al.*, 1940) e os resultados dos parâmetros do modelo de GAB (Blahovec, 2004), com $C > 2$ e K entre 0 e 1 (Tabela 17), essas curvas são classificadas como do tipo II. Esse comportamento é típico de produtos de origem biológica, observado em polissacarídeos extraídos de algas marinhas, como carragena (Oliveira *et al.*, 2019; Torres; Chenlo; Moreira, 2018) e furcellarana (Eha *et al.*, 2022), na alga marinha *Mastocarpus stellatus* (Arufe *et al.*, 2018), em folhas secas de caqui (Martínez-Las Heras *et al.*, 2014) e em pós de alfarroba (Červenka *et al.*, 2019).

A análise estatística de Tukey, realizada com um nível de significância de 0,05 entre os tratamentos para cada atividade de água, revelou discrepâncias notáveis apenas na faixa de atividade de água entre 0,11 e 0,23, bem como entre 0,84 e 0,91. Um padrão específico foi observado na atividade de água 0,84, onde amostras com concentrações idênticas, submetidas a períodos de aquecimento mais prolongados, apresentaram valores significativamente inferiores em comparação com aquelas aquecidas por períodos mais curtos. Em grande parte, amostras aquecidas por mais tempo mostraram-se menos higroscópicas para uma mesma concentração de algas marinhas.

Na Tabela 17 são apresentados os parâmetros do modelo de Guggenheim, Anderson e de Boer (GAB) e os coeficientes de correlação. O modelo de GAB se ajustou bem aos dados experimentais ($R^2 \geq 0,97$ e $RMSE \leq 0,05$).

Tabela 17 – Parâmetros do modelo de Guggenheim, Anderson e de Boer (GAB) e os coeficientes de correlação dos filmes comestíveis

Parâmetros do Modelo de GAB	Amostra							
	80U20K-3	80U20K-5	70U30K-3	70U30K-5	60U40K-3	60U40K-5	50U50K-3	50U50K-5
K	0.905	0.945	0.981	0.968	0.968	0.948	0.961	0.962
C	20.447	299.097	155.027	250.086	55.500	114.689	31.333	168.139
X_m	0.102	0.085	0.081	0.080	0.084	0.084	0.087	0.078
$RMSE$	0.029	0.017	0.021	0.029	0.045	0.016	0.039	0.017
R^2	0.971	0.992	0.996	0.997	0.990	0.997	0.988	0.995

Fonte: elaborado pelo autor

A umidade da monocamada (X_m) indica a quantidade de água que está fortemente adsorvida no alimento, sendo um parâmetro importante para predizer a estabilidade física e química dos produtos desidratados (Rahman; Labuza, 2007). Abaixo de X_m , existem taxas mínimas de reações deteriorativas, exceto a reação de oxidação. Assim, a uma determinada

temperatura, a atividade de água para armazenamento seguro corresponde a X_m ou inferior. No presente estudo, para manter o teor de umidade inferior a X_m , é necessária uma UR abaixo de 23 %, à 25 °C, para todos os tratamentos.

Os parâmetros C e K do modelo de GAB estão relacionados com a energia de interação das moléculas adsorvidas na monocamada e nas multicamadas, respectivamente. Sendo que, valores mais altos de C indicam ligações mais fortes entre moléculas de água e sítios de ligação. O parâmetro C apresentou valores significativamente altos, esse mesmo comportamento pode ser encontrado em outros trabalhos publicados, como em filmes elaborados com carragena comercial ou híbridas (Lagarón *et al.*, 2016), pós da microalga *Chlorella pyrenoidosa* (Cheng *et al.*, 2023) e erva-mate (Červenka; Hloušková; Žabčíková, 2015). O parâmetro C apresentou um maior valor para os filmes com aquecimento maior, quando comparado com tratamentos de mesma concentração. A variação observada no parâmetro C, sugere que o tempo de aquecimento prolongado afetou as interações moleculares na superfície dos filmes. Valores de K próximos a 1 indicam que a água na monocamada tende a se comportar como água líquida.

6 CONCLUSÃO

Os resultados do presente trabalho demonstram que a formulação de filmes comestíveis utilizando somente algas marinhas foi possível através da combinação da *U. lactuca* e *K. alvarezii*. A seguir, destacamos os principais resultados deste estudo.

Primeiramente, no processo de secagem, observou-se que os tempos necessários para a secagem das algas marinhas, especificamente a *U. lactuca*, bem como para a primeira e segunda secagem da *K. alvarezii*, e dos filmes comestíveis a 40 °C, foram os seguintes: 480, 1440, 480 e 360 minutos, respectivamente.

No contexto da análise reológica, foi observado que as suspensões filmogênicas apresentaram um comportamento pseudoplástico. Adicionalmente, a análise da força de gel revelou que o aumento da concentração de *K. alvarezii* na suspensão resultou em maior resistência às forças aplicadas, passando de 1,70 N nas menores concentrações para 3,40 N nas concentrações mais elevadas. Além disso, constatou-se que o prolongamento do tempo de aquecimento, para uma dada concentração, resultou em um aumento da resistência das suspensões.

A análise da cinética da secagem dos filmes evidenciou que o incremento da concentração de *K. alvarezii* acelerou a taxa de secagem durante o período de secagem à taxa constante, indo de 0,08 para 0,10 g.g⁻¹.min⁻¹ nas maiores concentrações. Esta aceleração provavelmente está relacionada a uma maior concentração de solvente na suspensão antes do processo de secagem.

Em relação a uniformidade superficial dos filmes, estes, de forma geral, exibiram uma superfície adequada, com ocorrência pontual de bolhas e falhas. Contudo, à medida que a concentração de *K. alvarezii* aumentou, os filmes tornaram-se mais homogêneos. Paralelamente, o aumento do tempo de aquecimento para uma dada concentração conduziu à produção de filmes com menor número de falhas.

Em razão das características intrínsecas das algas marinhas, o incremento na concentração de *K. alvarezii* impactou a coloração, transparência e solubilidade dos filmes. Nesse contexto, à medida que a concentração de *K. alvarezii* aumentou, os filmes exibiram coloração menos intensa de verde, maior transparência e maior solubilidade. Adicionalmente, constatou-se que o incremento na concentração de *K. alvarezii* acarretou em filmes menos

espessos e com menor densidade, atribuídos, possivelmente, à maior quantidade de solvente presente na suspensão antes do processo de secagem.

Os filmes que apresentaram uma concentração mais elevada de *K. alvarezii* exibiram maior resistência à tração, porém não demonstraram incremento na capacidade de alongamento. Esse comportamento pode ser atribuído, provavelmente, à maior fragilidade dos filmes resultante de sua menor espessura. A análise da isoterma de sorção revelou que os filmes manifestaram um comportamento do tipo II.

Em síntese, os filmes produzidos demonstraram características promissoras, embora ainda não tenham alcançado as propriedades do filme comercial nori, como a maleabilidade. O aumento da concentração de *K. alvarezii* proporcionou uma maior uniformidade e maleabilidade dos filmes, porém, ocasionou uma maior fragilidade e redução da espessura. Dessa forma, considerando parâmetros como solubilidade, coloração e espessura, o tratamento que se destacou em relação ao nori foi o 70U30K-3. Contudo, com base na análise de aparência e nos ensaios mecânicos de resistência a tração, o filme com uma concentração de 60U40K exibiu desempenho superior.

Por fim, levantamos ainda que a costa brasileira, caracterizada por uma abundante diversidade biológica, destaca-se com um potencial para a produção de algas marinhas e de seus produtos alimentícios derivados. Diante desse contexto, a exploração de alternativas a produtos dependentes exclusivamente de importação surge como uma direção para estudos. É válido salientar que os filmes comestíveis, conforme evidenciado pelos resultados obtidos, oferecem aplicações promissoras, podendo ser utilizados em snacks ou alimentos secos, assemelhando-se a outras variedades de algas. Além de contribuírem com sabor, cor e textura em diferentes preparações, esses filmes foram percebidos como sensorialmente neutros por aqueles que participaram da execução do trabalho, não apresentando amargor excessivo ou forte, o que pode facilitar sua aceitação.

