

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

Aplicação das proteínas de tremço branco na formação de emulsões e géis.

Karoline Aparecida da Cruz Arruda
Magister Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

KAROLINE APARECIDA DA CRUZ ARRUDA

Aplicação das proteínas de tremçoço branco na formação de emulsões e géis.

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Luis Antonio Minim

Coorientadores: Marcia C. T. R. Vidigal
Valeria P. R. Minim

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

A779a Arruda, Karoline Aparecida da Cruz, 1998-
2025 Aplicação das proteínas do tremçoço branco (*Lupinus albus*)
na formação de emulsões e géis / Karoline Aparecida da Cruz
Arruda. – Viçosa, MG, 2025.
1 dissertação eletrônica (67 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Luis Antônio Minim.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Tecnologia de Alimentos, 2025.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2026.083>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. *Lupinus albus*. 2. Proteínas de plantas. 3. Emulsões.
I. Minim, Luis Antônio, 1960-. II. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Tecnologia de Alimentos. Programa de
Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos.
III. Título.

CDD 22. ed. 664.8056

KAROLINE APARECIDA DA CRUZ ARRUDA

Aplicação das proteínas de tremço branco na formação de emulsões e géis.

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 14 de novembro de 2025.

Assentimento:

Karoline Aparecida da Cruz Arruda
Autora

Luis Antonio Minim
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pela autora em 16/03/2026 às 19:13:26 e pelo orientador em 19/03/2026 às 15:53:27. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **3MN4.R92Q.MGC1** e clique no botão 'Validar documento'.

“À Deus, meus familiares, professores e amigos, dedico este trabalho”

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, cuja graça e proteção tornaram possível cada passo desta jornada. Aos meus pais, Eden e Lucinha, que são a base de tudo que sou. Sem eles, eu não seria ninguém, e sua dedicação, amor e ensinamentos foram essenciais para minha trajetória. À minha irmã, Eduarda, que, apesar da diferença de idade, é meu alicerce. Seu carinho e apoio são fundamentais em minha vida. Ao meu querido noivo Victor, que é meu porto seguro e o amor da minha vida. Sua presença torna os desafios mais leves e os momentos felizes ainda mais especiais. Aos meus sogros, pelo apoio incondicional e pela torcida constante, que fizeram toda

a diferença ao longo desta caminhada. Aos meus familiares, Maíra, Tio Bastião, Tio Tõe, demais tias e tios, meus afilhados, pelo carinho e pelas palavras de incentivo. Aos meus amigos de uma vida inteira, Fernanda, Rafaela, Laís, Raick, Arthur, Bianca, Gilson e Indiara, pela parceria e

companheirismo de sempre, que tornaram cada etapa mais especial. Aos meus amigos de laboratório pelo suporte diário nos momentos de dificuldade, tornando o ambiente acadêmico mais leve e colaborativo. Ao meu companheiro de trabalho, Ruan Nascimento, sem ele metade

desta pesquisa não teria sido realizada. Sua dedicação e colaboração foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. Aos meus professores do IFMG Campus Barbacena. Ao meu querido orientador, pela paciência, incentivo e ensinamentos que moldaram meu aprendizado e contribuíram significativamente para minha evolução acadêmica e profissional. Às minhas

orientadoras, pela parceria na pesquisa, compartilhamento de conhecimento e apoio constante ao longo desta trajetória. À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realizar a pós-graduação e pelo ambiente acadêmico enriquecedor que proporcionou meu crescimento. Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

RESUMO

ARRUDA, Karoline Aparecida da Cruz, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2025. **Aplicação das proteínas de tremço branco na formação de emulsões e géis.** Orientador: Luis Antonio Minim. Coorientadores: Marcia Cristina Teixeira Ribeiro Vidigal e Valeria Paula Rodrigues Minim.

O estudo investiga o potencial do isolado proteico de tremço branco na construção de sistemas alimentares mais complexos, com foco na formação de emulsões óleo-em-água e sua posterior transição para géis estruturados, etapa relevante no desenvolvimento de produtos análogos, como queijos vegetais. Parte-se do pressuposto de que propriedades estruturais, interfaciais e de organização proteica, associadas ao teor de óleo e ao tipo de processamento, podem modular a estabilidade e as características finais desses sistemas. As proteínas foram extraídas por método salino e empregadas na formulação de emulsões submetidas à mistura de alta velocidade ou à homogeneização de alta pressão, seguidas de tratamento térmico. As emulsões foram caracterizadas quanto ao tamanho de gota, índice de polidispersão, potencial zeta, comportamento reológico e estabilidade cinética (TSI e migração). Os géis, preparados com e sem adição prévia de emulsão, foram avaliados quanto à umidade, atividade de água, perfil de textura e capacidade de fusão, permitindo correlacionar composição, microestrutura e propriedades físico-químicas. Os resultados indicam que a interação entre tamanho de gota, carga superficial e viscosidade do meio contínuo influencia diretamente a estabilidade interfacial. As formulações com 25% de óleo (MAV 25 e MH 25) apresentaram maiores valores de TSI e maior migração, sugerindo maior suscetibilidade à separação de fases, possivelmente associada a gotas maiores e menor repulsão eletrostática. Em contraste, a emulsão MH 50 apresentou menor TSI e ausência de migração, indicando maior restrição ao movimento das gotículas, provavelmente decorrente da combinação entre maior teor de óleo e homogeneização de alta pressão. Nos géis, diferenças nos teores de umidade e atividade de água entre as amostras comerciais (queijo tradicional e vegano) e os géis experimentais (F1 e F2) sugerem distintos níveis de retenção hídrica e compactação estrutural, influenciados pela presença de emulsificação prévia e pelas proporções de óleo. De modo geral, os dados demonstram que o comportamento interfacial inicial das emulsões impacta a organização estrutural subsequente dos géis, afetando a distribuição lipídica, a rede proteica e a disponibilidade de água. Assim, o estudo evidencia que composição e processamento são ferramentas estratégicas para modular estabilidade, microestrutura e propriedades funcionais, oferecendo base

científica para o desenvolvimento de produtos vegetais com características estruturais e tecnológicas mais próximas às versões tradicionais.

Palavras-chave: lupinus albus; proteína vegetal; géis alimentares; emulsões; estabilidade; inovação tecnológica.

ABSTRACT

ARRUDA, Karoline Aparecida da Cruz, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, November, 2025. **Textural and melting characteristics of gels containing proteins from white lupin (*Lupinus albus*)**. Adviser: Luis Antonio Minim. Co-advisers: Marcia Cristina Teixeira Ribeiro Vidigal and Valeria Paula Rodrigues Minim.

The study investigates the potential of white lupin protein isolate in the construction of more complex food systems, focusing on the formation of oil-in-water emulsions and their subsequent transition into structured gels, a relevant step in the development of analog products such as plant-based cheeses. It is based on the assumption that structural, interfacial, and protein organizational properties, associated with oil content and processing type, can modulate the stability and final characteristics of these systems. The proteins were extracted using a saline method and employed in the formulation of emulsions subjected to high-speed mixing or high-pressure homogenization, followed by thermal treatment. The emulsions were characterized in terms of droplet size, polydispersity index, zeta potential, rheological behavior, and kinetic stability (TSI and migration). The gels, prepared with and without prior emulsion addition, were evaluated for moisture content, water activity, texture profile analysis, and melting capacity, allowing the correlation between composition, microstructure, and physicochemical properties. The results indicate that the interaction between droplet size, surface charge, and the viscosity of the continuous phase directly influences interfacial stability. The formulations containing 25% oil (MAV 25 and MH 25) showed higher TSI values and greater migration, suggesting increased susceptibility to phase separation, possibly associated with larger droplets and lower electrostatic repulsion. In contrast, the MH 50 emulsion exhibited lower TSI and no migration, indicating greater restriction to droplet movement, likely resulting from the combination of higher oil content and high-pressure homogenization. In the gels, differences in moisture content and water activity among commercial samples (traditional cheese and plant-based cheese) and experimental gels (F1 and F2) suggest distinct levels of water retention and structural compactness, influenced by prior emulsification and oil proportions. Overall, the data demonstrate that the initial interfacial behavior of emulsions impacts the subsequent structural organization of gels, affecting lipid distribution, protein network formation, and water availability. Thus, the study highlights that composition and processing are strategic tools to modulate stability, microstructure, and functional properties, providing a scientific basis for the development of plant-based products with structural and technological characteristics

closer to their traditional counterparts.

Keywords: lupinus albus; plant protein; food gels; emulsions; stability; technological; innovation.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	10
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	12
2. REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1 Leguminosas	13
2.2 Tremoço branco (<i>Lupinus albus</i>)	13
2.3 Proteínas do Tremoço branco.....	15
2.4 Emulsões alimentícias	16
2.5 Formação de Géis proteicos	18
2.6 Sistemas Emulsionados e Gelificados aplicados na Indústria de Alimentos	20
3. CONCLUSÃO	23
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	24
CAPÍTULO 1	31
1. INTRODUÇÃO	33
2. MATERIAL E MÉTODOS	34
2.1 Preparação de farinha de Tremoço branco e do Isolado de Proteína (IP)	34
2.2 Preparo e Caracterização das Formulações de Emulsão.....	35
2.3 Potencial zeta, Tamanho de gota e Índice de Polidispersão	36
2.4 Comportamento reológico de emulsões	37
2.5 Estabilidade cinética de emulsões	37
2.6 Análise estatística.....	38
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
3.1 Comportamento reológico das formulações	40
3.2 Potencial zeta, Tamanho de gota e Índice de Polidispersão	41
3.3 Estabilidade cinética de emulsões	45
4. CONCLUSÃO	47
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
CAPÍTULO 2	52
1. INTRODUÇÃO	54
2. MATERIAL E MÉTODOS	54
2.1 Preparação de farinha de Tremoço branco desengordurada e obtenção do isolado proteico	54
2.2 Formulações e caracterização de géis de IPTB	55
2.3 Análise de Umidade (%) e Atividade de água (Aw)	56
2.4 Análise de Textura (TPA).....	57
2.5 Observação visual das propriedades de fusão.....	57
2.6 Análise estatística.....	57
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
3.1 Análise de Umidade (%) e Atividade de água (Aw)	58
3.2 Análise de Textura (TPA).....	59
3.3 Propriedades de fusão – derretimento de géis	62
4. CONCLUSÃO	63
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
CONSIDERAÇÕES FINAIS	67

1. INTRODUÇÃO GERAL

A busca por alternativas sustentáveis às proteínas de origem animal tem impulsionado um crescimento significativo no interesse por fontes proteicas vegetais, especialmente aquelas derivadas de leguminosas. Esse movimento é influenciado por fatores como sustentabilidade, inovação tecnológica e comportamento do consumidor (HE, EVANS, LIU, & SHAO, 2020). Entre as proteínas de origem vegetal, destacam-se as leguminosas, sendo excelentes fontes de proteínas, carboidratos, fibras alimentares e uma variedade de micronutrientes e fitoquímicos (KAYA et al., 2018). O tremoço é uma leguminosa originária das herbáceas, de climas temperados e subtropicais, pertencente à família das Fabaceae e ao gênero *Lupinus sp.* Possui significativos percentuais de proteínas, e devido a isso tem despertado o interesse para a sua inclusão na alimentação humana, porém, é necessário entender o comportamento dessa macromolécula quanto aos seus aspectos tecno-funcionais (DEOL; BAINS, 2010; DEORUKHKAR; ANANTHANARAYAN, 2021).

A funcionalidade das proteínas é fator essencial para sua aplicação em sistemas alimentícios, uma vez que suas propriedades intrínsecas determinam o comportamento desses biopolímeros em matrizes complexas. Aspectos como solubilidade, capacidade emulsificante, atividade interfacial e aptidão para formar géis estruturados influenciam diretamente a estabilidade, a textura e a organização supramolecular dos sistemas nos quais estão inseridas, que geralmente envolvem interações simultâneas com lipídios, carboidratos e outros macromoléculas. (MEIJERS et al., 2023).

Apesar do crescente interesse no estudo das proteínas do tremoço como ingredientes funcionais nas formulações alimentares, ainda existe uma lacuna significativa no conhecimento sobre a sua interação com outros componentes na formação desses sistemas coloidais, o que limita a otimização das aplicações dessas proteínas em sistemas alimentícios. Dessa forma, torna-se evidente a necessidade de aprofundar sobre o comportamento das proteínas do tremoço branco na formação e estabilização de emulsões e géis. Além disso, tais conhecimentos contribuem não apenas para o avanço científico sobre biopolímeros vegetais, mas também para a diversificação de fontes proteicas sustentáveis (CHUKWUEJIM, KADAM & ALUKO, 2025).

Assim, esta pesquisa pode corroborar na compreensão sobre as propriedades funcionais das proteínas de *Lupinus albus* e de avaliar sua atuação em dois dos sistemas, emulsões e géis. Com esse propósito, o trabalho tem como objetivo investigar o potencial das proteínas do tremoço branco na formação de estruturas emulsificadas e gelificadas, analisando os fatores que

influenciam seu comportamento funcional e os mecanismos envolvidos na estabilização desses sistemas. Além disso, pretende-se compreender como variáveis físico-químicas interferem a característica funcional da proteína, relacionando sua estrutura às propriedades tecnológicas observadas.

REFERÊNCIAS

DEOL, J. K.; BAINS, K. Effect of household cooking methods on nutritional and anti nutritional factors in green cowpea (*Vigna unguiculata*) pods. **Journal of Food Science and Technology**, v. 47, n. 5, p. 5793581, 1 out. 2010.

DEORUKHKAR, A.; ANANTHANARAYAN, L. Effect of thermal processing methods on flavonoid and isoflavone content of decorticated and whole pulses. **Journal of Food Science and Technology**, v. 58, n. 2, p. 4653473, 1 fev. 2021.

J. HE, N.M. EVANS, H. LIU, S. SHAO. A review of research on plant-based meat alternatives: Driving forces, history, manufacturing, and consumer attitudes. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, 19 (2020), pp. 2639-2656.

KAYA, E.; YILMAZ TUNCEL, N.; TUNCEL, N. B. Utilization of lentil, pea, and faba bean hulls in Turkish noodle production. **Journal of Food Science and Technology**, v. 55, n. 5, p. 173431745, 1 maio 2018.

M.G.J. MEIJERS, M.B.J. MEINDERS, J.-P. VINCKEN, P.A. WIERENGA. Effect of pea Legumin-to-Vicilin ratio on the protein emulsifying properties: Explanation in terms of protein molecular and interfacial properties. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 71 (29) (2023), pp. 11228-11238.

STANLEY CHUKWUEJIM, DEEPAK KADAM, ROTIMI E. ALUKO, Structural, physicochemical, and functional properties of white and blue lupin vicilin and legumin fractions, **Food Chemistry**, Vol. 31, 2025,103078.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Leguminosas

As leguminosas, integrantes da família Fabaceae, constituem um dos grupos botânicos de maior expressão em termos de diversidade, adaptabilidade e relevância agrônômica, com aproximadamente 23 mil espécies descritas. Esse conjunto abrange desde leguminosas secas, como grão-de-bico, tremoço e feijão, até espécies consumidas na forma fresca, como ervilhas e favas, incluindo ainda leguminosas oleaginosas de grande relevância econômica, como a soja. Tal amplitude evidencia a versatilidade funcional do grupo, bem como sua capacidade de adaptação a distintos ecossistemas, o que explica sua ampla distribuição geográfica e a presença marcante na base alimentar de diversas populações ao redor do mundo. Além disso, sua importância transcende o aspecto nutricional, dada a contribuição das leguminosas para práticas agrícolas sustentáveis, especialmente pela capacidade de fixação biológica de nitrogênio, que reduz a dependência de fertilizantes sintéticos e melhora a fertilidade do solo (ONWEZEN et al., 2021).

Do ponto de vista nutricional, as leguminosas se destacam por apresentar uma composição caracterizada por teores elevados de proteínas, fibras alimentares e carboidratos complexos, além de vitaminas do complexo B e minerais essenciais, como ferro, zinco, cobre, fósforo, magnésio e manganês, mantendo, simultaneamente, baixos níveis de lipídios. Essa combinação de nutrientes confere a esse grupo alimentar um papel central em dietas equilibradas, sendo amplamente recomendado para a promoção da saúde e a prevenção de doenças crônicas não transmissíveis. Sua densidade nutricional, associada ao baixo custo de produção e à elevada capacidade de adaptação a diferentes condições climáticas e de cultivo, reforça sua importância estratégica para a segurança alimentar e para o desenvolvimento de sistemas alimentares sustentáveis. Por esses motivos, as leguminosas têm recebido crescente atenção tanto em pesquisas científicas quanto em aplicações industriais, consolidando-se como ingredientes versáteis para formulações destinadas a atender demandas nutricionais, tecnológicas e ambientais contemporâneas (BESSADA et al., 2019; WEN et al., 2022).

2.2 Tremoço branco (*Lupinus albus*)

As espécies do gênero *Lupinus* apresentam estratégias reprodutivas variadas, refletindo sua ampla diversidade genética e adaptabilidade ecológica. O *Lupinus albus*, conhecido como

tremoço branco, caracteriza-se predominantemente pela autopolinização, embora um percentual menor de polinização cruzada possa ocorrer, especialmente em condições ambientais favoráveis à atividade de insetos polinizadores. Essa flexibilidade reprodutiva contribui para a manutenção de variabilidade genética e favorece a expansão da cultura em diferentes regiões geográficas. Nos últimos anos, o cultivo global das espécies de tremoço alcançou cerca de 10 milhões de hectares, resultando em uma produção aproximada de 1,65 milhão de toneladas (FAOSTAT, 2024), evidenciando sua crescente importância agrícola e econômica.

Do ponto de vista morfológico, o tremoço apresenta características bem definidas. Suas folhas são compostas por sete folíolos, geralmente de tamanho semelhante ao pecíolo, com coloração verde intensa e formato alongado. A espécie também se destaca pela diversidade de cores de suas flores, que variam conforme o tipo de tremoço e as condições ambientais, contribuindo para sua adaptação e potencial ornamental. Os frutos são do tipo vagem e abrigam no interior as sementes, que constituem a parte de maior interesse agrícola, nutricional e industrial (CREMONEZ et al., 2013; OLIVEIRA, 2013). Dentro do gênero *Lupinus*, destacam-se espécies de relevância econômica como *Lupinus albus* (tremoço branco), *Lupinus angustifolius* (tremoço azul), *L. luteus* (tremoço amarelo) e *L. mutabilis* (tremoço andino), todas pertencentes à família Fabaceae (MIRZA et al., 2023).

No que diz respeito à composição nutricional, o tremoço apresenta teores expressivos de fibras (25–30%) e proteínas (40–45%), além de outros compostos bioativos de interesse para a saúde humana (AHMED, 2014; CHAMONE et al., 2023). Tanto os genótipos classificados como doces quanto os amargos são reconhecidos pelo conjunto de propriedades bioativas que exibem, incluindo atividades antioxidantes, antibacterianas e potencial anticancerígeno (GHARIBZAHEDI et al., 2024). Essas propriedades estão principalmente relacionadas à presença de fitoquímicos, como flavonoides, alcaloides e diversos compostos fenólicos, amplamente estudados por seu papel na modulação do estresse oxidativo (TIAN et al., 2024). A capacidade antioxidante do tremoço, por exemplo, é fundamental para a neutralização de radicais livres e a consequente redução do risco de danos celulares e desenvolvimento de doenças crônicas (KAMRAN et al., 2023). Portanto, o perfil nutricional aliado ao conteúdo de compostos bioativos reforça o potencial dessa leguminosa como ingrediente funcional promissor para a indústria de alimentos e para aplicações na área de saúde.

Entretanto, o uso do tremoço, especialmente na forma de farinha, apresenta alguns desafios importantes. Um dos principais fatores limitantes é o sabor amargo característico, associado principalmente ao elevado teor de alcaloides totais, além de outros compostos antinutricionais como fitatos e taninos (SINGH et al., 2023). Esses componentes podem

prejudicar a aceitação sensorial do produto e interferir na biodisponibilidade de minerais essenciais. Ainda assim, estudos demonstram que etapas específicas do processamento, como a imersão das sementes em solução aquosa, desempenham papel crucial na redução desses compostos, modificando favoravelmente o perfil sensorial e nutricional do produto. O processo de remolho, por exemplo, contribui significativamente para a diminuição do teor de ácido fítico, aumentando a qualidade e ampliando o potencial de aplicação do tremoço em formulações alimentícias diversas (SMERIGLIO et al., 2017).

2.3 Proteínas do Tremoço branco

A semente é a parte mais consumida do tremoço e se destaca pelo elevado teor de nutrientes, especialmente proteínas (KOHAIJDOVÁ, KAROVIČOVÁ & SCHMIDT, 2011). Em comparação com outras leguminosas tradicionalmente presentes na dieta humana, o tremoço contém cerca do dobro de proteína, o que reforça seu valor nutricional. A maior parte desse conteúdo proteico é composta por globulinas, que representam 80–90% das proteínas de reserva (RODRÍGUEZ-AMBRIZ et al., 2005) e incluem as frações 7S e 11S, típicas das leguminosas (DURANTI, HORSTMANN & CROY, 1995). O tremoço, porém, apresenta particularidades estruturais, como padrões incomuns de glicosilação na globulina 11S. Além dessas proteínas, as sementes contêm γ -conglutina e δ -conglutina, ambas ricas em aminoácidos sulfurados e de interesse funcional e nutricional. Devido a essa composição diversa, o tremoço é considerado uma fonte proteica de alta qualidade, com valor biológico comparável ao da proteína do ovo (SCARAFONI et al., 2001).

O perfil de aminoácidos das sementes é equilibrado e apresenta níveis elevados de lisina, frequentemente limitada em cereais, o que favorece a complementaridade entre esses alimentos. Embora apresente menor teor de aminoácidos sulfurados, como metionina e cisteína, o tremoço se destaca pelo alto conteúdo de arginina, superior ao observado na soja, ampliando seu potencial em dietas que buscam diversidade proteica (RIVERA-JIMÉNEZ et al., 2022).

Outro aspecto relevante é a elevada quantidade de fibra alimentar, que pode corresponder a cerca de 40% do peso do grão, valor superior ao de grande parte das leguminosas. No tremoço branco (*Lupinus albus* L.), a casca após a eliminação do amargor chega a apresentar aproximadamente 89% de fibra insolúvel, predominantemente celulose. Quanto aos lipídios, predominam os ácidos graxos oleico (C18:1) e linoleico (C18:2), presentes em concentrações variando entre 5,7% e 12,1% (CZUBINSKI, GRYGIER & SIGER, 2021). A proporção favorável entre ácidos graxos poli-insaturados e saturados reforça o valor nutricional

do tremoço, já que os poli-insaturados contribuem para a redução do colesterol LDL e dos níveis séricos totais, enquanto os saturados tendem a elevá-los (CHEN & LIU, 2020; CHUKWUEJIM, UTIOH, CHOI & ALUKO, 2024). Assim, o tremoço destaca-se como fonte de proteínas, fibras e lipídios associados à saúde cardiovascular.

O uso das proteínas do tremoço na indústria de alimentos tem crescido, com aplicações em produtos como linguiças, pães, massas e alimentos extrusados, nos quais contribuem para melhorias de textura, estrutura e, em alguns casos, cor (ADEM et al., 2019; KAROUI et al., 2023; VILLACRÉS et al., 2020). Sua capacidade emulsificante também favorece o desenvolvimento de emulsões sem ovos, como maioneses e molhos para saladas, expandindo seu uso em formulações voltadas a consumidores com necessidades ou preferências específicas (CABRITA et al., 2023).

Apesar dessas vantagens, ainda há carência de estudos aprofundados sobre as propriedades funcionais das proteínas do tremoço, especialmente quando comparadas ao isolado proteico de soja. Este é constituído majoritariamente por β -conglucina (7S) e glicina (11S), reconhecidas por sua boa solubilidade, capacidade emulsificante, formação de filmes e propriedades de gelificação (XU et al., 2023; ZHAO et al., 2023).

A funcionalidade das proteínas, incluindo sua interação com outros componentes alimentares, depende diretamente de sua estrutura. Regiões hidrofóbicas, por exemplo, tendem a interagir com lipídios e compostos lipossolúveis, influenciando a capacidade da proteína em estabilizar sistemas alimentares complexos (VAN DE VONDEL et al., 2023). Além disso, fatores como pH, temperatura e força iônica podem modificar sua estrutura tridimensional, afetando propriedades biológicas, físico-químicas e tecnológicas, o que interfere diretamente nos sistemas coloidais como as emulsões alimentícias e géis elaborados com proteínas vegetais (NWACHUKWU & ALUKO, 2018).

2.4 Emulsões Alimentícias

A demanda por emulsificantes de origem vegetal com perfil mais sustentável tem se intensificado nos últimos anos, impulsionada tanto pela necessidade de reduzir o uso de aditivos sintéticos quanto pela crescente preferência do consumidor por produtos considerados mais naturais, nutricionalmente equilibrados e ambientalmente responsáveis. Esse movimento é reforçado pelo avanço das formulações plant-based e pela busca da indústria alimentícia por ingredientes que conciliem funcionalidade tecnológica e apelo sustentável. Nesse contexto, as sementes do tremoço, pertencentes ao gênero *Lupinus*, têm se destacado como uma fonte

proteica promissora, sobretudo em razão de suas propriedades nutricionais e funcionais, que as diferenciam de outras leguminosas tradicionalmente utilizadas (CHUKWEJIM, UTIOH, CHOI & ALUKO, 2024).

Entre as espécies disponíveis, o tremoço azul (*Lupinus angustifolius*) e o tremoço branco (*Lupinus albus*) são as mais investigadas devido ao seu elevado teor proteico, ao perfil de aminoácidos relativamente balanceado e às características funcionais favoráveis à formação e estabilização de sistemas dispersos. Essas proteínas reúnem atributos estratégicos para aplicação como emulsificantes, incluindo sua origem vegetal, fator de crescente relevância devido à adequada solubilidade e boa capacidade de interação interfacial, além de apresentarem menor associação com alergenicidade quando comparadas a outras fontes proteicas de uso consolidado, como soja. Tais particularidades justificam o crescente interesse em aprofundar a caracterização das proteínas do tremoço e seu potencial como ingredientes funcionais para aplicações industriais (CABRITA et al., 2023; VOGELSANG-O'DWYER et al., 2020).

As proteínas alimentares desempenham funções tecnológicas determinantes, dentre as quais se destacam a emulsificação e a gelificação. No processo de emulsificação, a atuação proteica é essencial para a redução da tensão interfacial entre as fases aquosa e lipídica, o que favorece a formação de gotículas finas e estáveis dispersas no meio contínuo (FRANCISCO, SANTOS & CUNHA, 2023; MEKALA, SILVA & SALDAÑA, 2022).

Esse efeito é atribuído à capacidade das proteínas de se adsorverem rapidamente à interface óleo-água, formando uma camada estabilizadora que dificulta a coalescência. Adicionalmente, a formação de uma membrana viscoelástica em torno das gotículas contribui para aumentar a resistência do sistema a processos de agregação e coalescência, garantindo maior estabilidade físico-química à emulsão. Assim, a eficiência emulsificante de uma proteína está diretamente relacionada à sua conformação, ao comportamento interfacial e às alterações estruturais desencadeadas pelas condições ambientais e de processamento (GRASBERGER, HAMMERSHOJ & CORREDIG, 2023).

As proteínas de tremoço foram analisadas quanto ao seu comportamento tecnofuncional em sistemas emulsificados, o que permite compreender como suas características estruturais se refletem como agentes emulsificantes. Os isolados proteicos de tremoço apresentam resposta dependente do pH e da concentração proteica, com melhoria significativa das propriedades emulsificantes em condições próximas à neutralidade. A relação direta entre a organização estrutural das proteínas e a formação de gotículas de óleo mais estáveis evidencia que as proteínas de tremoço possuem elevada capacidade de adsorção interfacial e estabilização de emulsões (CHUKWUEJIM & ALUKO, 2024).

Além da capacidade emulsificante, pode ser destacado a formação de espuma, a qual relaciona-se à capacidade de um ingrediente criar bolhas de ar, o que influencia diretamente nas propriedades de textura de determinado produto. Foi verificado que a estabilidade da formação de espuma de várias leguminosas, incluindo o tremoço branco, que demonstrou estabilidade da formação de espuma semelhante às dos grão-de-bico, apesar a leguminosa fava ter apresentado maior estabilidade (LO, KASAPIS & FAHNAKY, 2021)

Embora diversos trabalhos tenham investigado as propriedades estruturais e funcionais de proteínas extraídas de sementes de leguminosas e oleaginosas de baixo custo como canola, ervilha, fava e linhaça, ainda existe uma lacuna significativa no entendimento dos mecanismos que regulam o desempenho das proteínas do tremoço em sistemas emulsificados. Em especial, a influência das variações de pH sobre sua estrutura molecular e sobre o comportamento interfacial permanece pouco explorada, apesar de ser um fator determinante para a estabilidade e eficiência emulsificante em formulações alimentícias. A escassez de informações sistematizadas nesse campo evidencia a necessidade de estudos que aprofundem a compreensão das relações entre estrutura, condições ambientais e funcionalidade tecnológica das proteínas do tremoço, permitindo sua melhor inserção como ingrediente funcional na indústria de alimentos (KRAUSE et al., 2023).

2.5 Formação de Géis Proteicos

A formação de géis em sistemas alimentícios corresponde a estruturas coloidais viscoelásticas as quais são organizadas por uma rede tridimensional composta por biopolímeros, principalmente proteínas e polissacarídeos, além de gotículas de óleo encapsuladas na matriz contínua. Esses sistemas gelificados têm recebido crescente atenção na ciência de alimentos em virtude de suas propriedades tecnológicas e funcionais, sobretudo pela capacidade de modular textura, firmeza, retenção de água e comportamento reológico, aspectos diretamente associados à estrutura final de diversos produtos alimentícios. Além disso, géis proteicos e géis derivados de emulsões têm se destacado para a proteção e liberação controlada de compostos bioativos, favorecendo aplicações em alimentos funcionais e nutracêuticos (LI ET AL., 2021; LIN ET AL., 2020). Assim, compreender os mecanismos estruturais envolvidos na gelificação é fundamental para o desenvolvimento de novos ingredientes e sistemas capazes de atender demandas industriais por alimentos mais estáveis, seguros e tecnologicamente ajustáveis (KRAUSE et al., 2023).