Destacamos ainda a relevância da condução de análises sensoriais em estudos futuros para avaliar a aceitação do público já familiarizado com o consumo de produtos à base de algas, visando identificar possíveis aspectos a serem aprimorados. Concluimos, portanto, que para futuras aplicações, é essencial aprimorar a metodologia e a qualidade dos filmes comestíveis, visando não apenas a aceitação dos consumidores, mas também um equilíbrio entre resistência e maleabilidade.

REFERÊNCIAS

- ABDILLAH, A. A.; CHARLES, A. L. Characterization of a natural biodegradable edible film obtained from arrowroot starch and iota-carrageenan and application in food packaging. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 191, p. 618–626, 2021. Disponível em: Acesso em: 3 jan. 2022.
- ABDUL KHALIL, H. P. S. *et al.* Effects of Corn Starch and Kappaphycus alvarezii Seaweed Blend Concentration on the Optical, Mechanical, and Water Vapor Barrier Properties of Composite Films. **BioResources**, [s. l.], v. 13, n. 1, 2018. Disponível em: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/effects-of-corn-starch-and-kappaphycus-alvarezii-seaweed-blend-concentration-on-the-optical-mechanical-and-water-vapor-barrier-properties-of-composite-films/>.
- ABDUL KHALIL, H. P. S. *et al.* Seaweed based sustainable films and composites for food and pharmaceutical applications: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 77, p. 353–362, 2017. Disponível em: Acesso em: 10 jan. 2022.
- ADAMANTE, D.; MINOSSO, N. **Avaliação da viscosidade de carragenas comerciais**. 2012. 50 f. TCC (Tecnólogo em Alimentos) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2012.
- ADHARINI, R. I. *et al.* A comparison of nutritional values of Kappaphycus alvarezii, Kappaphycus striatum, and Kappaphycus spinosum from the farming sites in Gorontalo Province, Sulawesi, Indonesia. **Journal of Applied Phycology**, [s. l.], v. 31, n. 1, p. 725–730, 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-018-1540-0>. Acesso em: 10 out. 2023.
- AGA, M. B. *et al.* Recent insights into carrageenan-based bio-nanocomposite polymers in food applications: A review. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 192, p. 197–209, 2021. Disponível em: Acesso em: 10 mar. 2022.
- AGUIRRE-VON-WOBESER, E.; FIGUEROA, F. L.; CABELLO-PASINI, A. Photosynthesis and growth of red and green morphotypes of Kappaphycus alvarezii (Rhodophyta) from the Philippines. **Marine Biology**, [s. l.], v. 138, n. 4, p. 679–686, 2001. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s002270000506>. Acesso em: 27 set. 2023.
- ALBERTOS, I. *et al.* Development of functional bio-based seaweed (Himantalia elongata and Palmaria palmata) edible films for extending the shelflife of fresh fish burgers. **Food Packaging and Shelf Life**, [s. l.], v. 22, p. 100382, 2019. Disponível em: Acesso em: 17 jan. 2022.
- AMARAL, F. G. do. **Desenvolvimento de filme comestível a base de fécula de açafrão (Curcuma longa L.) e lipídios**. 2014. Dissertação (Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.
- AOAC INTERNATIONAL. **Determination of moisture, ash, protein and fat**. 18. ed. Washington D. C: AOAC International, 2005.
- AOAC INTERNATIONAL. **Official Methods of Analysis of the Association of Official Agricultural Chemists**. 20. ed. Rockville: AOAC International, 2016.
- ARUFE, S. *et al.* Air drying modelling of Mastocarpus stellatus seaweed a source of hybrid carrageenan. **Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung**, [s. l.], v. 54, n. 1, p. 177–184, 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00231-017-2117-1>. Acesso em: 4 out. 2023.

- ASTM. Standard test method for tear-propagation resistance (trouser tear) of plastic film and thin sheeting by a single-tear method. Designation D1938-02. *In: ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS*. Philadelphia: PA: American Society for Testing and Materials, 2002a.
- ASTM. Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting. Designation D882-02. *In: ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS*. Philadelphia: PA: American Society for Testing and Materials, 2002b.
- BALTI, R. *et al.* Active exopolysaccharides based edible coatings enriched with red seaweed (*Gracilaria gracilis*) extract to improve shrimp preservation during refrigerated storage. **Food Bioscience**, [s. l.], v. 34, p. 100522, 2020. Disponível em: Acesso em: 24 nov. 2023.
- BARAKAT, K. M. *et al.* Effects of ocean acidification on the growth and biochemical composition of a green alga (*Ulva fasciata*) and its associated microbiota. **Saudi Journal of Biological Sciences**, [s. l.], v. 28, n. 9, p. 5106–5114, 2021. Disponível em: Acesso em: 11 set. 2023.
- BARBOSA-CÁNOVAS, G. V *et al.* **Water Activity in Foods**. [S. l.]: Wiley, 2007. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470376454>.
- BASIAK, E.; DEBEAUFORT, F.; LENART, A. Effect of oil lamination between plasticized starch layers on film properties. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 195, p. 56–63, 2016. Disponível em: Acesso em: 24 nov. 2023.
- BASTOS, E. de O. **Desenvolvimento de bases biotecnológicas para utilização da alga verde *Ulva ohnoi* (chlorophyta)**. 2019. 165 f. Tese (Doutor em Biotecnologia e Biociências) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.
- BAWEJA, P. *et al.* Biology of Seaweeds. *In: SEAWEED IN HEALTH AND DISEASE PREVENTION*. [S. l.]: Elsevier, 2016. p. 41–106.
- BILLING, S. L. *et al.* Is social license to operate relevant for seaweed cultivation in Europe?. **Aquaculture**, [s. l.], v. 534, p. 736203, 2021. Disponível em: Acesso em: 10 mar. 2022.
- BITO, T.; TENG, F.; WATANABE, F. Bioactive Compounds of Edible Purple Laver *Porphyra* sp. (Nori). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s. l.], v. 65, n. 49, p. 10685–10692, 2017.
- BIZZARO, G.; VATLAND, A. K.; PAMPANIN, D. M. The One-Health approach in seaweed food production. **Environment International**, [s. l.], v. 158, p. 106948, 2022.
- BLAHOVEC, J. Sorption isotherms in materials of biological origin mathematical and physical approach. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 65, n. 4, p. 489–495, 2004. Disponível em: Acesso em: 14 nov. 2023.
- BLANCO-PASCUAL, N.; GÓMEZ-GUILLÉN, M. C.; MONTERO, M. P. Integral *Mastocarpus stellatus* use for antioxidant edible film development. **Food Hydrocolloids**, [s. l.], v. 40, p. 128–137, 2014.
- BLIKRA, M. J. *et al.* Seaweed products for the future: Using current tools to develop a sustainable food industry. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 118, p. 765–776, 2021. Disponível em: Acesso em: 10 mar. 2022.
- BONO, A.; ANISUZZAMAN, S. M.; DING, O. W. Effect of process conditions on the gel viscosity and gel strength of semi-refined carrageenan (SRC) produced from seaweed (*Kappaphycus alvarezii*). **Journal of King Saud University - Engineering Sciences**, [s. l.], v. 26, n. 1, p. 3–9, 2014. Disponível em: Acesso em: 31 ago. 2023.
- BRASIL. Resolução da diretoria colegiada – RDC N° 360. **Diário Oficial da União**: 23 dez. 2003. Disponível em: Acesso em: 12 jan. 2022.
- BRUNAUER, S. *et al.* On a Theory of the van der Waals Adsorption of Gases. **Journal of the American Chemical Society**, [s. l.], v. 62, n. 7, p. 1723–1732, 1940.