Durante a etapa de aquecimento, ocorre a desnaturação parcial ou completa das proteínas presentes na fase contínua da emulsão, processo que expõe grupos hidrofóbicos e regiões reativas da cadeia polipeptídica. Essa exposição favorece o estabelecimento de novas interações intermoleculares, como ligações hidrofóbicas, forças eletrostáticas, ligações de hidrogênio e, em alguns casos, pontes dissulfeto. Como consequência, uma rede proteica contínua é formada, responsável pela transição de um sistema líquido para uma estrutura semissólida ou sólida caracterizada como gel. Simultaneamente, as gotículas de óleo previamente dispersas tornam-se aprisionadas nessa matriz tridimensional, resultando em emulsões gelificadas cuja estabilidade é maior do que a apresentada por emulsões convencionais (ZHI et al., 2023). Esse aprisionamento físico contribui para melhorar a resistência ao escoamento, reduzir a migração de fase e conferir propriedades mecânicas mais robustas ao sistema.

A eficiência da formação do gel está diretamente relacionada ao tamanho, à distribuição e à estabilidade das gotículas da emulsão antes do processo de gelificação. Emulsões com gotículas menores tendem a formar géis mais homogêneos e estáveis, dado que maior área interfacial facilita a interação entre a fase lipídica e a rede proteica. Por outro lado, fatores como o tipo de óleo utilizado, o perfil de ácidos graxos, a viscosidade da fase contínua e a composição proteica exercem influência determinante sobre o comportamento interfacial e sobre a estabilidade da emulsão ao longo da gelificação. Proteínas com maior solubilidade, boa capacidade emulsificante e alta afinidade por interfaces são particularmente importantes, pois contribuem para a formação de filmes interfaciais estáveis e para a organização da rede estrutural que sustenta o gel (ZHANG et al., 2021).

Considerando que o consumo excessivo de gorduras de origem animal está associado ao aumento do risco de doenças crônicas, incluindo hipertensão, dislipidemias e doenças cardiovasculares, a substituição parcial ou total dessas gorduras por óleos vegetais tem se tornado uma alternativa nutricionalmente mais adequada e tecnologicamente viável. Óleos vegetais, como os de amendoim, milho, soja e girassol, destacam-se por sua elevada proporção de ácidos graxos poli-insaturados, pelo alto valor nutricional e pela ausência de colesterol, aspectos que os tornam opções preferenciais para a elaboração de emulsões e géis utilizados como sistemas carreadores ou estruturantes. Além disso, esses óleos apresentam propriedades físico-químicas favoráveis à interação com proteínas, o que facilita a formação de emulsões estáveis e, posteriormente, de géis com características mecânicas adequadas às necessidades tecnológicas da indústria alimentícia (LEE et al., 2023; XU et al., 2020).

2.6 Sistemas Emulsionados e Gelificados aplicados na Indústria de Alimentos

Os sistemas gelificados e emulsionados vêm sendo considerados estruturas de grande interesse na área de tecnologia de alimentos, especialmente quando se busca compreender como diferentes combinações entre fase oleosa e matriz hidratada podem influenciar textura, estabilidade e sensorial (GUO, CUI & MENG, 2023). Esses sistemas poderiam funcionar como alternativas promissoras tanto para produtos de alto valor agregado quanto para propostas voltadas à reformulação nutricional (DOMINGUÉZ et al., 2021; WANG & SELOMULYA, 2022). Assim, estudos nessa área poderiam fornecer uma base ampla para discutir caminhos inovadores de processamento de alimentos.

De acordo com Dickinson (2012), quando se considera especificamente os géis e emulsões, a presença de gotas de óleo aprisionadas em uma rede gelificada poderia oferecer vantagens relacionadas à estabilidade física, ao controle de água, à modulação do comportamento reológico e até à forma como o produto é percebido pelo consumidor. Dependendo da formulação, da natureza da proteína ou do polissacarídeo e das condições de processamento, esses sistemas poderiam apresentar grande versatilidade, abrindo espaço para aplicações que vão desde produtos lácteos análogos até matrizes destinadas à impressão 3D de alimentos.

Além das possibilidades tecnológicas, esse tipo de sistema também poderia ser explorado como veículo de entrega de compostos bioativos (TAN & MCCLEMENTES, 2021). A estrutura combinada entre gel e emulsão tenderia, em alguns contextos, a favorecer encapsulação, proteção e liberação controlada de moléculas sensíveis, como antioxidantes, vitaminas ou agentes biofuncionais (ZHAO et al., 2023). Certas pesquisas já sugerem que matrizes híbridas proteína-polissacarídeo poderiam apresentar eficiência superior de carregamento, embora essa tendência varie conforme o tipo de ingrediente. Dessa forma, os géis de emulsão poderiam servir não apenas como substitutos estruturais de gordura, mas como plataformas multifuncionais capazes de dialogar com demandas contemporâneas de alimentos funcionais (MAO et al., 2020).

No entanto, grande parte das abordagens tradicionais ainda depende de ingredientes de origem animal, sobretudo proteínas lácteas e cárneas, que parecem oferecer maior solubilidade, estabilidade interfacial e capacidade de formar redes estruturadas. A crescente busca por alternativas vegetais, no entanto, coloca em debate desafios como solubilidade reduzida, menor capacidade emulsificante e dificuldade de formação de géis firmes, especialmente no caso de proteínas como a de ervilha. Pesquisas recentes vêm indicando que, dependendo do método de

processamento, da combinação de ingredientes e do ajuste fino das condições físico-químicas, essas limitações poderiam ser parcialmente contornadas, incentivando a expansão dos géis de emulsão plant-based (LU et al., 2019; POORE et al., 2018; NIKBAKHT, SEDAGHAT & MEZZENGA, 2021).

Considerando o conjunto de informações apresentadas sobre composição, estrutura e comportamento interfacial das proteínas do tremço branco, observa-se que essas características se refletem diretamente em diferentes propriedades tecnofuncionais de interesse tecnológico. Aspectos como a predominância de globulinas, a presença de regiões hidrofóbicas, a capacidade de adsorção em interfaces e a resposta às condições de processamento conferem a essas proteínas versatilidade para aplicação em sistemas emulsificados, gelificados e aerados. Assim, com o objetivo de organizar e sintetizar as principais funcionalidades descritas na literatura, a Tabela 1 reúne as propriedades tecnofuncionais das proteínas de *Lupinus albus* e suas respectivas aplicações na indústria de alimentos, facilitando a visualização das relações entre estrutura, função e uso tecnológico.

Tabela 1. Principais aplicações das proteínas de tremço branco (*Lupinus albus*) nas propriedades tecnofuncionais.

Tecno-funcionalidade	Base estrutural	Função tecnológica no sistema alimentar	Principais aplicações em alimentos	Referências
Emulsificação	Predominância de globulinas 7S e 11S, presença de regiões hidrofóbicas e boa capacidade de adsorção à interface óleo-água	Redução da tensão interfacial, formação de gotículas finas e estabilização de emulsões O/A	Maioneses e molhos sem ovo, emulsões plant-based, sistemas carreadores de lipídios	Cabrita et al. (2023); Chukwuejim & Aluko (2024); Grasberger et al. (2023)
Estabilidade de emulsões	Formação de filmes interfaciais viscoelásticos e potencial zeta negativo dependente do pH	Prevenção de coalescência, floculação e separação de fases	Molhos para saladas, cremes vegetais, produtos refrigerados ou submetidos a aquecimento moderado	Francisco et al. (2023); Mekala et al. (2022)
Formação de géis proteicos	Desnaturação térmica com exposição de grupos	Formação de rede tridimensional contínua,	Análogos cárneos, produtos estruturados, bases para	Zhi et al. (2023); Krause et al. (2023)

	hidrofóbicos e reativos; interações hidrofóbicas, eletrostáticas e ligações dissulfeto	aprisionamento de água e óleo	alimentos plant-based	
Emulsões gelificadas	Interação entre rede proteica e gotículas de óleo previamente estabilizadas	Aumento da firmeza, estabilidade mecânica e resistência à migração de fases	Substitutos de gordura, recheios, produtos com textura modulada	Zhang et al. (2021); Dickinson (2012)
Formação e estabilidade de espuma	Capacidade de adsorção na interface ar-água e formação de filmes proteicos	Incorporação e retenção de ar, modulação de textura	Produtos aerados, massas e sistemas espumados	Lo et al. (2021)
Modulação reológica e textura	Interação proteína-água-óleo e aumento da viscosidade da fase contínua	Controle de viscosidade, pseudoplasticidade e sensação na boca	Molhos, cremes vegetais, produtos extrusados	Adem et al. (2019); Karoui et al. (2023)
Encapsulação e liberação controlada	Estruturas híbridas emulsão-gel e afinidade interfacial das proteínas	Proteção de compostos bioativos e liberação gradual	Alimentos funcionais, nutracêuticos, sistemas de entrega de antioxidantes e vitaminas	Tan & McClements (2021); Zhao et al. (2023)
Substituição de ingredientes de origem animal	Origem vegetal, perfil nutricional favorável e menor associação com alergenicidade	Alternativa sustentável a proteínas lácteas, carnes e ao ovo	Produtos plant-based, reformulação nutricional	Vogelsang-O'Dwyer et al. (2020); Chukwuejim et al. (2024)

Diante desse cenário, o estudo de sistemas gelificados e emulsionados aplicados à indústria de alimentos abre espaço para discussões envolvendo desde princípios fundamentais, como interações moleculares e comportamento reológico, até questões ligadas a sustentabilidade, reformulação nutricional e inovação sensorial. O aprofundamento sobre composição, proporção de fases, natureza dos estabilizantes, técnicas de encapsulação e métodos de processamento poderia permitir avanços significativos no desenvolvimento de produtos mais estáveis, versáteis e alinhados às expectativas do mercado atual. Assim, o tema

surge como um campo dinâmico, onde múltiplas variáveis poderiam se combinar para gerar alimentos com propriedades funcionais e estruturais.

3. CONCLUSÃO

Diante do que foi apresentado, torna-se evidente a relevância das leguminosas, em especial do gênero *Lupinus*, como recursos nutricionais, tecnológicos e ambientais de grande potencial para a indústria de alimentos. Dentro desse grupo, o tremoço branco (*Lupinus albus*) destaca-se por reunir características agrônômicas favoráveis, elevada adaptabilidade e composição química marcada por um teor significativo de proteínas, fibras e compostos bioativos. Ao mesmo tempo, apresenta desafios inerentes, como a presença de alcaloides e outros fatores antinutricionais, cuja redução por meio do processamento adequado amplia significativamente suas possibilidades de utilização.

Quanto aos aspectos proteicos, a composição do tremoço revela uma matriz funcional, composta majoritariamente por globulinas das frações 7S e 11S, além das proteínas γ - e δ -conglutina, que conferem características diferenciadas em termos de estrutura, estabilidade e reatividade. Esses aspectos evidenciam que as proteínas do tremoço não apenas se comparam favoravelmente a outras fontes vegetais consolidadas, como a soja, mas também apresentam particularidades estruturais que podem resultar em comportamentos interfaciais e reológicos distintos.

Devido a isso, o estudo sobre emulsões alimentícias demonstra que a busca por emulsificantes vegetais sustentáveis e tecnicamente eficientes tem impulsionado o interesse em proteínas de leguminosas menos convencionais, incluindo o tremoço. A capacidade dessas proteínas de se adsorverem à interface óleo-água, reduzirem a tensão interfacial e formarem camadas viscoelásticas que conferem estabilidade às gotículas posiciona o tremoço como alternativa promissora para formulações que demandam desempenho funcional. Contudo, as lacunas existentes sobre a influência das condições de processamento, especialmente do pH, na estrutura e funcionalidade dessas proteínas indicam que há espaço significativo para aprofundamento científico.

No mesmo sentido, a formação de géis proteicos e de emulsões gelificadas representa um campo de investigação particularmente relevante, dada a capacidade dessas estruturas de modular textura, reologia e estabilidade em sistemas alimentares mais complexos. A interação entre proteínas e lipídios durante o aquecimento, resultando em redes tridimensionais capazes

de aprisionar gotículas de óleo, abre perspectivas para o uso de proteínas vegetais como agentes estruturantes, substitutos de gordura e carreadores de compostos bioativos. Nesse cenário, os óleos vegetais ricos em ácidos graxos poli-insaturados e livres de colesterol reforçam o alinhamento entre funcionalidade tecnológica e benefícios nutricionais, consolidando a viabilidade de sistemas emulsificados e gelificados formulados com matérias-primas de origem vegetal.

Assim, observa-se que os elementos abordados convergem para a compreensão de como características estruturais, composição química e comportamento funcional das proteínas do tremço podem ser articulados para o desenvolvimento de sistemas alimentares inovadores. As evidências aqui reunidas fornecem subsídios fundamentais para avançar em análises mais específicas acerca do desempenho dessas proteínas em condições controladas, bem como para a investigação de sua atuação em sistemas multipolares, especialmente aqueles que envolvem interações interfaciais e formação de redes estruturadas. Dessa forma, consolida-se um panorama teórico que não apenas contextualiza a relevância científica e tecnológica do tremço, mas também fundamenta etapas subsequentes que aprofundem sua aplicação em sistemas alimentares complexos, explorando seu potencial como ingrediente funcional emergente.

4. REFERÊNCIAS

A. SCARAFONI, A. DI.CATALDO, T.D. VASSILEVSKAIA, E.P. BEKMAN, C. RODRIGUES-POUSADA, F. CECILIANI, *et al.* Cloning, sequencing and expression in the seeds and radicles of two *Lupinus albus* conglutin γ genes. **Biochim. Et. Biophys. Acta (BBA)-Gene Struct. Expr.**, 1519 (1-2) (2001), pp. 147-151.

A. SMERIGLIO, D. BARRECA, E. BELLOCCO, D. TROMBETTA. Proanthocyanidins and hydrolysable tannins: occurrence, dietary intake and pharmacological effects. **Br. J. Pharmacol.**, 174 (11) (2017), pp. 1244-1262.

A.R. AHMED. Influence of chemical properties of Wheat-Lupine flour blends on cake quality **Am. J. Food Sci. Technol.**, 2 (2) (2014), pp. 67-75.

B. ZHANG, R. MENG, X.L. LI, W.J. LIU, J.S. CHENG, W. WANG. Preparation of Pickering emulsion gels based on κ -carrageenan and covalent crosslinking with EDC: Gelation mechanism and bioaccessibility of curcumin. **Food Chemistry**, 357 (2021), Article 129726

BILLY LO, STEFAN KASAPIS, ASGAR FARAHNAKY. Lupin protein: Isolation and techno-functional properties, a review, **Food Hydrocolloids**, Volume 112, 2021, 106318.

CREMONEZ, P. A. et al. (2013). Tremoço: Manejo e Aplicações. **Acta Iguazu**, n. January, p. 98–108.

C. ZHAO, Z. CHU, Y. MAO, Y. XU, P. FEI, H. ZHANG. Structural characteristics and acid-induced emulsion gel properties of heated soy protein isolate–soy oligosaccharide glycation conjugates. **Food Hydrocolloids**, 137 (2023), Article 108408.