- BRUNAUER, S.; EMMETT, P. H.; TELLER, E. Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. **Journal of the American Chemical Society**, [s. l.], v. 60, n. 2, p. 309–319, 1938. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ja01269a023>. Acesso em: 23 jan. 2024.
- BUSCHMANN, A. H. *et al.* Seaweed production: overview of the global state of exploitation, farming and emerging research activity. **European Journal of Phycology**, [s. l.], v. 52, n. 4, p. 391–406, 2017.
- CAI, Y. Z.; CORKE, H. Production and Properties of Spray-dried Amaranthus Betacyanin Pigments. **Journal of Food Science**, [s. l.], v. 65, n. 7, p. 1248–1252, 2000.
- CARINA, D. *et al.* Seaweeds polysaccharides in active food packaging: A review of recent progress. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 110, p. 559–572, 2021. Disponível em: Acesso em: 13 jan. 2022.
- CARNEIRO, V. A. R. **Estudos moleculares e morfológicos do gênero Ulva L. (Ulvales, Chlorophyta) no sudeste do Brasil**. 2021. 105 f. - Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021. Disponível em: Acesso em: 1 mar. 2022.
- CASTRO, A. M.; MAYORGA, E. Y.; MORENO, F. L. Mathematical modelling of convective drying of fruits: A review. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 223, p. 152–167, 2018. Disponível em: Acesso em: 9 mar. 2022.
- CAZÓN, P. *et al.* Polysaccharide-based films and coatings for food packaging: A review. **Food Hydrocolloids**, [s. l.], v. 68, p. 136–148, 2017. Disponível em: Acesso em: 9 mar. 2022.
- ČERVENKA, L. *et al.* Thermodynamic properties and glass transition temperature of roasted and unroasted carob (*Ceratonia siliqua* L.) powder. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 300, p. 125208, 2019. Disponível em: Acesso em: 15 nov. 2023.
- ČERVENKA, L.; HLOUŠKOVÁ, L.; ŽABČÍKOVÁ, S. Moisture adsorption isotherms and thermodynamic properties of green and roasted Yerba mate (*Ilex paraguariensis*). **Food Bioscience**, [s. l.], v. 12, p. 122–127, 2015. Disponível em: Acesso em: 15 nov. 2023.
- CHEN, J. *et al.* Physicochemical properties and anti-oxidation activities of ulvan from *Ulva pertusa* Kjellm. **Algal Research**, [s. l.], v. 55, p. 102269, 2021. Disponível em: Acesso em: 8 mar. 2022.
- CHENG, X. *et al.* Water adsorption properties of microalgae powders: Thermodynamic analysis and structural characteristics. **Journal of Stored Products Research**, [s. l.], v. 101, p. 102093, 2023. Disponível em: Acesso em: 15 nov. 2023.
- CIAN, R. E. *et al.* Development of naturally activated edible films with antioxidant properties prepared from red seaweed *Porphyra columbina* biopolymers. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 146, p. 6–14, 2014. Disponível em: Acesso em: 9 mar. 2022.
- DACANAL, G. C.; MENEGALLI, F. C. Experimental study and optimization of the agglomeration of acerola powder in a conical fluid bed. **Powder Technology**, [s. l.], v. 188, n. 3, p. 187–194, 2009. Disponível em: Acesso em: 19 set. 2023.
- DAS, A. K. *et al.* Bio-ionic liquid promoted selective coagulation of κ -carrageenan from *Kappaphycus alvarezii* extract. **Food Hydrocolloids**, [s. l.], v. 111, p. 106382, 2021. Disponível em: Acesso em: 2 jan. 2022.
- DAVID, S. *et al.* Revisiting the carrageenan controversy: do we really understand the digestive fate and safety of carrageenan in our foods?. **Food & Function**, [s. l.], v. 9, n. 3, p. 1344–1352, 2018.
- DAVOODI, M. N.; MILANI, J. M.; FARAHMANDFAR, R. Preparation and characterization of a novel biodegradable film based on sulfated polysaccharide extracted from seaweed *Ulva intestinalis*. **Food Science & Nutrition**, [s. l.], v. 9, n. 8, p. 4108–4116, 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/fsn3.2370>. Acesso em: 9 mar. 2022.

- DE MELO, N. S. M. *et al.* Effects of dry and rainy seasons on the chemical composition of *Ulva fasciata*, *Crassiphycus corneus*, and *Sargassum vulgare* seaweeds in tropical environment. **Revista Brasileira de Botânica**, [s. l.], v. 44, n. 2, p. 331–344, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40415-021-00700-4>. Acesso em: 11 set. 2023.
- DE MORAES, J. O. *et al.* Scale-up of the production of cassava starch based films using tape-casting. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 119, n. 4, p. 800–808, 2013.
- DOMINGUEZ, H.; LORET, E. P. *Ulva lactuca*, A Source of Troubles and Potential Riches. **Marine Drugs** 2019, Vol. 17, Page 357, [s. l.], v. 17, n. 6, p. 357, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1660-3397/17/6/357/htm>. Acesso em: 1 mar. 2022.
- DONG, Y.; WEI, Z.; XUE, C. Recent advances in carrageenan-based delivery systems for bioactive ingredients: A review. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 112, p. 348–361, 2021. Disponível em: Acesso em: 10 out. 2023.
- DUARTE, C. M. *et al.* Can Seaweed Farming Play a Role in Climate Change Mitigation and Adaptation?. **Frontiers in Marine Science**, [s. l.], v. 4, 2017.
- EHA, K. *et al.* Water sorption behaviour of commercial furcellaran. **Heliyon**, [s. l.], v. 8, n. 10, p. e11056, 2022. Disponível em: Acesso em: 15 nov. 2023.
- EISMANN, A. I. *et al.* *Ulva* spp. carotenoids: Responses to environmental conditions. **Algal Research**, [s. l.], v. 48, p. 101916, 2020. Disponível em: Acesso em: 15 dez. 2021.
- EKRAMI, M.; EMAM-DJOMEH, Z. Water Vapor Permeability, Optical and Mechanical Properties of Salep-Based Edible Film. **Journal of Food Processing and Preservation**, [s. l.], v. 38, n. 4, p. 1812–1820, 2014. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jfpp.12152>. Acesso em: 28 set. 2023.
- EL-NAGGAR, N. E. A. *et al.* Statistical optimization for cadmium removal using *Ulva fasciata* biomass: Characterization, immobilization and application for almost-complete cadmium removal from aqueous solutions. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 1–17, 2018. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-018-30855-2>. Acesso em: 26 dez. 2021.
- ERBAY, Z.; ICIER, F. A Review of Thin Layer Drying of Foods: Theory, Modeling, and Experimental Results. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [s. l.], v. 50, n. 5, p. 441–464, 2010.
- ERNIATI, E. *et al.* Chemical evaluation of a nori-like product (Geluring) made from the mixture of *gelidium* sp. and *ulva lactuca* seaweeds. **Current Research in Nutrition and Food Science**, [s. l.], v. 6, n. 3, p. 664–671, 2018. Disponível em: Acesso em: 3 jan. 2022.
- FABROWSKA, J. *et al.* Isolation of chlorophylls and carotenoids from freshwater algae using different extraction methods. **Phycological Research**, [s. l.], v. 66, n. 1, p. 52–57, 2018. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/pre.12191>. Acesso em: 27 set. 2023.
- FAKHOURI, F. M. *et al.* Edible films and coatings based on starch/gelatin: Film properties and effect of coatings on quality of refrigerated Red Crimson grapes. **Postharvest Biology and Technology**, [s. l.], v. 109, p. 57–64, 2015. Disponível em: Acesso em: 30 nov. 2023.
- FAO. **The State of World Fisheries and Aquaculture 2022**. [S. l.]: FAO, 2022. Disponível em: <http://www.fao.org/documents/card/en/c/cc0461en>.
- FARHAN, A.; HANI, N. M. Characterization of edible packaging films based on semi-refined kappa-carrageenan plasticized with glycerol and sorbitol. **Food Hydrocolloids**, [s. l.], v. 64, p. 48–58, 2017. Disponível em: Acesso em: 19 set. 2023.

- FARIA, G. S. M. de. **Influência do processo de secagem convectiva na qualidade da carragenana extraída de kappaphycus alvarezii**. 2012. 76 f. Dissertação (Mestre em Engenharia de Alimentos) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.
- FELIX, N.; BRINDO, R. A. Substituting fish meal with fermented seaweed, *Kappaphycus alvarezii* in diets of juvenile freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii*. ~ 261 ~ **International Journal of Fisheries and Aquatic Studies**, [s. l.], v. 1, n. 5, p. 261–265, 2014. Disponível em: www.fisheriesjournal.com. Acesso em: 10 out. 2023.
- FELLOWS, P. J. **Food processing technology: Principles and practice**. 3^oed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2009.
- FELLOWS, P. (Peter). **Food processing technology : principles and practice**. [s. l.], v. 4^o, p. 1226, 2016. Disponível em: Acesso em: 11 mar. 2022.
- FIGUEIRA, T. A. *et al.* Structural Characterization of Ulvan Polysaccharide from Cultivated and Collected *Ulva fasciata* (Chlorophyta). **Advances in Bioscience and Biotechnology**, [s. l.], v. 11, n. 05, p. 206–216, 2020. Disponível em: <https://www.scirp.org/journal/doi.aspx?doi=10.4236/abb.2020.115016>.
- FLEURENCE, J. Seaweeds as Food. *In*: SEAWEED IN HEALTH AND DISEASE PREVENTION. [S. l.]: Elsevier, 2016. p. 149–167.
- FRABETTI, A. C. C. **Produção e caracterização de polpa de goiaba (*Psidium guajava* L.) em pó por cast-tape drying**. 2017. 139 f. Dissertação (Mestre em Engenharia de Alimentos) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.
- FRABETTI, A. C. C. *et al.* Strawberry-hydrocolloids dried by continuous cast-tape drying to produce leather and powder. **Food Hydrocolloids**, [s. l.], v. 121, p. 107041, 2021. Disponível em: Acesso em: 4 maio 2022.
- FREITAS, F. *et al.* Advanced Microbial Polysaccharides. *In*: BIOPOLYMERS FOR BIOMEDICAL AND BIOTECHNOLOGICAL APPLICATIONS. [S. l.]: Wiley, 2021. p. 19–62.
- FUDHOLI, A. *et al.* Energy and exergy analyses of solar drying system of red seaweed. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 68, n. PARTA, p. 121–129, 2014. Disponível em: Acesso em: 4 out. 2023.
- GEANKOPLIS, C. J. **Transport Processes and Unit Operations**. 3^oed. New Jersey: Inc. Prentice Hall, 1993.
- GLASSON, C. R. K. *et al.* A cascading biorefinery process targeting sulfated polysaccharides (ulvan) from *Ulva ohnoi*. **Algal Research**, [s. l.], v. 27, p. 383–391, 2017. Disponível em: Acesso em: 8 mar. 2022.
- GLASSON, C. R. K. *et al.* Multiple response optimisation of the aqueous extraction of high quality ulvan from *Ulva ohnoi*. **Bioresource Technology Reports**, [s. l.], v. 7, p. 100262, 2019. Disponível em: Acesso em: 8 mar. 2022.
- GLASSON, C. R. K. *et al.* Structural characterization of ulvans extracted from blade (*Ulva ohnoi*) and filamentous (*Ulva tepida* and *Ulva prolifera*) species of cultivated *Ulva*. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 194, p. 571–579, 2022. Disponível em: Acesso em: 10 mar. 2022.
- GOMAA, M. *et al.* Utilization of cellulose and ulvan from the green seaweed *Ulva lactuca* in the development of composite edible films with natural antioxidant properties. **Journal of Applied Phycology**, [s. l.], v. 34, n. 5, p. 2615–2626, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-022-02786-z>. Acesso em: 19 set. 2023.
- GÓMEZ-PÉREZ, L. S. *et al.* Evaluation of different hydrocolloids and drying temperatures in the drying kinetics, modeling, color, and texture profile of murta (*Ugni molinae* Turcz) berry leather. **Journal of Food Process Engineering**, [s. l.], v. 43, n. 2, p. e13316, 2020.

Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jfpe.13316>. Acesso em: 4 out. 2023.

GONTARD, N. **Films et enrobages comestibles : étude et amélioration des propriétés filmogènes du gluten**. 1991. 174 f. These de Doctorat - Université des sciences et techniques du Languedoc, Montpellier, 1991.

GOVAERTS, F.; OLSEN, S. O. Exploration of seaweed consumption in Norway using the norm activation model: The moderator role of food innovativeness. **Food Quality and Preference**, [s. l.], v. 99, p. 104511, 2022.

GRANATO, D. *et al.* Functional Foods: Product Development, Technological Trends, Efficacy Testing, and Safety. **Annual Review of Food Science and Technology**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 93–118, 2020.

GREENSPAN, L. Humidity Fixed Points of Binary Saturated Aqueous Solutions.

JOURNAL OF RESEARCH of the National Bureau of Standards-A. Physics and Chemistry, [s. l.], v. 81, n. 1, 1977. Disponível em: Acesso em: 24 out. 2023.

GUIDARA, M. *et al.* Effect of extraction procedures on the chemical structure, antitumor and anticoagulant properties of ulvan from *Ulva lactuca* of Tunisia coast. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 253, p. 117283, 2021. Disponível em: Acesso em: 8 mar. 2022.

GUIDARA, M. *et al.* Smart ulvan films responsive to stimuli of plasticizer and extraction condition in physico-chemical, optical, barrier and mechanical properties. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 150, p. 714–726, 2020. Disponível em: Acesso em: 9 mar. 2022.

GUIRY, M. D.; GUIRY, G. M. **AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.algaebase.org>. Acesso em: 1 ago. 2023.

GULLÓN, B. *et al.* Seaweeds as promising resource of bioactive compounds: Overview of novel extraction strategies and design of tailored meat products. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 100, p. 1–18, 2020.

HARIKRISHNAN, R. *et al.* Efficacy of ulvan on immune response and immuno-antioxidant gene modulation in *Labeo rohita* against columnaris disease. **Fish & Shellfish Immunology**, [s. l.], v. 117, p. 262–273, 2021. Disponível em: Acesso em: 13 mar. 2022.

HASHEMI GAHRUIE, H. *et al.* Development and characterization of gelatin and Persian gum composite edible films through complex coacervation. **LWT**, [s. l.], v. 153, p. 112422, 2022. Disponível em: Acesso em: 26 set. 2023.

HASHEMI GAHRUIE, H. *et al.* The effects of fatty acids chain length on the techno-functional properties of basil seed gum-based edible films. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 160, p. 245–251, 2020.

HAYDEN, H. S. *et al.* Linnaeus was right all along: *Ulva* and *Enteromorpha* are not distinct genera. <https://doi.org/10.1080/1364253031000136321>, [s. l.], v. 38, n. 3, p. 277–294, 2003. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/1364253031000136321>. Acesso em: 1 mar. 2022.

HINALOC, L. A. R.; ROLEDA, M. Y. Phenotypic diversity, growth and sexual differentiation in the progeny of wild *Kappaphycus alvarezii* (Gigartinales, Florideophyceae). **Phycologia**, [s. l.], v. 60, n. 6, p. 547–557, 2021.

ILI BALQIS, A. M. *et al.* Effects of plasticizers on the physicochemical properties of kappa-carrageenan films extracted from *Eucheuma cottonii*. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 103, p. 721–732, 2017. Disponível em: Acesso em: 2 jan. 2022.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 4. ed. São Paulo: [s. n.], 2008. Disponível em: Acesso em: 12 jan. 2022.