C. WEN, G. LIU, J. REN, Q. DENG, X. XU, J. ZHANG. Current progress in the extraction, functional properties, interaction with polyphenols, and application of legume protein. **J. Agric. Food Chem.**, 70 (4) (2022), pp. 992-1002.

C.R.L. FRANCISCO, T.P. SANTOS, R.L. CUNHA. Nano and micro lupin protein-grape seed extract conjugates stabilizing oil-in-water emulsions. **Food Hydrocolloids**, 135 (2023), Article 108117.

D. LIN, A.L. KELLY, S. MIAO. Preparation, structure-property relationships and applications of different emulsion gels: Bulk emulsion gels, emulsion gel particles, and fluid emulsion gels. **Trends in Food Science & Technology**, 102 (2020), pp. 123-137.

DICKINSON, E. Emulsion gels: The structuring of soft solids with protein-stabilized oil droplets. **Food Hydrocoll.** 2012, 28, 224–241.

DOMÍNGUEZ, R.; MUNEKATA, P.E.S.; PATEIRO, M.; LÓPEZ-FERNÁNDEZ, O.; LORENZO, J.M. Immobilization of oils using hydrogels as strategy to replace animal fats and improve the healthiness of meat products. *Curr. Opin. Food Sci.* **2021**, 37, 135–144.

E. VILLACRÉS, P. CUEVA, M. DÍAZ, C.M. ROSELL. Replacing wheat flour with debittered and fermented lupin: Effects on bread's physical and nutritional features. **Plant Foods for Human Nutrition**, 75 (4) (2020), pp. 569-575.

GHARIBZAHEDI, S.M.T., SMITH, B., ALTINTAS, Z. 2024. Bioactive and health-promoting properties of enzymatic hydrolysates of legume proteins: A review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition** 64(9):2548-2578.

GUO, J.; CUI, L.; MENG, Z. Oleogels/emulsion gels as novel saturated fat replacers in meat products: A review. **Food Hydrocoll.** 2023 , 137 , 108313.

J. CHEN, H. LIU. Nutritional indices for assessing fatty acids: a mini-review. **Int J. Mol. Sci.**, 21 (16) (2020).

J. LEE, Y.L. XIONG, M.J. CHOI. Effect of micro-and nano-sized emulsion fillers combined with trans-cinnamaldehyde on the physicochemical and rheological characteristics of myofibrillar protein gels. **Food Hydrocolloids**, 143 (2023), Article 108865.

I.J. KAROUI, D.S. TERRAS, W. YEDDES, M. HAMMAMI, M. ABDERRABBA. Formulation of pasta enriched with protein-rich lupine (*Lupinus mutabilis* Sweet) and wheat bran using mixture design approach. **Journal of Food Science**, 88 (10) (2023), pp. 4001-4014.

I.D. NWACHUKWU, R.E. ALUKO. Physicochemical and emulsification properties of flaxseed (*Linum usitatissimum*) albumin and globulin fractions. **Food Chemistry**, 255 (2018), pp. 216-225.

J. RIVERA-JIMÉNEZ, C. BERRAQUERO-GARCÍA, R. PÉREZ-GÁLVEZ, P.J. GARCÍA-MORENO, F.J. ESPEJO-CARPIO, A. Guadix, *et al.* Peptides and protein hydrolysates exhibiting anti-inflammatory activity: sources, structural features and modulation mechanisms. **Food Funct.**, 13 (24) (2022), pp. 12510-12540.

J. CZUBINSKI, A. GRYGIER, A. SIGER. *Lupinus mutabilis* seed composition and its comparison with other lupin species. **J. Food Compos. Anal.**, 99 (2021), Article 103875.

J. VAN DE VONDEL, F. JANSSEN, A.G.B. WOUTERS, J.A. DELCOUR. Air-water interfacial and foaming properties of native protein in aqueous quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) extracts: Impact of pH- and heat-induced aggregation. **Food Hydrocolloids**, 144 (2023), Article 108945.

K. LI, S.Y. LI, R. ZHANG, J.B. ZHAO, M.T. DU, Y.H. BAI. Effect of ultrasound-assisted alkali extraction on the yield and functional properties of proteins from pale, soft and exudative (PSE)-like chicken meat. **Meat Research**, 35 (10) (2021), pp. 1-7.

KAMRAN, F., PHILLIPS, M., HARMAN, D.G., REDDY, N. 2023. Antioxidant activities of lupin (*Lupinus angustifolius*) protein hydrolysates and their potential for nutraceutical and functional foods. **Food Chemistry**. Advances 2:100297.

K. GRASBERGER, M. HAMMERSHØJ, M. CORREDIG. Stability and viscoelastic properties of mixed lupin-whey protein at oil-water interfaces depend on mixing sequence. **Food Hydrocolloids**, 138 (2023), Article 108485.

L. ZHI, Z. LIU, C. WU, X. MA, H. HU, H. LIU, B. ADHIKARI, Q. WANG, A. SHI. Advances in preparation and application of food-grade emulsion gels. **Food Chemistry** (2023), Article 136399.

LU, Y.; MAO, L.; HOU, Z.; MIAO, S.; GAO, Y. Development of Emulsion Gels for the Delivery of Functional Food Ingredients: From Structure to Functionality. **Food Eng. Rev.** 2019, 11, 245–258.

MAO, L.; LU, Y.; CUI, M.; MIAO, S.; GAO, Y. Design of gel structures in water and oil phases for improved delivery of bioactive food ingredients. **Crit. Rev. Food. Sci. Nutr.** 2020, 60, 1651–1666.

M.E.R. CHAMONE, J.L.R. ASCHERI, J.W. VARGASSOLÓRZANO, M.P. STEPHAN, C. W.P. CARVALHO. Chemical characterization of White lupin (*Lupinus albus*) flour treated by extrusion cooking and aqueous debittering processes. **Plant Foods Hum. Nutr.**, 78 (2) (2023), pp. 292-298.

M. CABRITA, S. SIMÕES, E. ÁLVAREZ-CASTILLO, D. CASTELO BRANCO, A. TASSO, D. FIGUEIRA. Development of innovative clean label emulsions stabilized by vegetable proteins. **International Journal of Food Science and Technology**, 58 (1) (2023), pp. 406-422.

M. ADEM, S.J. A, A. WORKU, S. NEELA. Optimization of lupine (*Lupinus albus L*) composition, feed moisture content and barrel temperatures for best quality maize based extruded snack food. **Nutrition & Food Science**, 50 (5) (2019), pp. 853-869.

M.C. ONWEZEN, E.P. BOUWMAN, M.J. REINDERS, H. DAGEVOS. A systematic review on consumer acceptance of alternative proteins: Pulses, algae, insects, plant-based meat alternatives, and cultured meat, **Appetite**, Volume 159, 2021, 105058.

M. KRAUSE, J.C. SØRENSEN, I.L. PETERSEN, P. DUQUEESTRADA, C. CAPPELLO, A. Z.A. TLAIS. Associating compositional, nutritional and techno-functional characteristics of faba bean (*Vicia faba L.*) protein isolates and their production side-streams with potential food applications. **Foods**, 12 (5) (2023), p. 919.

MIRZA, S. et al. (2023). Photocatalytic and antibacterial activities of ZnO nanoparticles synthesized from *Lupinus albus* and *Lupinus pilosus* plant extracts via green synthesis approach. **Inorganic Chemistry Communications**. Vol. 155, setembro, 111124.

M. DURANTI, C. HORSTMANN, J. GILROY, R. CROY. The molecular basis for N-glycosylation in the 11S globulin (legumin) of lupin seed. **J. Protein Chem.**, 14 (1995), pp. 107-110.

M. VOGELSANGO'DWYER, J. BEZ, I.L. PETERSEN, M.S. JOEHNKE, A. DETZEL, M. B USCH. Techno-functional, nutritional and environmental performance of protein isolates from blue lupin and white lupin. **Foods**, 9 (2) (2020), p. 230.

NIKBAKHT NASRABADI, M.; SEDAGHAT DOOST, A.; MEZZENGA, R. Modification approaches of plant-based proteins to improve their techno-functionality and use in food products. **Food Hydrocoll.** 2021, 118, 106789.

OLIVEIRA, C. T. (2013). **Determinação do perfil lipídico e obtenção de extrusados de grãos e farinhas de Tremoço Branco (*Lupinus albus*).** FACULDADE DE FARMÁCIA DA UFMG. BELO HORIZONTE.

P. SINGH, V.K. PANDEY, Z. SULTAN, R. SINGH, A.H. DAR. Classification, benefits, and applications of various anti-nutritional factors present in edible crops. **J. Agric. Food Res.**, 14 (ember) (2023), Article 100902.

POORE, J.; NEMECEK, T. Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. **Science**. 2018, *360*, 987–992.

S. CHUKWUEJIM, A. UTIOH, T.D. CHOI, R.E. ALUKO. Lupin seed proteins: A comprehensive review of composition, extraction technologies, food functionality, and health benefits. **Food Reviews International**, 40 (2024), pp. 691-714.

S.M. BESSADA, J.C. BARREIRA, M.B.P. OLIVEIRA. Pulses and food security: dietary protein, digestibility, bioactive and functional properties. **Trends Food Sci. Technol.**, 93 (2019), pp. 53-68.

S. MEKALA, E.K. SILVA, M.D.A. SALDAÑA. Mechanism, kinetics, and physicochemical properties of ultrasound-produced emulsions stabilized by lentil protein: A non-dairy alternative in food systems. **European Food Research and Technology**, 248 (1) (2022), pp. 185-196.

S. RODRÍGUEZ-AMBRIZ, A. MARTÍNEZ-AYALA, F. MILLÁN, G. DAVILA-ORTIZ. Composition and functional properties of *Lupinus campestris* protein isolates. **Plant Foods Hum. Nutr.**, 60 (2005), pp. 99-107.

TIAN, Y., CORTÉS-AVENDAÑO, P., YANG, B., GLORIO-PAULET, P., REPO-CARRASCO-VALENCIA, R., SUOMELA, J.P. 2024. Flavonoid diversity in bitter and debittered seeds of Andean lupin (*Lupinus mutabilis* Sweet). **Food Chemistry**. 442:138411.

TAN, C.; MCCLEMENTS, D.J. Application of Advanced Emulsion Technology in the Food Industry: A Review and Critical Evaluation. **Foods**. 2021, *10*, 812.

WANG, Y.; SELOMULYA, C. Food rheology applications of large amplitude oscillation shear (LAOS). **Trends Food Sci. Technol.** 2022, *127*, 221–244.

X. XU, H. CHEN, Q. ZHANG, F. LYU, Y. DING, X. ZHOU. Effects of oil droplet size and

interfacial protein film on the properties of fish myofibrillar protein–oil composite gels.

Molecules, 25 (2) (2020), Article 289.

Y. XU, J. YU, Y. XUE, C. XUE. Enhancing gel performance of surimi gels via emulsion co-stabilized with soy protein isolate and κ -carrageenan. **Food Hydrocolloids**, 135 (2023), Article 108217.

Z. KOHAJDOVÁ, J. KAROVICHOVÁ, Š. SCHMIDT. Lupin composition and possible use in bakery-a review. Czech J. **Food Sci.**, 29 (3) (2011), pp. 203-211.

ZHAO, X.; LI, D.; WANG, L.J.; WANG, Y. Role of gelation temperature in rheological behavior and microstructure of high elastic starch-based emulsion-filled gel. **Food Hydrocoll.** 2023, 135, 108208.

CAPÍTULO 1 - Características tecnofuncionais do isolado de proteína de tremoço branco em emulsões óleo-em-água.

RESUMO

O tremoço branco (*Lupinus albus*) tem se destacado como uma fonte proteica vegetal promissora devido ao seu elevado valor nutricional e às suas propriedades tecnofuncionais, especialmente em sistemas emulsificados. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo desenvolver e caracterizar emulsões óleo-em-água estabilizadas por isolado proteico de tremoço branco, avaliando de forma integrada o efeito do teor de óleo (25% e 50%) e de diferentes tecnologias de homogeneização, incluindo mistura de alta velocidade e homogeneização de alta pressão. As emulsões foram caracterizadas quanto ao comportamento reológico, tamanho médio de gotículas, índice de polidispersão, potencial zeta e estabilidade cinética. Os resultados demonstraram que todas as emulsões apresentaram comportamento não newtoniano pseudoplástico, com aumento significativo da viscosidade aparente em formulações com maior teor de óleo. A homogeneização de alta pressão promoveu redução expressiva no tamanho das gotículas e distribuição mais uniforme, especialmente na emulsão contendo 50% de óleo, que apresentou diâmetro médio em torno de 215 nm, menor PDI e potencial zeta mais negativo (-51,2 mV). Esses fatores refletiram diretamente na estabilidade cinética, uma vez que essa formulação não apresentou migração de partículas nem separação de fases durante 24 h a 60 °C. Em contraste, emulsões com menor teor de óleo e/ou submetidas apenas à mistura de alta velocidade exibiram maiores taxas de migração e índices de desestabilização. De forma geral, os resultados evidenciam que a combinação entre maior fração lipídica e homogeneização de alta pressão favorece a formação de emulsões mais finas, viscosas e cineticamente estáveis, ressaltando o potencial do isolado proteico de tremoço branco como agente emulsificante em sistemas óleo-em-água e como ingrediente estratégico para o desenvolvimento de alimentos à base de plantas.

1. INTRODUÇÃO

As espécies do gênero *Lupinus* (tremoços), pertencentes à família Fabaceae, representam um grupo de leguminosas de elevada relevância agrônômica, nutricional e tecnológica. Entre as espécies cultivadas mais difundidas destacam-se o tremoço branco (*Lupinus albus*), o tremoço azul ou estreito (*L. angustifolius*), o tremoço amarelo (*L. luteus*) e o tremoço andino (*L. mutabilis*) (ERBAS, 2010; PLUSTEA et al., 2022; TOUNSI-HAMMAMI et al., 2019; WILCZURA et al., 2018). Essas espécies vêm ganhando crescente interesse científico e industrial devido à sua ampla plasticidade ecológica, permitindo bom desempenho em diferentes condições climáticas, incluindo solos de baixa fertilidade e regiões de clima temperado ou mediterrâneo (GULISANO et al., 2019; LAMRABET et al., 2022).

Do ponto de vista de sua composição, os tremoços distinguem-se por seu conteúdo

proteico, que pode ser de 35 a 40%. Além disso, apresentam teores de fibras alimentares (30–40%), lipídios contendo ácidos graxos essenciais (8–10%), vitaminas, minerais e compostos bioativos com propriedades antioxidantes (OLIVEIRA et al., 2018; PRUSINSKI, 2017; YAVER). A baixa proporção de carboidratos digeríveis e a predominância de carboidratos não amiláceos os tornam interessantes para formulações destinadas ao controle glicêmico e ao desenvolvimento de alimentos funcionais. Aliado a isso, possuem alta digestibilidade proteica e propriedades tecnofuncionais relevantes, como boa solubilidade, capacidade emulsificante e estabilidade térmica, fatores que reforçam sua aplicabilidade em sistemas alimentícios (BURGOS-DÍAZ et al., 2016; MONTEIRO et al., 2014; VAN DE NOORT, 2016).

Em termos de aplicação industrial, os tremoços apresentam potencial comparável ao da soja, sendo considerados uma alternativa promissora às proteínas isoladas de origem convencional. Seu perfil de aminoácidos, propriedades funcionais e versatilidade tecnológica têm atraído atenção de setores voltados ao desenvolvimento de substitutos cárneos, bebidas vegetais, emulsões estáveis e produtos panificados enriquecidos com proteínas (BOUKID; PASQUALONE, 2022; PRUSINSKI, 2017).

Entre as espécies do gênero, o tremoço branco (*L. albus*) destaca-se como a variedade de cultivo mais antiga e a mais utilizada na nutrição humana. Isso está associado ao seu menor teor de alcaloides amargos e outros fatores antinutricionais, o que reduz a necessidade de tratamentos de detoxificação e amplia sua aceitação sensorial. Além de sua composição nutricional, o *L. albus* apresenta efeitos fisiológicos benéficos documentados na literatura: seus componentes bioativos têm sido associados à modulação do metabolismo lipídico e glicídico, contribuindo para a redução de glicose plasmática, colesterol total e triglicerídeos, com impactos positivos na prevenção de doenças cardiovasculares, obesidade e diabetes tipo 2 (ARNOLDI et al., 2015; GUZMÁN et al., 2021; SANDOVAL-MUÑÍZ et al., 2018). Esses atributos reforçam sua posição como ingrediente estratégico para o desenvolvimento de alimentos funcionais e formulações nutricionais de alto valor agregado (CHUKWUEJIM & ALUKO, 2024).

As emulsões são sistemas coloidais inerentemente termodinamicamente instáveis por serem constituídas por duas fases imiscíveis, tipicamente óleo e água, o que as torna suscetíveis a fenômenos como floculação, coalescência, cremação. Para mitigar esses processos degradativos e prolongar sua estabilidade cinética, recorrem-se a tecnologias avançadas de processamento, entre as quais se destacam a homogeneização de alta pressão e a mistura sob alta intensidade, capazes de promover intensa dispersão e fragmentação das gotas da fase dispersa. A aplicação dessas técnicas reduz efetivamente a tensão interfacial, aumenta a

viscosidade aparente do sistema, controla de forma mais precisa a distribuição e o diâmetro médio das gotas e, conseqüentemente, favorece a formação de estruturas coloidais mais finamente estabilizadas. Esses mecanismos físicos atuam sinergicamente para melhorar não apenas a uniformidade da emulsão, mas também sua resistência à separação de fases, possibilitando a criação de matrizes alimentícias e adequadas à aplicações tecnológicas que demandam alta estabilidade (TIRGARIÁN, FARMANI & MILANI, 2023).

Diante dos desafios intrínsecos à estabilização de emulsões, torna-se ainda mais relevante explorar as propriedades tecnológicas das proteínas vegetais, especialmente porque sua atuação na interface óleo-água pode contribuir para a formação de sistemas coloidais mais estáveis e funcionalmente eficientes. Nesse contexto, o estudo das proteínas de leguminosas ganha destaque, uma vez que essas macromoléculas apresentam comportamento interfacial favorável, permitindo reduzir a tensão interfacial, promover encapsulamento eficiente das gotas e reforçar a estrutura tridimensional da matriz, elementos essenciais para aplicações em produtos à base de plantas com apelo sustentável e rótulo limpo. Comparadas a outras proteínas não convencionais, as proteínas de leguminosas se sobressaem por suas marcantes capacidades emulsificantes e gelificantes, que influenciam diretamente a textura, a retenção de água e óleo e a estabilidade físico-química dos produtos. Além disso, seus isolados proteicos demonstram propriedades físicas e funcionais particularmente relevantes, incluindo elevada solubilidade, aptidão para absorção de água e lipídios, boa capacidade de formação e estabilização de espuma, além de forte potencial gelificante, características essenciais para o desenvolvimento de sistemas alimentares inovadores (RAWAL et al., 2024; CHUKWUEJIM & ALUKO, 2024).

Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo desenvolver e caracterizar emulsões estabilizadas por proteínas isoladas de tremoço branco, explorando o potencial ainda pouco investigado dessa fonte proteica em matrizes emulsificadas. Ao analisar simultaneamente o efeito do teor de óleo e de diferentes tecnologias de homogeneização como, mistura de alto cisalhamento e homogeneização de alta pressão, buscou-se compreender como parâmetros de formulação, principalmente os diferentes percentuais de óleo, e processamento modulam o comportamento coloidal e o desempenho tecnofuncional dessas emulsões.

Apesar do crescente interesse nas proteínas de tremoço e do reconhecimento de suas propriedades tecnofuncionais, ainda há lacunas importantes quanto à compreensão de seu desempenho em sistemas emulsificados, principalmente quando se consideram simultaneamente variáveis de formulação e processamento (CHUKWUEJIM & ALUKO, 2024). A maioria dos estudos disponíveis avalia essas proteínas em condições simplificadas, sem explorar de forma integrada o efeito do teor de óleo e de diferentes tecnologias de

homogeneização sobre o comportamento interfacial, a organização estrutural e a estabilidade das emulsões óleo-em-água. Nesse contexto, o presente trabalho se diferencia ao investigar de maneira sistemática como diferentes percentuais de fase oleosa, associados a métodos distintos de homogeneização, interferem as características coloidais e o desempenho tecnofuncional de emulsões estabilizadas por isolado proteico de tremoço branco.

Essa abordagem, corrobora com a crescente demanda por ingredientes vegetais capazes de substituir agentes emulsificantes tradicionais, ao mesmo tempo em que se atende à necessidade industrial por produtos mais estáveis, sustentáveis e alinhados ao conceito de rótulo limpo. Embora a literatura já descreva propriedades funcionais gerais de proteínas de leguminosas, ainda são escassos os estudos que aprofundam a interação entre proteínas de tremoço branco e técnicas modernas de homogeneização em sistemas óleo-em-água, especialmente sob diferentes composições lipídicas. Assim, este trabalho se propõe a avançar o conhecimento existente ao integrar variáveis de processo e formulação, oferecendo evidências que podem ampliar o uso tecnológico do tremoço branco (*Lupinus albus*).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O tremoço branco (*Lupinus albus*) e o óleo de girassol utilizados neste estudo foram adquiridos em um estabelecimento comercial local. A utilização do óleo de girassol para este estudo deve-se ao seu perfil lipídico reconhecido na indústria de alimentos, caracterizado pela proporção de ácidos graxos insaturados e sabor neutro, o que favorece sua aplicação em sistemas emulsificados sem interferências sensoriais indesejadas. Além disso, trata-se de um óleo de estabilidade oxidativa e com comportamento reológico compatível com emulsões óleo-em-água, tornando-o um modelo adequado para avaliar o desempenho emulsificante das proteínas isoladas de tremoço. Todos os reagentes utilizados nas análises eram de grau analítico (PA > 99,0%).

2.1 Preparação de farinha de Tremoço branco e do Isolado de proteína (IP)

A farinha de tremoço branco foi obtida conforme descrito por Ramos et al. (2024), com modificações. As sementes foram embebidas em água destilada a 5 °C por 12 horas para remoção dos tegumentos, desidratadas a 60 °C por 24 horas, moídas em processador doméstico, peneiradas (malha de 1 mm) e armazenadas a 4 °C. A farinha foi desengordurada com hexano (1:6, p/v) em extrator Soxhlet por 6 horas, seguida de evaporação do solvente a 40 °C por 12

horas (AOAC, 2005).

O isolado proteico (IP) foi obtido por extração salina, conforme descrito por Silva et al. (2021). Este método de extração foi escolhido devido à sua capacidade de preservar as propriedades tecnológicas das proteínas, garantindo alta funcionalidade interfacial mesmo em condições de baixa força iônica. A farinha desengordurada (150 g) foi dispersa em 1,5 L de tampão fosfato de sódio (pH 6,5; 0,1 mol/L) contendo NaCl (0,5 mol/L) e mantida sob agitação por 12 horas a 25 ± 1 °C. A suspensão foi filtrada através de uma membrana de nylon (tamanho de poro de 0,80 μm) e o filtrado foi acidificado com ácido láctico (30% v/v) até pH 5,0 a 4 ± 1 °C.

Após a precipitação das proteínas, a mistura foi centrifugada (6000 rpm, 15 min). Os sólidos resultantes foram lavados com solução de ácido láctico (pH 5,0) e armazenados sob refrigeração. Antes da determinação da concentração proteica pelo método do biureto (75%), o material lavado foi submetido ao processo de liofilização, uma técnica de secagem que remove a água do material previamente congelado por sublimação, permitindo que o gelo passe diretamente ao estado de vapor sob condições de vácuo.

2.2 Preparação e caracterização deas Formulações de Emulsão

As Emulsões óleo-em-água foram formuladas utilizando 3% (p/p) de proteína isolada de tremço branco (IPTB), previamente dispersa em tampão fosfato de sódio (pH 6,5; 0,1 mol/L) contendo NaCl (0,5 mol/L). Quatro formulações distintas foram preparadas, variando-se tanto a concentração de óleo de girassol quanto o tipo de tratamento mecânico empregado: (F1) emulsões contendo 25% de óleo submetidas apenas à mistura de alta velocidade (MAV 25), (F2) emulsões contendo 50% de óleo submetidas apenas à mistura de alto cisalhamento (MAV 50); (F3) emulsões contendo 25% de óleo submetidas à mistura de alto cisalhamento seguida de homogeneização de alta pressão (MH 25); e (F4) emulsões contendo 50% de óleo submetidas aos dois tratamentos sucessivos (MH 50), conforme indicado na Tabela 1.

Tabela 1. Formulações de emulsões proteicas.

Formulações	%Óleo	Tratamento	Decodificação
F1	25	MAV	MAV 25
F2	50	MAV	MAV 50
F3	25	MAV + HAP	MH 25
F4	50	MAV + HAP	MH 50

Legenda: MAV: Mistura alta velocidade; MH: Mistura homogeneizador; HAP: Homogeneizador a alta pressão.

Todas as formulações foram inicialmente emulsificadas por mistura de alta velocidade (MAV) utilizando um Ultra-Turrax (modelo T25, IKA, Alemanha) operando a 12.000 rpm por 10 minutos, etapa necessária para promover uma pré-dispersão do óleo na fase aquosa, criando uma emulsão primária capaz de suportar processos subsequentes. As formulações MH 25 e MH 50 foram, então, submetidas à homogeneização de alta pressão (HAP) em um Emulsiflex-C5 (Avestin, Canadá) a 20.000 psi por seis ciclos, uma vez que múltiplas passagens aumentam a fragmentação das gotículas, permitindo alcançar tamanhos menores, distribuição mais estreita e uma interface mais estável; abaixo desse número, a eficiência de ruptura das gotículas tende a ser insuficiente.

Após o processamento mecânico, todas as emulsões foram aquecidas a 75 ± 1 °C por 10 minutos, procedimento que favorece as interações proteicas como a desnaturação parcial e exposição de regiões hidrofóbicas que reforçam a adsorção interfacial. Além disso, essa temperatura é empregada em estudos de estabilidade de emulsões por não comprometer a integridade da fase lipídica nem promover degradação significativa dos componentes proteicos, permitindo avaliar as características das emulsões em condições controladas e reprodutíveis.

A utilização de duas concentrações de óleo (25% e 50%) teve como objetivo investigar como a variação da fração lipídica influencia a área interfacial disponível para adsorção das proteínas e sua capacidade de estabilização, enquanto o emprego diferenciado de técnicas (MAV seguido de HAP) permitiu avaliar o papel do processamento na modulação do tamanho das gotículas e, conseqüentemente, na estabilidade físico-química dos sistemas obtidos.

2.3 Potencial Zeta (ζ), Tamanho de gota e Índice de Polidispersão

O potencial zeta (ζ), o diâmetro médio da gota (nm) e o índice de polidispersão (PDI) das emulsões foram determinados por espalhamento dinâmico de luz usando um Zetasizer Nano ZS (Malvern Instruments, Reino Unido) em um ângulo de espalhamento de 173°. As dispersões foram diluídas (10^{-6}) com tampão fosfato de sódio (pH 6,5; 0,1 mol/L), filtradas através de

uma membrana de náilon (0,60 μm) e injetadas em uma célula Zetasizer DTS1070. Os índices de refração da proteína e do dispersante foram 1,45 e 1,33, respectivamente. O potencial zeta (ζ) foi determinado medindo a mobilidade eletroforética das partículas usando o software do instrumento. Todas as medições foram realizadas em triplicata (RAMOS et al., 2024).

2.4 Comportamento reológico de emulsões

As curvas de fluxo das emulsões foram obtidas utilizando um reômetro rotacional HAAKE MARS (Modular Advanced Rheometer System, Thermo Electron Corp Alemanha) equipado com um banho termostático (Phoenix 2C30P, Thermo Electron Corp., Alemanha) a 25 °C. As curvas de escoamento foram medidas utilizando um sensor de geometria cilíndrica coaxial (Z20), com taxas de deformação variando de 0,01 a 100 s^{-1} (rampa ascendente), 100 s^{-1} a 0,01 (rampa descendente) e 0,01 a 100 s^{-1} (rampa ascendente) por 5 min. O modelo de Ostwald-de Waele (Equação 1) foi ajustado aos dados obtidos na última rampa ascendente.

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

Em que τ é a tensão de cisalhamento (Pa), K é o índice de consistência ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$), $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação (s^{-1}) e n é o índice de comportamento ao escoamento (adimensional).

2.5 Estabilidade cinética de emulsões

Os fenômenos de desestabilização da emulsão foram monitorados por espalhamento de luz múltiplo usando um instrumento de varredura óptica (Turbiscan Lab Formulation Stability & Size, LAB ® Formulation Co., França). As amostras foram colocadas em tubos de vidro cilíndricos (20 mL) e posicionadas no instrumento para análise. Os sinais de transmissão (T) e retroespalhamento (BS) foram monitorados por 24 horas ao longo da altura da amostra. As varreduras foram medidas em intervalos regulares (2 min) durante um período de 24 horas a 60 °C. Os resultados foram expressos subtraindo-se a primeira varredura das varreduras subsequentes. O Índice de Estabilidade Turbiscan (TSI), que reflete as variações gerais de estabilidade ao longo do tempo, foi calculado (Eq. 2) a partir das diferenças entre as flutuações de

$$TSI(t) = \frac{1}{N_h} \sum_{t_i=1}^{t_{max}} \sum_{z_i=z_{min}}^{z_{max}} \left[BST(t_i, z_i) - BST(t_{i-1}, z_i) \right] \quad (2)$$

Em que t é o tempo de medição, z é a altura da amostra (mm) é o número de posições de altura e BST é o sinal (retroespalhamento (BS) se a transmissão (T) for 0,2%, ou T caso contrário); ou seja, quanto maior o Índice de Estabilidade Turbiscan (TSI), maiores serão as variações observadas em relação à varredura inicial, indicando menor estabilidade da amostra.

Além disso, na avaliação da estabilidade cinética de emulsões, a taxa de migração das partículas seja por sedimentação ou cremação, é um parâmetro essencial, uma vez que reflete o deslocamento da fase dispersa ao longo do tempo e indica a tendência à separação de fases. Essa análise foi realizada por meio do equipamento Turbiscan, com base na técnica de Múltiplo Espalhamento Estático de Luz (SMLS), que permite acompanhar in situ e de forma não destrutiva as variações nos perfis de luz transmitida e retrodifundida ao longo da altura da amostra. Alterações nesses perfis em diferentes regiões do tubo de medição podem indicar o movimento descendente, associado à sedimentação, o que pode possibilitar a identificação e a quantificação dos fenômenos de instabilidade cinética das emulsões ao longo da análise.