- JAMALUDDIN *et al.* Drying kinetics and quality characteristics of *Euचेuma cottonii* seaweed in various drying methods. **Journal of Food Processing and Preservation**, [s. l.], v. 46, n. 2, 2022.
- JANGAM, S. V.; MUJUMDAR, Arun S. Basic Concepts and Definitios. *In*: JANGAM, S. V.; LAW, C. L.; MUJUMDAR, A. S. (org.). **Drying of Foods, Vegetables and Fruits**. Singapore: [s. n.], 2010. v. 1, p. 1–30.
- JAYAKODY, M. M.; VANNIARACHCHY, M. P. G.; WIJESEKARA, W. L. I. Development and characterization of a seaweed snack using *Ulva fasciata*. **Journal of Food Science and Technology**, [s. l.], v. 58, n. 4, p. 1617–1622, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13197-020-04880-x>. Acesso em: 9 mar. 2022.
- JUNG, H.; YOON, W. B.; MATSUKAWA, S. Effect of moisture uptake on the texture of dried laver *Porphyra*. (Nori) studied by mechanical characterization and NMR measurements. **Food Hydrocolloids**, [s. l.], v. 124, p. 107223, 2022.
- KADAM, S. U. *et al.* Processing of seaweeds. *In*: SEAWEED SUSTAINABILITY. [S. l.]: Elsevier, 2015. p. 61–78.
- KADAM, S. U.; TIWARI, B. K.; O'DONNELL, C. P. Effect of ultrasound pre-treatment on the drying kinetics of brown seaweed *Ascophyllum nodosum*. **Ultrasonics Sonochemistry**, [s. l.], v. 23, p. 302–307, 2015. Disponível em: Acesso em: 4 out. 2023.
- KADZINSKA, J. *et al.* Influence of vegetable oils addition on the selected physical properties of apple–sodium alginate edible films. **Polymer Bulletin**, [s. l.], v. 77, n. 2, p. 883–900, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00289-019-02777-0>. Acesso em: 26 nov. 2023.
- KANG, H. *et al.* Design of a Greenhouse Solar-Assisted Heat Pump Dryer for Kelp (*Laminaria japonica*): System Performance and Drying Kinetics. **Foods 2022, Vol. 11, Page 3509**, [s. l.], v. 11, n. 21, p. 3509, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2304-8158/11/21/3509/htm>. Acesso em: 4 out. 2023.
- KASIM, M.; MUSTAFA, A. Comparison growth of *Kappaphycus alvarezii* (Rhodophyta, Solieriaceae) cultivation in floating cage and longline in Indonesia. **Aquaculture Reports**, [s. l.], v. 6, p. 49–55, 2017. Disponível em: Acesso em: 1 mar. 2022.
- KHOTIMCHENKO, M. *et al.* Antitumor potential of carrageenans from marine red algae. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 246, p. 116568, 2020. Disponível em: Acesso em: 3 maio 2022.
- KIDGELL, J. T. *et al.* Are all ulvans equal? A comparative assessment of the chemical and gelling properties of ulvan from blade and filamentous *Ulva*. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 264, p. 118010, 2021. Disponível em: Acesso em: 13 mar. 2022.
- KIDGELL, J. T. *et al.* Ulvan: A systematic review of extraction, composition and function. **Algal Research**, [s. l.], v. 39, p. 101422, 2019. Disponível em: Acesso em: 8 mar. 2022.
- KIM, S.-K.; PANGESTUTI, R.; RAHMADI, P. Sea Lettuces. *In*: ADVANCES IN FOOD AND NUTRITION RESEARCH. [S. l.: s. n.], 2011. v. 64, p. 57–70. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780123876690000053>.
- LAGARÓN, J M *et al.* Hybrid carrageenan-based formulations for edible film preparation: Benchmarking with kappa carrageenan. **Journal of Applied Polymer Science**, [s. l.], v. 133, n. 2, 2016. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/app.42263>. Acesso em: 29 nov. 2023.
- LEVINE, I. A.; SAHOO, Dinabandhu. **Porphyra : harvesting gold from the sea**. New Delhi: I.K. International Pub. House, 2010. Disponível em: Acesso em: 11 abr. 2022.

- LI, X. *et al.* Characterization and antibacterial activity of edible films based on carboxymethyl cellulose, *Dioscorea opposita* mucilage, glycerol and ZnO nanoparticles. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 349, p. 129208, 2021.
- LIM, H.; HOAG, S. W. Plasticizer effects on physical-mechanical properties of solvent cast Soluplus® films. **AAPS PharmSciTech**, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 903–910, 2013. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1208/s12249-013-9971-z>. Acesso em: 3 jun. 2022.
- LIU, D. *et al.* Nutraceutical potentials of algal ulvan for healthy aging. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 194, p. 422–434, 2022. Disponível em: Acesso em: 13 mar. 2022.
- LOPES, J. S. **Influência da adição da macroalga *Kappaphycus alvarezii* nas propriedades físicas de snacks à base de farinha de arroz**. 2020. 78 f. Dissertação (Mestre em Ciência dos Alimentos) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020. Disponível em: Acesso em: 10 mar. 2022.
- LOPES, J. S. *et al.* *Kappaphycus alvarezii* flours as an ingredient for seaweed-enriched, rice-based, snacks: raw algae pretreatment and physical properties of the dough and snacks. **International Journal of Food Science & Technology**, [s. l.], v. 58, n. 5, p. 2448–2457, 2023. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/ijfs.16383>. Acesso em: 25 nov. 2023.
- MADANY, M. A. *et al.* The biopolymer ulvan from *Ulva fasciata*: Extraction towards nanofibers fabrication. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 177, p. 401–412, 2021. Disponível em: Acesso em: 4 mar. 2022.
- MADUB, K. *et al.* Green seaweeds ulvan-cellulose scaffolds enhance in vitro cell growth and in vivo angiogenesis for skin tissue engineering. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 251, p. 117025, 2021. Disponível em: Acesso em: 13 mar. 2022.
- MAGDUGO, R. P. *et al.* An Analysis of the Nutritional and Health Values of *Caulerpa racemosa* (Forsskål) and *Ulva fasciata* (Delile)—Two Chlorophyta Collected from the Philippines. **Molecules** 2020, Vol. 25, Page 2901, [s. l.], v. 25, n. 12, p. 2901, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1420-3049/25/12/2901/htm>. Acesso em: 27 set. 2023.
- MAHADEVAN, K. Seaweeds: a sustainable food source. *In: SEAWEED SUSTAINABILITY*. [S. l.]: Elsevier, 2015. p. 347–364.
- MANTRI, V. A. *et al.* An appraisal on commercial farming of *Kappaphycus alvarezii* in India: success in diversification of livelihood and prospects. **Journal of Applied Phycology**, [s. l.], v. 29, n. 1, p. 335–357, 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-016-0948-7>. Acesso em: 1 mar. 2022.
- MARCOTTE, M.; HOSHAHILI, A. R. T.; RAMASWAMY, H. S. Rheological properties of selected hydrocolloids as a function of concentration and temperature. **Food Research International**, [s. l.], v. 34, n. 8, p. 695–703, 2001. Disponível em: Acesso em: 26 set. 2023.
- MARTÍNEZ-LAS HERAS, R. *et al.* Moisture sorption isotherms and isosteric heat of sorption of dry persimmon leaves. **Food Bioscience**, [s. l.], v. 7, p. 88–94, 2014. Disponível em: Acesso em: 14 nov. 2023.
- MARTINS, M. *et al.* Recovery of pigments from *Ulva rigida*. **Separation and Purification Technology**, [s. l.], v. 255, p. 117723, 2021. Disponível em: Acesso em: 27 set. 2023.
- MASARIN, F. *et al.* Chemical analysis and biorefinery of red algae *Kappaphycus alvarezii* for efficient production of glucose from residue of carrageenan extraction process. **Biotechnology for Biofuels**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 122, 2016.
- MATHIAS, T. R. dos S. *et al.* Avaliação do comportamento reológico de diferentes iogurtes comerciais. **Brazilian Journal of Food Technology**, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 12–20, 2013.

Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjft/a/rkXkmkYX9LjQPrp3kxfhzDS/?lang=pt>. Acesso em: 26 set. 2023.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A new model for single-layer drying. **Drying Technology**, [s. l.], v. 20, n. 7, p. 1503–1513, 2002. Disponível em:

<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1081/DRT-120005864>. Acesso em: 4 out. 2023.

MILINOVIC, J. *et al.* Umami taste in edible seaweeds: The current comprehension and perception. **International Journal of Gastronomy and Food Science**, [s. l.], v. 23, p. 100301, 2021.

MIN, B. R. *et al.* The role of seaweed as a potential dietary supplementation for enteric methane mitigation in ruminants: Challenges and opportunities. **Animal Nutrition**, [s. l.], v. 7, n. 4, p. 1371–1387, 2021. Disponível em: Acesso em: 10 mar. 2022.

MONTE, M. L. **Cinética e termodinâmica da secagem convectiva de filmes de quitosana**. 2016. 104 f. Dissertação (Mestre em Engenharia e Ciência de Alimentos) - Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2016. Disponível em: www.tcpdf.org. Acesso em: 9 mar. 2022.

MORAES, J. O. de. **Produção e caracterização de filmes de amido-glicerol-fibras de celulose elaborados por tape-casting**. 2013. 176 f. Tese (Doutor em Engenharia de Alimentos) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

MORAES, J. O. De; RESZKA, A.; LAURINDO, J. B. Espalhamento e secagem de filme de amido-glicerol-fibra preparado por “tape-casting” . **Pesq. agropec. bras**, [s. l.], v. 49, n. 2, p. 136–143, 2014. Disponível em: Acesso em: 5 maio 2022.

MOURITSEN, O. G. **Sushi: Food for the eye, the body and the soul**. Boston, MA: Springer US, 2009.

MURUGAN, A. *et al.* Fabrication and characterization of Kappaphycus alvarezii biomass based thin-film and its applications. **Food and Humanity**, [s. l.], v. 1, p. 589–598, 2023.

Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2949824423000630>. Acesso em: 19 set. 2023.

MUSTAPHA, S. *et al.* Production of semi-refined carrageenan from Eucheuma cottonii.

Journal of Scientific & Industrial Research, [s. l.], v. 70, p. 865–870, 2011. Disponível em: Acesso em: 2 jan. 2022.

NAGUIT, M. R. A.; TISERA, W. L. Pigment analysis on Eucheuma denticulatum (Collins and Hervey) and Kappaphycus alvarezii (Doty) cultivars cultured at different depths. **Journal The Threshold**, [s. l.], v. 4, p. 29–37, 2009.

NASERI, A.; LØVSTAD HOLDT, S.; JACOBSEN, C. Biochemical and Nutritional Composition of Industrial Red Seaweed Used in Carrageenan Production. **Journal of Aquatic Food Product Technology**, [s. l.], v. 28, n. 9, p. 967–973, 2019. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=wafp20>. Acesso em: 2 jan. 2022.

NISHIGUCHI, T. *et al.* Protective effect of porphyrin isolated from discolored nori (Porphyra yezoensis) on lipopolysaccharide-induced endotoxin shock in mice. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 93, p. 1273–1278, 2016. Disponível em: Acesso em: 3 jan. 2022.

OLIVEIRA, M. E. A. S. **Avaliação das propriedades físicas e efeito prebiótico in vitro de carragena submetida ao processo de extrusão termoplástica**. 2017. 97 f. Dissertação (Mestre em Alimentos e Nutrição) - Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

OLIVEIRA, M. E. A. S. *et al.* Extrusion of λ -carrageenan gum: Physical properties and in vitro bifidogenic effect. **Journal of Food Processing and Preservation**, [s. l.], v. 43, n. 8, p.

- e14027, 2019. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jfpp.14027>. Acesso em: 14 nov. 2023.
- ORDÓÑEZ, J. A. Conservação de alimentos com base na modificação do pH, da atmosfera e da atividade de água. Evaporação e desidratação. *In: TECNOLOGIA DE ALIMENTOS: COMPONENTES DE ALIMENTOS E PROCESSOS*. Porto Alegre: Artmed, 2005. v. 1, p. 219–242.
- ORTIZ, J. *et al.* Dietary fiber, amino acid, fatty acid and tocopherol contents of the edible seaweeds *Ulva lactuca* and *Durvillaea antarctica*. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 99, n. 1, p. 98–104, 2006. Disponível em: Acesso em: 11 set. 2023.
- OTONI, C. G. *et al.* Recent Advances on Edible Films Based on Fruits and Vegetables-A Review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, [s. l.], v. 16, n. 5, p. 1151–1169, 2017. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1541-4337.12281>. Acesso em: 10 jan. 2022.
- PÁDUA, M. de; FONTOURA, P. S. G.; MATHIAS, A. L. Chemical composition of *Ulvaria oxysperma* (Kützting) bliding, *Ulva lactuca* (Linnaeus) and *Ulva fascita* (Delile). **Brazilian Archives of Biology and Technology**, [s. l.], v. 47, n. 1, p. 49–55, 2004.
- PAGE, G. **Factors Influencing the Maximum Rates of Air Drying Shelled Corn in Thin layers**. 1949. Unpublished M.S. Thesis - Purdue University, Lafayette, 1949. Disponível em: <https://search.proquest.com/openview/7aeaccbd87e789102967d22a2ad0ca56/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>. Acesso em: 4 out. 2023.
- PARK, K. J. *et al.* **Conceitos de processo e equipamentos de secagem**. Campinas: CTEA, 2007.
- PEREIRA, A. G. *et al.* The Use of Invasive Algae Species as a Source of Secondary Metabolites and Biological Activities: Spain as Case-Study. **Marine Drugs** **2021**, Vol. **19**, Page **178**, [s. l.], v. 19, n. 4, p. 178, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1660-3397/19/4/178/htm>. Acesso em: 10 mar. 2022.
- PRADHAN, B. *et al.* Beneficial effects of seaweeds and seaweed-derived bioactive compounds: Current evidence and future prospective. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, [s. l.], v. 39, p. 102242, 2022. Disponível em: Acesso em: 4 jan. 2022.
- PRADHAN, B. *et al.* Bioactive Metabolites from Marine Algae as Potent Pharmacophores against Oxidative Stress-Associated Human Diseases: A Comprehensive Review. **Molecules**, [s. l.], v. 26, n. 1, p. 37, 2020.
- QIN, Y. **Bioactive Seaweeds for Food Applications**. [S. l.]: Elsevier, 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/C20160045667>.
- RAHMAN, M. S.; LABUZA, T. P. Water Activity and Food Preservation. *In: HANDBOOK OF FOOD PRESERVATION*. 2º ed.ed. Boca Raton: Crc Press, 2007. p. 447–476.
- RAMU GANESAN, A.; SHANMUGAM, M.; BHAT, R. Producing novel edible films from semi refined carrageenan (SRC) and ulvan polysaccharides for potential food applications. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 112, p. 1164–1170, 2018. Disponível em: Acesso em: 17 jan. 2022.
- RASYID, A. Evaluation of Nutritional Composition of The Dried Seaweed *Ulva lactuca* from Pameungpeuk Waters, Indonesia. **Tropical Life Sciences Research**, [s. l.], v. 28, n. 2, p. 119, 2017. Disponível em: </pmc/articles/PMC5584828/>. Acesso em: 11 set. 2023.
- REHM, E. *et al.* Comparing fluorescent and differential absorption LiDAR techniques for detecting algal biomass with applications to Arctic substrates. **https://doi.org/10.1117/12.2302381**, [s. l.], v. 10631, p. 288–302, 2018. Disponível em: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of->