2.6 Análise estatística

Os resultados foram expressos como média \pm desvio padrão. A análise estatística foi realizada por meio de análise de variância (ANOVA), seguida do teste de comparações múltiplas de Tukey, adotando-se nível de significância de 5% ($p < 0,05$). As análises foram conduzidas no software R (versão 4.2.0).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Comportamento Reológico das Formulações

Os sistemas emulsionados desempenham um papel fundamental na indústria de alimentos, pois são a base de uma ampla variedade de produtos, como molhos, maioneses, cremes, bebidas, sobremesas e análogos vegetais. Eles permitem controlar características sensoriais, como textura, cremosidade e aparência, além de influenciar diretamente na estabilidade (ONWEZEN et al., 2021).

A análise reológica das emulsões correspondentes às formulações F3 e F4, ambas contendo as mesmas condições proteicas, porém diferenciadas pelo teor de óleo de girassol (25% em F3 e 50% em F4) e pelo emprego conjunto dos métodos de mistura MAV e HAP revelou diferenças no comportamento do fluxo, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Resultados reológicos para o modelo Ostwald–de Waele.

Formulações	K (Pa.s ⁿ)	n	η 50 (mPa.s)
MH 50	0,230±0,004	0,670±0,003	70,0±0,001
MH 25	0,003±0,001	0,920±0,010	3,0±0,001

Legenda: MH 50: mistura homogeneizador a alta pressão com 50 % de óleo. MH 25: mistura homogeneizador a alta pressão com 25 % de óleo.

Essas duas formulações foram selecionadas para prosseguir com as análises reológicas porque representam os sistemas que tiveram a aplicação dos dois tratamentos em conjunto (MAC e HAP), sendo possivelmente estruturalmente mais estáveis, sendo, portanto, interessantes para investigar com precisão os efeitos do teor de óleo sobre a viscosidade da matriz emulsificada. Além disso, ao isolar apenas as formulações submetidas à homogeneização de alta pressão, torna-se possível avaliar de forma mais clara a influência do aumento da fração lipídica e, conseqüentemente, da área interfacial a ser recoberta pelas proteínas de tremoço branco quanto à reologia. Dessa forma, as diferenças observadas entre MH 25 e MH 50 derivam principalmente da concentração distinta de óleo, a qual impacta diretamente a densidade da fase dispersa, a estrutura interna da emulsão e, por consequência, seu perfil de viscosidade e resposta ao escoamento.

O modelo da Lei de Potência (Ostwald-de Waele) apresentou o melhor ajuste aos dados. Ambas as amostras apresentaram comportamento não newtoniano com características pseudoplásticas. Os resultados mostraram que as propriedades reológicas das emulsões foram significativamente influenciadas pela concentração do óleo. A formulação MH 50, com maior proporção de óleo, apresenta um comportamento mais espesso, caracterizado por maior viscosidade e resistência ao cisalhamento, enquanto MH 25, com menor concentração de óleo, apresenta um comportamento mais fluido. Uma viscosidade aparente de 70,0 mPa·s a 50 s⁻¹ foi observada para MH 50, que é significativamente maior do que a observada para MH 25. A mobilidade das gotículas dispersas e, como resultado, a estabilidade das emulsões são significativamente influenciadas pela viscosidade aparente. A formulação MH 50 apresentou alta viscosidade aparente, o que sugeriu mobilidade reduzida das gotículas e, como resultado, taxas de colisão, reduzindo assim a tendência à coalescência e formação de creme (QUEZADA et al., 2024; RAMOS et al., 2024).

Os resultados reológicos obtidos para as formulações MH 25 e MH 50 apresentam um

comportamento semelhante com o observado em Francisco, Santos & Cunha (2023), envolvendo nanoconjugados (NC) e microconjugados (MC) estabilizando emulsões. No estudo citado, diferenças no fluxo das fases aquosas foram atribuídas ao tamanho das partículas e ao grau de interação entre elas: os MC, maiores, exibiram maior viscosidade, enquanto os NC apresentaram comportamento mais fluido; porém, quando incorporados em emulsões, ambos os sistemas apresentaram viscosidade aparente semelhante após 24 horas devido ao aumento das interações gota-gota, especialmente nos NC. Entre as formulações analisadas, MH 50, contendo 50% de óleo, apresentou maior índice de consistência (K), maior viscosidade aparente (70 mPa·s) e maior caráter pseudoplástico quando comparada a MH 25, que possui apenas 25% de óleo e exibiu comportamento mais fluido. Assim como observado no estudo sobre os conjugados fenólicos e proteicos, o aumento da fração dispersa promoveu maior densidade interfacial e mais interações entre gotículas, elevando a resistência ao escoamento e reduzindo a mobilidade das gotas, fatores fundamentais para a estabilidade contra coalescência.

Em estudos realizados por Vogelsang-O'Dwyer et al. (2021) os resultados encontrados sobre alternativas vegetais ao leite formuladas com proteína de tremço reforçam as tendências que também foram observadas nas emulsões desenvolvidas neste trabalho. No estudo de Vogelsang-O'Dwyer et al. (2021), as bebidas à base de tremço apresentaram viscosidade comparável à do leite bovino sendo sensíveis às variações de pressão de homogeneização, indicando que o processamento mecânico, por si só, não promove alterações na estrutura fluida quando essa proteína é utilizada como estabilizante, o que foi também observado em estudos realizados por Devkota et al. (2024). Esse comportamento pode ser associado com este estudo sobre as emulsões contendo proteínas de tremço, uma vez que as formulações MH 25 e MH 50, ambas submetidas ao mesmo tratamento de alto cisalhamento seguido de homogeneização de alta pressão, apresentaram diferenças reológicas determinadas pela fração de óleo, e não pelos efeitos do processamento.

Outro ponto relevante é que, no estudo das bebidas, a estabilidade do comportamento de fluxo ao longo do tempo aponta para a capacidade da proteína de tremço de formar sistemas reológicos previsíveis e relativamente estáveis mesmo na ausência de hidrocoloides, característica também observada nas emulsões produzidas neste trabalho, nas quais MH 25 e MH 50 apresentaram perfis consistentes com a literatura sobre sistemas pseudoplásticos estabilizados por proteínas. Essas semelhanças reforçam que a proteína isolada de tremço, pode ser capaz de estruturar sistemas.

Considerando os resultados obtidos no presente trabalho, é possível que o comportamento reológico observado nas emulsões esteja relacionado à forma como as proteínas

isoladas de tremoço poderiam ter se organizado na interface óleo-água. Estudos semelhantes sugerem que esse tipo de proteína pode atuar como emulsificante (ARNOLD et al., 2015), e algo próximo disso talvez também tenha ocorrido, influenciando a formação da rede estrutural do sistema. Assim, as diferenças de viscosidade entre as formulações podem indicar variações no grau de interação entre gotículas, possivelmente moduladas tanto pela proporção de fase lipídica quanto pelas características estruturais que a proteína adquiriu após o processamento. Tais aspectos, podem sugerir que a proteína de tremoço desempenhe um papel relevante na estabilidade e na consistência das emulsões, ainda que seu efeito dependa fortemente das condições de formulação. Dessa forma, investigar propriedades como tamanho de gota, PDI e potencial zeta pode corroborar no entendimento sobre como essas interações se estabelecem e como, em conjunto, podem ter influenciado o comportamento observado.

3.2 Tamanho de partícula, Índice de polidispersão (PDI) e Potencial zeta

As proteínas localizadas na interface óleo-água (O/A) têm potencial para influenciar diretamente a formação e a estabilidade das emulsões, uma vez que sua capacidade de adsorver na interface e formar filmes coesos pode afetar o desempenho emulsificante. Esse comportamento pode ser sensível a diferentes condições do sistema, como tamanho das gotículas, que determina a área interfacial disponível; pH, que afeta a carga superficial das proteínas e sua interação com a fase contínua; e tratamentos tecnológicos, como mistura de alta velocidade (MAV) ou homogeneização em alta pressão (HAP), que alteram a distribuição de energia aplicada ao sistema e, conseqüentemente, a eficiência de formação das gotículas (RAMOS et al., 2024).

Nesse contexto, a Tabela 3 apresenta os valores de diâmetro médio das partículas, índice de polidispersão (PDI) e potencial zeta obtidos para todas as emulsões avaliadas. Esses parâmetros fornecem uma visão inicial sobre como cada formulação pode ter respondido aos diferentes tratamentos por exemplo, indicando possíveis tendências relacionadas à uniformidade das gotículas ou ao nível de repulsão eletrostática entre partículas. A Figura 1 complementa essa análise, ilustrando como a variação da concentração de óleo de 25% para 50% se refletiu nesses mesmos parâmetros sob os dois métodos de homogeneização (MAV e HAP). Essa comparação visual permite observar se o aumento da fase dispersa pode ter influenciado a distribuição de tamanhos, a estabilidade coloidal e o comportamento estrutural das emulsões produzidas em cada condição.

Tabela 3. Medidas do diâmetro médio das partículas (d), índice de polidispersão (PDI) e potencial zeta (mV) das amostras em pH 7.

Amostras	d (nm)	PDI	Potencial Zeta (mV)
MAV 25	528,3 ± 60,3 a	0,775 ± 0,02 a	-32,9 ± 3,7 b
MAV 50	371,8 ± 15,9 b	0,348 ± 0,04 b	-38,0 ± 4,3 b
MH 25	451,5 ± 36,8 a	0,641 ± 0,02 a	-36,0 ± 0,6 b
MH 50	214,8 ± 14,0 b	0,398 ± 0,03 b	-51,2 ± 4,3 a

Os valores são apresentados como média ± desvio padrão. Médias seguidas pela mesma letra minúscula dentro de cada coluna de pH não diferiram significativamente ($p > 0,05$). Legenda: MAV 25: mistura alta velocidade com 25 % de óleo; MAV 50: mistura alta velocidade com 50 % de óleo; MH 25: mistura homogeneização alta pressão com 25 % de óleo; MH 50: mistura homogeneização alta pressão com 50 % de óleo.

A mistura de mistura de alta velocidade (MAV) reduziu o tamanho da gota, enquanto a homogeneização de alta pressão (HAP) alcançou uma redução maior, com valores próximos a 200 nm. A HAP facilita a formação de emulsões mais finas e a ruptura de gotas. Conforme demonstrado na Tabela 2, a viscosidade aparente dos sistemas também foi aumentada pelo maior teor de óleo (de 3 para 70 mPa.s⁻¹), o que reduz a mobilidade das gotas e, conseqüentemente, o processo de coalescência após a ruptura. Conseqüentemente, o efeito combinado de maiores forças de cisalhamento/pressão e a maior viscosidade da fase contínua favoreceram gotas menores e mais uniformes, como mostrado na Fig. 1-b, a 50% de óleo, particularmente sob HAP.

Em estudos realizados por Ma, Habibi e Sagis (2025), os quais abordaram sobre as propriedades da interface óleo-água e das propriedades emulsificantes de misturas de proteína de tremoço e pectina e de proteína de tremoço puras em diferentes valores de pH, puderam inferir que complexos isolado proteico e pectina mostrou que a estabilidade das emulsões depende principalmente do pH, com interfaces mais rígidas e melhor desempenho emulsificante apenas em condições ácidas (3,5–4,0) e instabilidade marcada em pH próximo ao neutro devido à fraca adsorção da pectina. Esses resultados podem indicar que, mesmo em pH 7, a estabilidade pode ser significativamente melhorada pelo processamento. A redução expressiva do tamanho de gotícula, o aumento da viscosidade e a intensificação da carga superficial em MH 50, com -51,2 mV, podem estar associados a interfaces mais estáveis, contrastando com a floculação observada nos sistemas proteína-pectina em pH neutro.

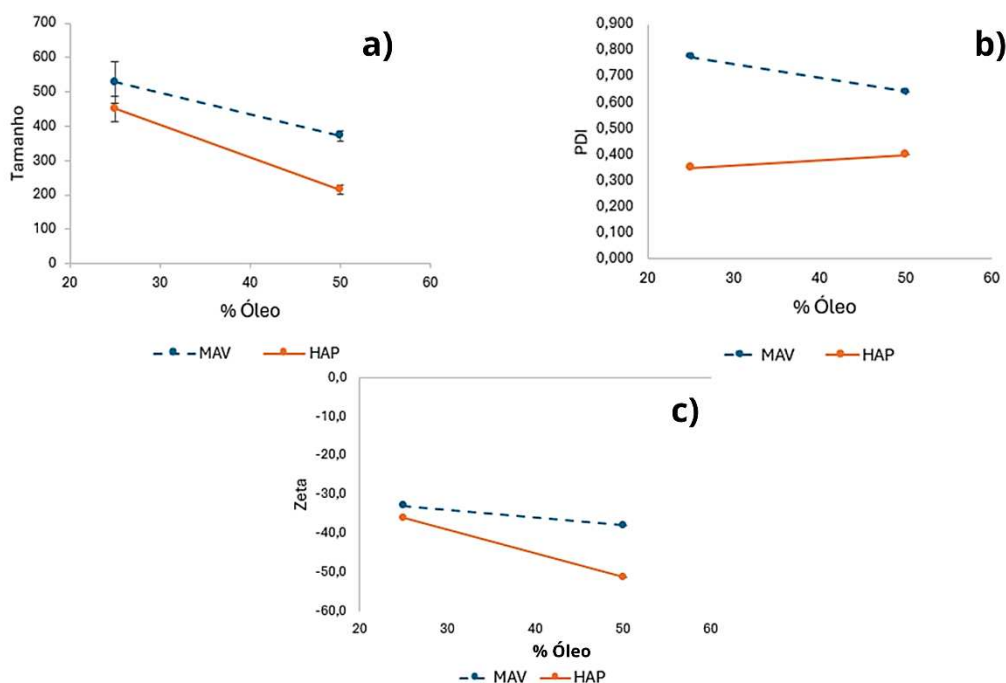


Figura 1. Diâmetro médio das partículas (a), Índice de Polidispersão (b) e Potencial Zeta (c) da emulsão (—●— MAV; —●— HAP). Legenda: MAV: mistura alta velocidade; HAP: homogeneização a alta pressão.

Todas as amostras exibiram valores de potencial zeta negativos, consistentes com a ionização de proteínas de tremço em pH 7, que está acima de seu ponto isoelétrico, levando a cargas superficiais líquidas negativas (Fig. 1-c). Os valores para as formulações MAV 25, MAV 50 e MH 25 foram estatisticamente semelhantes, variando de -33 a -38 mV. Esses valores são tipicamente suficientes para garantir repulsão eletrostática moderada entre gotículas e contribuir para a estabilização de curto prazo das emulsões. No entanto, a formulação MH 50 exibiu um potencial negativo significativamente maior (-51,2 mV), sugerindo uma barreira eletrostática mais robusta contra a agregação de gotículas. Esse aumento pode ser atribuído à combinação de menor tamanho de gotícula e maior área interfacial gerada sob homogeneização de alta pressão, o que aumenta a exposição de resíduos de proteína carregados na interface óleo-água. Além disso, a maior viscosidade de MH 50 pode ter limitado a coalescência de gotículas durante a emulsificação, reforçando a estabilização de carga.