- spie/10631/106310Z/Comparing-fluorescent-and-differential-absorption-LiDAR-techniques-for-detecting-algal/10.1117/12.2302381.full. Acesso em: 27 set. 2023.
- RHIM, J. W. Physical-Mechanical Properties of Agar/ κ -Carrageenan Blend Film and Derived Clay Nanocomposite Film. **Journal of Food Science**, [s. l.], v. 77, n. 12, p. N66–N73, 2012. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1750-3841.2012.02988.x>. Acesso em: 3 jan. 2022.
- RIOUX, L.-E.; BEAULIEU, L.; TURGEON, S. L. Seaweeds: A traditional ingredients for new gastronomic sensation. **Food Hydrocolloids**, [s. l.], v. 68, p. 255–265, 2017.
- ROLEDA, M. Y. *et al.* Chemical profiling of the Arctic sea lettuce *Ulva lactuca* (Chlorophyta) mass-cultivated on land under controlled conditions for food applications. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 341, p. 127999, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0308814620318616>. Acesso em: 26 dez. 2021.
- ROOHINEJAD, S. *et al.* Application of seaweeds to develop new food products with enhanced shelf-life, quality and health-related beneficial properties. **Food Research International**, [s. l.], v. 99, p. 1066–1083, 2017. Disponível em: Acesso em: 10 out. 2023.
- ROSARIO, E. Z. Del; MATEO, W. Hot Water Blanching Pre-Treatments: Enhancing Drying of Seaweeds (*Kappaphycus alvarezii* S.). **Open Science Journal**, [s. l.], v. 4, n. 1, 2019. Disponível em: <https://osjournal.org/ojs/index.php/OSJ/article/view/2076>. Acesso em: 20 set. 2023.
- ROUDAUT, G. *et al.* Crispness: a critical review on sensory and material science approaches. **Trends in Food Science and Technology**, [s. l.], v. 13, p. 217–227, 2002. Disponível em: <https://eurekamag.com/research/003/696/003696795.php>. Acesso em: 4 maio 2022.
- RUDKE, A. R. *et al.* Green extraction of phenolic compounds and carrageenan from the red alga *Kappaphycus alvarezii*. **Algal Research**, [s. l.], v. 67, p. 102866, 2022.
- RUDKE, A. R.; DE ANDRADE, C. J.; FERREIRA, S. R. S. *Kappaphycus alvarezii* macroalgae: An unexplored and valuable biomass for green biorefinery conversion. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 103, p. 214–224, 2020. Disponível em: Acesso em: 1 mar. 2022.
- SANTIAGO, A.; MOREIRA, R. Drying of edible seaweeds. *In: SUSTAINABLE SEAWEED TECHNOLOGIES*. [S. l.]: Elsevier, 2020. p. 131–154.
- SANTOS, A. A. dos. Produção da macroalga *Kappaphycus alvarezii* em Santa Catarina, safra 2022/2023. *In: AGROPECUÁRIA CATARINENSE*. 2. ed. Florianópolis: EPAGRI, 2023. v. 36, p. 7–9.
- SARI, D. K. *et al.* The Formulation of Artificial Nori with the Base Mixture Ingredients of *Gracilaria* sp. and *Arenga pinnata* (Wurmb) Merr. using the Natural Colorant from *Pleomele angustifolia* (Medik.) N.E. Br. **IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science**, [s. l.], v. 276, 2019. Disponível em: Acesso em: 9 mar. 2022.
- SARI-CHMAYSEM, N. *et al.* Extracted ulvans from green algae *Ulva linza* of Lebanese origin and amphiphilic derivatives: evaluation of their physico-chemical and rheological properties. **Journal of Applied Phycology**, [s. l.], v. 31, n. 3, p. 1931–1946, 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-018-1668-y>. Acesso em: 26 set. 2023.
- SASUE, A.; KASIM, Z. M. Development and phytochemical content analysis of bun incorporated with *Kappaphycus Alvarezii* seaweed powder. **AIP Conference Proceedings**, [s. l.], v. 1784, 2016. Disponível em: Acesso em: 1 mar. 2022.
- SCHEIBE, A. S. **Produção e caracterização de embalagem biodegradável de amido de mandioca e fibras usando a técnica de tape-casting**. 2012. 131 f. Dissertação (Mestre em Engenharia de Alimentos) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

- SCHMIDTCHEN, L. *et al.* Processing technologies for solid and flexible packaging materials from macroalgae. **Algal Research**, [s. l.], p. 102300, 2021.
- SCHRAMM, G. Testing Two Important Rheological Phenomena: Thixotropy and Yield Value. *In: A PRACTICAL APPROACH TO RHEOLOGY AND RHEOMETRY*. 2. ed. Karlsruhe: Thermo Electron, 2004. p. 189–202.
- SETYORINI, D.; NURCAHYANI, P. R. Effect of addition of semi refined carrageenan on mechanical characteristics of gum arabic edible film. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 128, n. 1, p. 012011, 2016. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/128/1/012011>. Acesso em: 24 nov. 2023.
- SHACKELFORD, J. F. **Introdução à ciência dos materiais para engenheiros**. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
- SHAO, P. *et al.* Hydrodynamic behavior and dilute solution properties of *Ulva fasciata* algae polysaccharide. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 134, p. 566–572, 2015a. Disponível em: Acesso em: 2 jan. 2022.
- SHAO, P. *et al.* Separation, preliminary characterization, and moisture-preserving activity of polysaccharides from *Ulva fasciata*. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 72, p. 924–930, 2015b. Disponível em: Acesso em: 9 jan. 2022.
- SIAH, W. M.; AMINAH, A.; ISHAK, A. Edible films from seaweed (*Kappaphycus alvarezii*). **International Food Research Journal**, [s. l.], v. 22, n. 6, p. 2230–2236, 2015. Disponível em: Acesso em: 2 jan. 2022.
- SIMÃO, R. da S. *et al.* Conductive drying methods for producing high-quality restructured pineapple-starch snacks. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, [s. l.], v. 70, p. 102701, 2021. Disponível em: Acesso em: 16 jan. 2022.
- SIMÃO, R. da S. **Produção e caracterização de snacks de manga em forma de filmes, obtidos por cast-tape drying**. 2018. 134 f. Dissertação (Mestre em Engenharia de Alimentos) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.
- SIMÃO, R. da S. *et al.* Production of mango leathers by cast-tape drying: Product characteristics and sensory evaluation. **LWT**, [s. l.], v. 99, p. 445–452, 2019. Disponível em: Acesso em: 4 maio 2022.
- SIMOVIC, A. *et al.* Probing the stability of the food colourant R-phycoerythrin from dried Nori flakes. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 374, p. 131780, 2022. Disponível em: Acesso em: 3 jan. 2022.
- SINURAT, E.; FRANSISKA, D.; LIVIA. The Effect of Addition Glycerol Against Nori Characterization from *Gracilaria* sp and *Ulva* sp Seaweeds. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, [s. l.], v. 715, n. 1, p. 012054, 2021. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/715/1/012054>. Acesso em: 9 mar. 2022.
- SOBRAL, P. J. D. A. Influência da espessura de biofilmes feitos à base de proteínas miofibrilares sobre suas propriedades funcionais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 35, n. 6, p. 1251–1259, 2000. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/pab/a/S3QvWGn8SmsC7hWZs9TGcJw/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 30 mar. 2022.
- SOLIMAN, J. L. *et al.* Effects of temperature and pressure on the vacuum drying characteristics of red seaweed *kappaphycus alvarezii*. **HNICEM 2017 - 9th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management**, [s. l.], v. 2018-January, p. 1–5, 2017. Disponível em: Acesso em: 27 set. 2023.