Em estudos realizados por Ma, Habibi & Sagis (2025), a relação entre o tamanho das partículas, o grau de reticulação interna e a rigidez interfacial em complexos proteína-pectina foi destacada como um fator central para a estabilização de emulsões, indicando que partículas maiores e mais estruturadas tendem a formar interfaces mais rígidas e resistentes à deformação. Comparados aos resultados obtidos no presente estudo, pode-se supor que mecanismos análogos estejam atuando, ainda que em sistemas diferentes, uma vez que a mistura de alto

cisalhamento reduziu o tamanho das gotas e a homogeneização de alta pressão intensificou essa redução, especialmente nas formulações com maior teor de óleo, enquanto o aumento simultâneo da viscosidade da fase contínua provavelmente limitou a mobilidade das gotículas e contribuiu para a formação de uma interface mais organizada. Assim como os complexos mais reticulados no estudo de Ma, Habibi & Sagis (2025) apresentaram maior rigidez interfacial, a formulação MH 50 que exibiu gotas menores, maior área interfacial disponível e potencial zeta mais negativo pode ter desenvolvido uma interface cujo arranjo estrutural favoreça uma repulsão eletrostática mais efetiva e, portanto, uma maior resistência à agregação. Dessa forma, embora os princípios de estabilização interfacial sejam distintos entre os sistemas estudados, a comparação sugere que tanto a microestrutura das partículas quanto os efeitos combinados de formulação e processamento podem influenciar de maneira convergente a estabilidade de emulsões óleo-em-água.

As emulsões de Ma, Habibi & Sagis (2025) apresentaram distribuição unimodal com picos em torno de 1,36 μm , enquanto aquelas estabilizadas apenas com isolado proteico exibiram distribuição bimodal com picos em 2,00 μm e 17,51 μm , sugerindo maior heterogeneidade e tendência à floculação. A adição de 1% de SDS reduziu discretamente o tamanho médio das gotículas em sistemas estabilizados por isolado proteico (de 1,65 μm para 1,32 μm), mas praticamente não alterou o tamanho nas emulsões estabilizadas pelos complexos, especialmente nas proporções 0,5:1 e 0,25:1, indicando menor floculação inicial nesses sistemas. Essa menor floculação foi atribuída a interfaces mais espessas, formadas por partículas maiores ($\sim 275\text{--}580$ nm), que gerariam maior repulsão estérica mesmo com potenciais zeta semelhantes entre os tratamentos (DICKINSON, 2019).

Observa-se uma tendência, assim como os complexos isolado proteico-pectina formaram interfaces mais espessas e mais estáveis, a formulação MH 50 apresentou gotas menores (~ 200 nm), maior área interfacial e o potencial zeta mais negativo ($-51,2$ mV), sugerindo que também pode ter desenvolvido uma interface mais organizada e menos propensa à floculação. De forma semelhante ao que ocorreu com os complexos isolado proteico-pectina que resultaram em gotículas menores ($\sim 1,0$ μm) do que o isolado proteico ($\sim 1,32$ μm) a combinação de alta pressão e maior teor de óleo no presente estudo possivelmente favoreceu uma emulsificação mais eficiente e uma microestrutura menos suscetível à coalescência, reforçando o papel conjunto da formulação e do processamento na estabilidade das emulsões (MA & SHEN et al., 2024).

Diante do exposto, observa-se que as diferenças estruturais condicionadas tanto pelo processamento quanto pela fração de óleo podem ter contribuído para perfis coloidais distintos

entre as formulações, especialmente no que diz respeito ao tamanho médio das gotículas, ao PDI e ao potencial zeta. A combinação de gotas menores, maior área interfacial e valores mais negativos de potencial zeta, como observado em MH 50, sugere um arranjo interfacial potencialmente mais organizado e menos suscetível a interações. Diante disso, torna-se pertinente aprofundar a análise sobre como essas características iniciais podem influenciar a estabilidade cinética das formulações.

3.3 Estabilidade cinética de formulações de emulsão

A estabilidade cinética das emulsões foi monitorada durante um período de 24 horas a 60 °C. Os perfis Turbiscan (Fig. 2) apresentaram padrões de estabilidade distintos entre as emulsões, que foram posteriormente corroborados pela taxa de migração (Tabela 4).

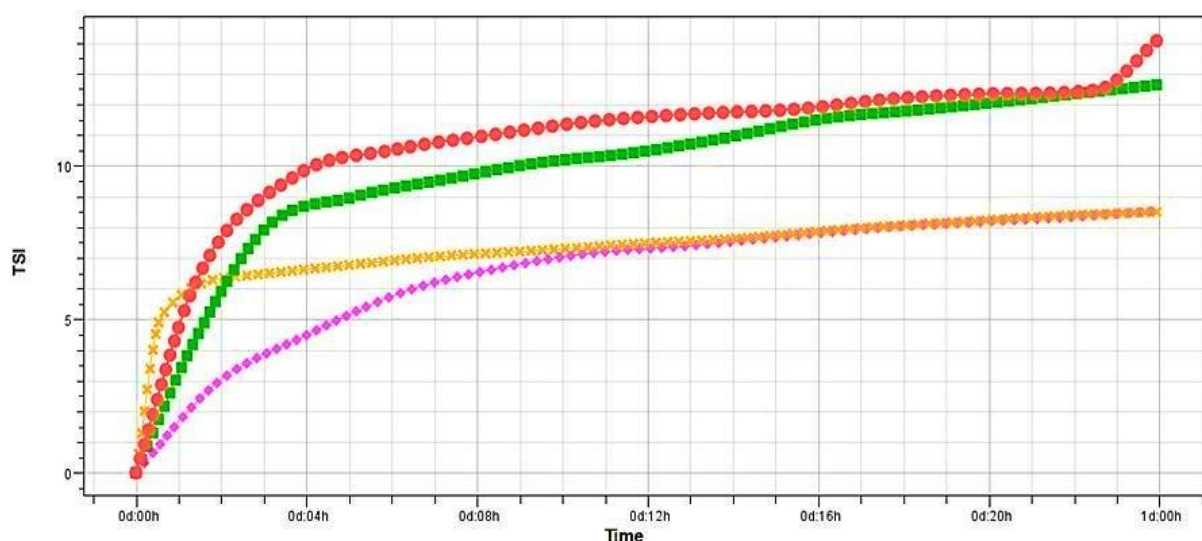


Figura 2. Índice de Desestabilização das amostras após 24 horas de análise (F1 ■ ; F2 ■ ; F3 ✕ ; F4 ☆)

As formulações menos estáveis (MAV 25 e MH 25) exibiram TSI elevados e alta taxa de migração, comportamento diretamente relacionado ao maior tamanho de gotículas, menor potencial zeta e baixa viscosidade, um conjunto de fatores que favoreceu rápida separação de fases. Em contraste, a estabilidade observada em MH 50, caracterizada por TSI mínimo e ausência total de migração, evidencia como o teor de óleo associados ao tratamento de homogeneização aplicado corrobora com uma interface mais estável, gotículas menores e maior restrição ao movimento, retardando os mecanismos de desestabilização. Essa tendência está alinhada com os resultados descritos por Dama-Espinosa et al. (2025), os quais avaliaram emulsificantes à base de proteínas vegetais, como isolados de proteína de ervilha e soja, associados a diferentes técnicas de homogeneização; onde também relataram valores reduzidos

de TSI em sistemas processados por técnicas de alta eficiência, como a microfluidização, destacando a relação direta entre intensificação do processamento, redução do tamanho de partícula e maior resistência à separação de fases.

Tabela 4. Taxa de migração de partículas das amostras de emulsão.

FORMULAÇÕES	TAXA DE MIGRAÇÃO (mm/h)	R ²
MAV 25	5,30	0,999
MAV 50	2,16	0,964
MH 25	6,07	0,912
MH 50	0,00	N/A

Legenda: MAV 25: mistura alta velocidade com 25 % de óleo; MAV 50: mistura alta velocidade com 50 % de óleo; MH 25: mistura homogeneização alta pressão com 25 % de óleo; MH 50: mistura homogeneização alta pressão com 50 % de óleo.

As formulações MAV 25 e MH 25 (ambas contendo 25% de óleo) apresentaram os maiores valores de TSI e de taxa de migração (5,3 e 6,07 mm/h, respectivamente), indicando rápida separação de fases. Esse comportamento está associado aos maiores tamanhos de gotículas (451–528 nm), ao menor potencial zeta negativo (–33 a –36 mV), que reduz a repulsão eletrostática entre as gotículas, e à baixa viscosidade do sistema, favorecendo o movimento das partículas e acelerando os fenômenos de cremeação e coalescência.

A Tabela 3 apresenta as taxas de migração determinadas por Turbiscan para todas as formulações. A emulsão MAV 50 (50% de óleo) apresentou estabilidade intermediária, com taxa de migração de 2,16 mm/h e valores mais baixos de TSI, o que pode ser atribuído ao menor tamanho médio de gota (372 nm), potencial zeta ligeiramente mais negativo (–38 mV) e maior viscosidade (70 mPa·s), fatores que limitaram a mobilidade das gotículas e reduziram os mecanismos de desestabilização. Por outro lado, a formulação MH 50 (50% de óleo) apresentou o comportamento mais estável, sem migração detectável ao longo de todo o período experimental e os menores valores de TSI. Essa estabilidade pode ter sido originada do efeito sinérgico entre o maior teor de óleo e o método de dispersão, uma vez que o HAP promoveu a formação de gotículas menores, com distribuição de tamanho menores e potencial zeta mais negativo (–51 mV), enquanto o aumento da viscosidade do sistema restringiu ainda mais o movimento das gotículas. A Figura 3 ilustra o aspecto das emulsões após 24 h de armazenamento a 60 °C.

Figura 3: Aspecto visual de emulsões de óleo em água estabilizadas com isolado proteico de tremço branco após armazenamento por 24 h a 60 °C.



De acordo com a discussão anterior, todas as formulações, exceto MH 50, demonstraram desestabilização por cremação, seguida de clarificação, que foram os principais fenômenos observados. Não foi observada desestabilização em MH 50 durante o período de observação.

Em geral, os resultados das análises de TSI e taxa de migração confirmam que a estabilidade física da emulsão é regida pela interação entre a redução do tamanho das gotas, a carga interfacial e a viscosidade aparente. Entre as condições testadas, a MH 50 apresentou a estabilidade cinética mais robusta, ressaltando o potencial do isolado proteico de tremço branco para estabilizar emulsões com alto teor de óleo quando combinado com homogeneização de alta pressão.

4. CONCLUSÃO

Diante dos parâmetros analisados, torna-se possível levantar algumas considerações sobre como as distintas combinações entre teor de óleo e processos de homogeneização podem ter influenciado a organização estrutural das emulsões produzidas. As variações observadas em tamanho de gotícula, distribuição populacional e cargas superficiais permitem observar que diferentes arranjos coloidais possam emergir, sugerindo que certos estados microestruturais talvez se mostrem mais propensos a manter sua integridade, enquanto outros poderiam responder de forma distinta. Essas tendências, abrem espaço para reflexões mais amplas sobre como a dinâmica interfacial e a composição podem influenciar para comportamentos estruturais específicos quando submetidos a novas condições físico-químicas. Nesse sentido, as observações aqui reunidas podem servir como um ponto de partida para explorar etapas

subsequentes do sistema, principalmente aquelas em que fenômenos de reorganização tridimensional como os envolvidos no processo de gelificação passam a desempenhar papel central.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARNOLDI, A. et al. The health benefits of sweet lupin seed flours and isolated proteins. **Journal of Functional Foods**, v. 18, p. 550–563, out. 2015.

AOAC (2005). Official methods of analysis of AOAC International. In W. H. G. W. Latimer (ED.), Food composition; additives; natural contaminants (18th ed., Vol. II). California, USA.

BADER S, BEZ J, EISNER P (2011) Can protein functionalities be enhanced by high-pressure homogenization? A study on functional properties of lupin proteins. **Procedia Food Sci** 1:1359–1366.

BURGOS-DÍAZ, C. et al. Emulsifying and Foaming Properties of Different Protein Fractions Obtained from a Novel Lupin Variety Alu Prot -CGNA® (*Lupinus luteus*). **Journal of Food Science**, v. 81, n. 7, p. C1699–C1706, jul. 2016.

BOUKID, F., PASQUALONE, A. (2022). Lupine (*Lupinus* spp.) proteins: characteristics, safety and food applications. **Eur Food Res Technol**, Vol. 248, p. 345–356.

CHUKWUEJIM, S & ALUKO, R. (2024). Comparative study of the emulsifying properties of blue lupin, White lupin, and soybeans protein isolates. **LWT**. Vol. 206. Aug.

C.R.L. FRANCISCO, T.P. SANTOS, R.L. CUNHA. Nano and micro lupin protein-grape seed extract conjugates stabilizing oil-in-water emulsions. **Food Hydrocolloids**, 135 (2023), Article 108117.

DAMAS-ESPINOZA, JUAN A., LILIANA ALAMILLA-BELTRÁN, DIANA E. LEYVA-DANIEL, FIDEL VILLALOBOS-CASTILLEJOS, HUMBERTO HERNÁNDEZ-SÁNCHEZ, AND ANTONIO R. JIMÉNEZ-APARICIO. (2025). "Combined Effect of Plant Protein Isolate Content and the Homogenization Processes on the Physical Stability of Oily Extract

Emulsions" *Foods* 14, no. 21: 3717.

E. DICKINSON. Strategies to control and inhibit the flocculation of protein-stabilized oil-in-water emulsions. *Food Hydrocolloids*, 96 (2019), pp. 209-223.

ERBAS, M. The Effects Of Different Debittering Methods On The Production Of Lupin Bean Snack From Bitter *Lupinus Albus L.* Seeds. *Journal of Food Quality*, v. 33, n. 6, p. 742–757, dez. 2010.

GULISANO, A. et al. Genetics and Breeding of *Lupinus mutabilis*: An Emerging Protein Crop. *Frontiers in Plant Science*, v. 10, n. October, p. 1–13, 2019.

GUZMÁN, T. J. et al. Effect of the acute and chronic administration of *Lupinus albus* β -conglutin on glycaemia, circulating cholesterol, and genes potentially involved. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, v. 133, n. November 2020, p. 110969, jan. 2021.

LAMRABET, M. et al. Phylogenetic and symbiotic diversity of *Lupinus albus* and *L. angustifolius* microsymbionts in the Maamora forest, Morocco. *Systematic and Applied Microbiology*, v. 45, n. 4, p. 126338, jul. 2022.

L. DEVKOTA, K. KYRIAKOPOULOU, D. FERNANDEZ, R. BERGIA, S. DHITAL. Techno-functional and rheological characterisation of protein isolates from two Australian lupin species as affected by processing conditions, *International Journal of Food Science and Technology*, Volume 59, Issue 2, fevereiro de 2024, páginas 774–784.

PLUSTEA, L. et al. Lupin (*Lupinus* spp.)-Fortified Bread: A Sustainable, Nutritionally, Functionally, and Technologically Valuable Solution for Bakery. *Foods*, v. 11, n. 14, p. 2067, 12 jul. 2022.