- SOUSA, M. B. de. **Composição centesimal e variação sazonal do teor de vitaminas em macroalgas marinhas verdes *Ulva fasciata* e *U. lactuca* (Ulvales, Chlorophyta) coletadas na praia do Pacheco, Caucaia - Ceará.** 2011. 97 f. - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011. Disponível em: Acesso em: 4 jan. 2022.
- SRAVANI, K. *et al.* Effect of Different Drying Methods on the Nutritional, Functional, and Bioactive Properties of *Gracilaria edulis* and *Ulva lactuca*. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-22-00113.1>, [s. l.], v. 39, n. 5, p. 940–948, 2023. Disponível em: <https://bioone.org/journals/journal-of-coastal-research/volume-39/issue-5/JCOASTRES-D-22-00113.1/Effect-of-Different-Drying-Methods-on-the-Nutritional-Functional-and/10.2112/JCOASTRES-D-22-00113.1.full>. Acesso em: 13 set. 2023.
- STATSOFT. **STASTISTICA 10.0.** [S. l.: s. n.], [s. d.].
- SUKOTJO, S.; NURANI, D.; JULIANSYAH, M. A. Sensory analysis and physicochemical characteristics of carica [*Vasconcellea pubescens*] fruit leather with seaweed [*Euचेuma cottonii*] addition. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, [s. l.], v. 741, n. 1, p. 012017, 2021. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/741/1/012017>. Acesso em: 9 mar. 2022.
- SULASTRI, E. *et al.* Development and Characterization of Ulvan Polysaccharides-Based Hydrogel Films for Potential Wound Dressing Applications. **Drug Design, Development and Therapy**, [s. l.], v. 15, p. 4213–4226, 2021. Disponível em: <https://www.dovepress.com/development-and-characterization-of-ulvan-polysaccharides-based-hydrog-peer-reviewed-fulltext-article-DDDT>. Acesso em: 9 mar. 2022.
- SURESH KUMAR, K.; GANESAN, K.; SUBBA RAO, P. V. Seasonal variation in nutritional composition of *Kappaphycus alvarezii* (Doty) Doty—an edible seaweed. **Journal of Food Science and Technology**, [s. l.], v. 52, n. 5, p. 2751–2760, 2015.
- SZCZESNIAK, A. S. Texture is a sensory property. **Food Quality and Preference**, [s. l.], v. 13, n. 4, p. 215–225, 2002.
- THUNYAWANICHNONDH, J. *et al.* Potential of Green Seaweed *Ulva rigida* in Thailand for Healthy Snacks. **Journal of Fisheries and Environment**, Bangkok, v. 44, p. 29–39, 2020.
- TIWARI, B. K.; TROY, D. J. **Seaweed Sustainability.** [S. l.]: Elsevier, 2015. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/C2013012836X>.
- TORRES, F. G. *et al.* Natural Polysaccharide Nanomaterials: An Overview of Their Immunological Properties. **International Journal of Molecular Sciences 2019, Vol. 20, Page 5092**, [s. l.], v. 20, n. 20, p. 5092, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1422-0067/20/20/5092/htm>. Acesso em: 11 abr. 2022.
- TORRES, M. D.; CHENLO, F.; MOREIRA, R. Structural features and water sorption isotherms of carrageenans: A prediction model for hybrid carrageenans. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 180, p. 72–80, 2018. Disponível em: Acesso em: 14 nov. 2023.
- TSENG, C. K.; CHANG, C. F. Chinese seaweeds in herbal medicine. **Eleventh International Seaweed Symposium**, [s. l.], p. 152–154, 1984. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-009-6560-7_24. Acesso em: 9 jan. 2022.
- TZIVELEKA, L. A.; IOANNOU, E.; ROUSSIS, V. Ulvan, a bioactive marine sulphated polysaccharide as a key constituent of hybrid biomaterials: A review. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 218, p. 355–370, 2019. Disponível em: Acesso em: 4 mar. 2022.
- UDAYANGANI, C.; WIJESEKARA, I.; WICKRAMASINGHE, I. Characterization of sea lettuce (*Ulva lactuca*) from Matara, Sri Lanka and development of nutribars as a functional food. **Ruhuna Journal of Science**, [s. l.], v. 10, n. 2, p. 96–107, 2019. Disponível em: <https://rjs.sljol.info/article/10.4038/rjs.v10i2.76/>. Acesso em: 10 mar. 2022.

- VEGA-GÁLVEZ, A. *et al.* Drying Kinetic Modeling and Assessment of Mineral Content, Antimicrobial Activity, and Potential α -Glucosidase Activity Inhibition of a Green Seaweed (*Ulva* spp.) Subjected to Different Drying Methods. **ACS Omega**, [s. l.], v. 7, n. 38, p. 34230–34238, 2022. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acsomega.2c03617>. Acesso em: 20 set. 2023.
- VIANA, R. M. *et al.* Nanofibrillated bacterial cellulose and pectin edible films added with fruit purees. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 196, p. 27–32, 2018. Disponível em: Acesso em: 10 mar. 2022.
- WAHLSTRÖM, N. *et al.* Composition and structure of cell wall ulvans recovered from *Ulva* spp. along the Swedish west coast. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 233, p. 115852, 2020. Disponível em: Acesso em: 8 mar. 2022.
- WAHYUNI, S. *et al.* Effect of κ -carrageenan concentration on physical and Mechanical properties of vegetable leather based on kelor leaves (*Moringa oleifera* L.). **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, [s. l.], v. 260, n. 1, 2019.
- WEBBER, V. **Extração e caracterização de carragenana obtida de *Kappaphycus alvarezii***. 2010. 135 f. Dissertação (Mestre em Ciência dos Alimentos) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.
- WENDIN, K.; UNDELAND, I. Seaweed as food – Attitudes and preferences among Swedish consumers. A pilot study. **International Journal of Gastronomy and Food Science**, [s. l.], v. 22, p. 100265, 2020.
- WU, D. *et al.* The influence of deacetylation degree of konjac glucomannan on rheological and gel properties of konjac glucomannan/ κ -carrageenan mixed system. **Food Hydrocolloids**, [s. l.], v. 101, p. 105523, 2020. Disponível em: Acesso em: 31 ago. 2023.
- YAICH, H. *et al.* Chemical composition and functional properties of *Ulva lactuca* seaweed collected in Tunisia. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 128, n. 4, p. 895–901, 2011. Disponível em: Acesso em: 8 mar. 2022.
- YAICH, H. *et al.* Effect of extraction conditions on the yield and purity of ulvan extracted from *Ulva lactuca*. **Food Hydrocolloids**, [s. l.], v. 31, n. 2, p. 375–382, 2013. Disponível em: Acesso em: 8 mar. 2022.
- YAICH, H. *et al.* Effect of extraction procedures on structural, thermal and antioxidant properties of ulvan from *Ulva lactuca* collected in Monastir coast. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 105, p. 1430–1439, 2017. Disponível em: Acesso em: 8 mar. 2022.
- YAICH, H. *et al.* Impact of extraction procedures on the chemical, rheological and textural properties of ulvan from *Ulva lactuca* of Tunisia coast. **Food Hydrocolloids**, [s. l.], v. 40, p. 53–63, 2014. Disponível em: Acesso em: 26 set. 2023.
- YUAN, D. *et al.* Preparation and characterization of chitosan-based edible active films incorporated with *Sargassum pallidum* polysaccharides by ultrasound treatment. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 183, p. 473–480, 2021. Disponível em: Acesso em: 9 mar. 2022.
- ZHANG, B. *et al.* Characterization of seaweed polysaccharide-based bilayer films containing essential oils with antibacterial activity. **LWT**, [s. l.], v. 150, p. 111961, 2021. Disponível em: Acesso em: 9 mar. 2022.
- ZHOU, Y. *et al.* Effect of Temperature on Drying Characteristics of Pullulan-alginate Based Edible Films. **Food Science and Technology Research**, [s. l.], v. 24, n. 1, p. 55–62, 2018. Disponível em: <http://www.jsfst.or.jp>. Acesso em: 4 out. 2023.

ZHU, X. *et al.* Applications of ultrasound to enhance fluidized bed drying of *Ascophyllum Nodosum*: Drying kinetics and product quality assessment. **Ultrasonics Sonochemistry**, [s. l.], v. 70, p. 105298, 2021. Disponível em: Acesso em: 4 out. 2023.