MONTEIRO, M. R. P. et al. Evaluation of the chemical composition, protein quality and digestibility of lupin (*Lupinus albus* and *Lupinus angustifolius*). *O Mundo da Saúde*, v. 38, n. 3, p. 251–259, 30 set. 2014.

OLIVEIRA, C. T. **Determinação do perfil lipídico e obtenção de extrusados de grãos e**

farinhas de tremço branco (lupinus albus) obtenção de extrusados de grãos e farinhas de tremço branco (lupinus albus). Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.

PRUSINSKI, J. White lupin (*Lupinus albus* L.) - Nutritional and health values in human nutrition - A review. **Czech Journal of Food Sciences**, v. 35, n. 2, p. 95–105, 2017.

QUEZADA, C. et al. (2024). Plant-based oil-in-water food emulsions: exploring the influence of different formulations on their physicochemical properties. **Journals Foods**, v. 13. 2024.

RAMOS, L. et al. (2024) Technical-functional and surface properties of White common bean proteins (*Phaseolus vulgaris* L.): Effect of pH, protein concentration, and guar gum presence. **Food Research International**, Vol. 192, pag. 114809.

RAWAL, K. et al. (2024) Enhancing the storage stability and shelf-life of plant-based pickering emulsions through emulgel formation. **Innovative food Science & Emerging Technologies**. Vol. 97. Oct.

SANDOVAL-MUÑOZ, R. DE J. et al. Lupin gamma conglutin protein: effect on Slc2a2, Gck and Pdx-1 gene expression and GLUT2 levels in diabetic rats. **Revista Brasileira de Farmacognosia**, v. 28, n. 6, p. 716–723, 1 nov. 2018.

TIRGARIAN, B.; FARMANI, J.; MILANI, J. (2023). Edible oleofilms with high vegetable oil content obtained from novel soy protein isolate/gelatin/chitosan nanofiber emulgels. **Food Hydrocolloids**. Vol. 134. Jan.

TOUNSI-HAMMAMI, S. et al. Genetic diversity of rhizobia associated with root nodules of white lupin (*Lupinus albus* L.) in Tunisian calcareous soils. **Systematic and Applied Microbiology**, v. 42, n. 4, p. 448–456, jul. 2019.

VAN DE NOORT, M. Lupin: An Important Protein and Nutrient Source. In: **Sustainable Protein Sources**. [s.l.] Elsevier Inc., 2016. p. 165–183.

VOGELSANG-O'DWYER M, BEZ J, PETERSEN IL. (2020) Techno-functional, nutritional and environmental performance of protein isolates from blue lupin and white lupin. **Foods**.9:230.

VOGELSANG-O'DWYER, M., SAHIN, A., ZANNINI, E., ARENDT, E. Physicochemical and nutritional properties of high protein emulsion-type lupin-based model milk alternatives: effect of protein source and homogenization pressure. **Journal of the Science of Food and Agriculture**. Volume 102, Issue 12 pp. (2021). 5086-5097.

WILCZURA, P. et al. Colorimetric vs. Chromatographic analyses of alkaloids in lupin seeds. **Plant Breeding and Seed Science**, v. 78, p. 63–67, 2018.

X. MA, P. SHEN, M. HABIBI, L.M. SAGIS. Interfacial properties and functionality of lupin protein-pectin complexes at the air-water interface. **Food Hydrocolloids** (2024), p. 110050.

XINGFA MA, MEHDI HABIBI, LEONARD M.C. SAGIS, Particle size and morphological features of lupin protein-pectin complexes affect the oil-water interfacial properties and emulsion stabilization, **Food Hydrocolloids**, Volume 168, 2025, 111497.

YAVER, E.; BILGIÇLI, N. Ultrasound-treated lupin (*Lupinus albus* L.) flour: Protein- and fiberrich ingredient to improve physical and textural quality of bread with a reduced glycemic index. **LWT**, v. 148, p. 111767, 1 ago. 2021.

CAPÍTULO 2 - Características de textura e derretimento de géis contendo proteínas isoladas de tremço branco (*Lupinus albus*).

RESUMO

O desenvolvimento de análogos de queijo à base de plantas (plant-based) enfrenta o desafio tecnológico de mimetizar as propriedades funcionais das matrizes lácteas, especialmente a textura e a fusibilidade. Este estudo objetivou elaborar e caracterizar géis proteicos à base de isolado de tremço branco (*Lupinus albus*) e amido de milho, avaliando o impacto da adição de uma fase lipídica emulsionada nas propriedades físico-químicas e reológicas. Foram analisadas quatro matrizes distintas: duas formulações experimentais contendo isolado proteico e amido, sendo uma isenta de gordura (F1) e outra contendo 5% de emulsão de óleo de girassol (F2), comparadas a duas referências comerciais (FC: queijo mussarela tradicional; FV: queijo vegano comercial). As amostras foram submetidas a análises de umidade, atividade de água (a_w), Perfil de Textura (TPA) e capacidade de derretimento. Os resultados indicaram que a matriz láctea (FC) apresentou a maior umidade e fusibilidade completa, impulsionada pela mobilidade da gordura e das caseínas. Em contraste, os géis de tremço (F1 e F2) exibiram alta estabilidade térmica com resistência ao derretimento, comportamento atribuído à gelatinização do amido e à reticulação proteica induzida pelo cloreto de cálcio, que restringiram a mobilidade da rede. A incorporação da emulsão em F2 reduziu significativamente a umidade e a a_w , além de modular a textura, promovendo um perfil mais equilibrado de coesividade e gomosidade em comparação à rigidez observada em F1. Conclui-se que o isolado de tremço é eficaz na formação de géis estruturados e com boa integridade mecânica, porém, a obtenção de fusibilidade semelhante à do queijo tradicional requer ajustes adicionais no balanço entre proteínas, hidrocoloides e sais fundentes para superar a rigidez térmica da matriz vegetal.

Palavras-chave: *Lupinus albus*; Géis de emulsão; Análogos de queijo; Textura; Fusibilidade; Proteína vegetal.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de alimentos à base de plantas, especialmente aqueles destinados a atuar como análogos de produtos lácteos tradicionais, vem despertando crescente interesse no setor alimentício e no meio científico, levando à necessidade de explorar, de maneira cada vez mais detalhada, os fatores que podem influenciar sua qualidade sensorial e funcional. Entre esses produtos, as alternativas vegetais a queijos têm recebido atenção particular, uma vez que sua aceitação depende de atributos considerados essenciais pelos consumidores, como textura, elasticidade e capacidade de fusão (ZHANG et al., 2025).

A maneira pela qual esses sistemas se comportam quando submetidos ao aquecimento

especialmente no que diz respeito ao espalhamento, à coesão e à forma como a matriz responde à transferência de calor pode estar relacionada a um conjunto complexo de propriedades estruturais. Ainda assim, a literatura disponível sugere que muitas dessas relações permanecem pouco compreendidas, abrindo espaço para discussões mais amplas sobre como ingredientes, processamento e organização interna podem influenciar a fusibilidade de alimentos plant-based (DEKKERS, BOOM e VAN DER GOOT, 2018; JIA et al., 2021; SCHREUDERS et al., 2021).

Outro ponto recorrente em produtos comerciais é a presença de amidos como constituintes principais de sua estrutura (WEI & YANO, 2020). Dependendo de sua origem, grau de modificação e forma de interação com outros componentes, esses carboidratos podem apresentar comportamentos térmicos distintos, que nem sempre se assemelham aos observados em queijos tradicionais. Processos como oxidação, entrecruzamento ou hidrólise enzimática podem alterar, em diferentes níveis, a capacidade do amido de formar redes estáveis, o que pode levar os formuladores a recorrer à inclusão de lipídios, proteínas ou hidrocolóides adicionais para ajustar propriedades como elasticidade, firmeza ou fusibilidade (MOHD SHUKRI et al., 2021).

Observações encontradas na literatura apontam que a gordura e os isolados proteicos são frequentemente utilizados para colaborar com aspectos quanto à textura, uma vez que podem participar, de maneiras diversas, da organização espacial dos componentes e das respostas estruturais do produto quando exposto ao calor. Ainda assim, os efeitos dessas interações parecem depender não apenas da origem e concentração desses ingredientes, mas também da fração volumétrica de gordura e da forma como a fase contínua se organiza ao redor das gotículas lipídicas (GROSSMANN & MCCLEMENTS, 2021).

Nesse contexto, os sistemas gelificados se destacam como matrizes particularmente interessantes para investigar a fusibilidade de produtos plant-based, já que podem apresentar arquiteturas internas bastante distintas. Entre eles, os géis de emulsão constituem um tipo de estrutura em que gotículas de óleo se encontram dispersas em uma rede contínua, atuando potencialmente como elementos capazes de alterar a forma como o gel se rompe, escorre ou se reorganiza quando aquecido (MEFLEH et al., 2021). A literatura também menciona a existência de géis de emulsão estabilizados por proteínas, nos quais as gotículas lipídicas parecem integrar-se à rede tridimensional contínua de maneira mais firme, podendo contribuir para alterações no comportamento mecânico e térmico. Em sistemas desse tipo, discutem-se possibilidades de que o óleo desempenhe papéis variados, ora como elemento lubrificante que facilitaria o escoamento da fase derretida, ora como componente estruturante que poderia modificar a rigidez ou a resistência da matriz em condições térmicas variadas (ZHANG et al., 2022).

Diante disso, o presente estudo objetivou-se na elaboração e comparação de quatro matrizes distintas, permitindo observar contrastes estruturais e funcionais. As formulações desenvolvidas, caracterizada como sistema proteico sem emulsão, e contendo emulsão de óleo vegetal de girassol foram avaliadas em paralelo a duas referências comerciais: um queijo tradicional de matriz láctea (FC) e um queijo vegano (FV). Com isso, analisou-se como diferentes graus de complexidade estrutural, bem como a presença ou ausência de uma fase lipídica dispersa, poderiam estar associados a respostas particulares em termos de textura e capacidade de derretimento. Ao observar essas quatro matrizes, tornou-se possível verificar nuances microestruturais e variações na distribuição dos componentes que poderiam influenciar o comportamento térmico dos sistemas, contribuindo para um entendimento mais abrangente sobre as potencialidades e desafios envolvidos no desenvolvimento de géis análogos a queijos à base de plantas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O Tremoço branco (*Lupinus albus*) foi obtido na loja virtual Empório Quatro Estrelas, o óleo de girassol e amido de milho foram obtidos no comércio local da cidade de Viçosa (MG). Os reagentes químicos utilizados nas análises foram de grau analítico e pureza (PA, > 99,0%).

2.1 Produção da farinha de tremoço branco (*lupinus albus*) desengordurada e obtenção do isolado proteico

A farinha de tremoço branco foi obtida conforme descrito por Ramos et al. (2024), com modificações. O tremoço branco foi inicialmente imerso em água destilada a 5° C por 12 h para posterior remoção manual do revestimento. As leguminosas foram desidratadas (60 °C por 24 h), moídas em processador doméstico e a farinha foi padronizada por meio de peneira de 1 mm e armazenada a 4 °C. A farinha foi desengordurada usando hexano na proporção de 1:6 (p/v) em um extrator Soxhlet por 6 h de recirculação, seguido de evaporação do solvente da amostra por 12 h a 40 °C (AOAC, 2005).

Para a extração das proteínas do tremoço foi utilizado o método de extração salina segundo Silva et al. (2021). A farinha de tremoço branco (150 g) foi dispersa em 1,5 L de tampão fosfato de sódio (pH 6,5; 0,1 mol/L), na presença de NaCl (0,5 mol/L), e mantida sob agitação em manta magnética durante 12 horas em temperatura ambiente (25±1°C). Posteriormente, a suspensão foi filtrada por meio de uma membrana de nylon (tamanho do poro

0,80 μm) e o filtrado foi acidificado com solução de ácido láctico (30 % v/v) até estabilizar-se em pH 5,0 a $4,0 \pm 1$ °C, para precipitação das proteínas que posteriormente foram centrifugados (6000 rpm/15 min.). Os sólidos retidos, após a centrifugação, foram lavados com solução aquosa de ácido láctico (pH 4,0). Finalmente, os sólidos retidos foram armazenados sob refrigeração para uso posterior. A concentração de proteínas totais do isolado foi determinada utilizando-se o método de Biureto.

2.2 Formulações e Caracterização dos géis de IPTB

Inicialmente, foi preparada a emulsão óleo em água (O/A), destinada exclusivamente à formulação F2. Para isso, foram utilizados tampão fosfato de sódio (47%), óleo de girassol (50%) e isolado proteico de tremoço branco (IPTB, 3%). A mistura foi submetida a pré-emulsificação em agitador de alta velocidade (Ultra- Turrax, modelo T25, IKA, Alemanha) operando a 12.000 rpm por 1 minuto, de modo a promover a redução inicial do tamanho das gotículas.

Em seguida, a emulsão foi homogeneizada em alta pressão (Emulsiflex-C5, Avestin, Canadá) a 20.000 psi, em seis ciclos consecutivos, condição estabelecida para garantir maior uniformidade e estabilidade físico-química. Após esse processo, a emulsão foi submetida a tratamento térmico a 75 ± 1 °C por 10 minutos, etapa necessária para estabilização parcial da matriz proteica. Paralelamente, foi preparada a solução proteica base, utilizada em ambas as formulações.

Para tanto, o IPTB foi solubilizado em tampão fosfato de sódio contendo cloreto de cálcio, uma vez que este último atua como agente de reticulação, promovendo interações entre cadeias polipeptídicas e contribuindo para a formação da rede tridimensional do gel. Em etapa subsequente, o amido de milho foi disperso em tampão fosfato de sódio e submetido a aquecimento controlado a 70 °C por 5 minutos, condição suficiente para promover a gelatinização, isto é, a ruptura da estrutura granular e a disponibilização das cadeias de amilose e amilopectina para interação com a matriz proteica.

Após a gelatinização, procedeu-se à incorporação dos componentes. Na formulação F1, o amido foi adicionado diretamente à solução proteica, enquanto na formulação F2, além do amido, foi incorporada a emulsão previamente preparada, resultando em um sistema proteico-emulsionado. Finalmente, ambas as misturas foram submetidas a aquecimento a 90 °C por 30 minutos, etapa que promoveu a desnaturação das proteínas do tremoço branco e a formação de uma rede coesa, característica essencial do processo de gelificação. Os sistemas obtidos foram

moldados em formas de silicone de aproximadamente 20 mm de diâmetro por 20 mm de altura e posteriormente resfriados a 4 °C por 24 horas, para a estabilização da estrutura final dos géis.

A formulação FC, utilizada como referência, corresponde a um queijo tradicional comercial, enquanto a FV representa um queijo vegano; foram selecionadas por fornecerem contrastes estruturais relevantes em relação às formulações desenvolvidas no estudo (F1, elaborada sem emulsão, e F2, contendo emulsão). A partir desse conjunto de quatro matrizes, torna-se possível observar como diferentes composições podem interferir em respostas diferentes, motivo pelo qual todas serão submetidas a análises subseqüentes que permitirão explorar com maior profundidade suas propriedades.

Tabela 1. Concentrações das variáveis utilizadas no estudo de formação de géis.

VARIÁVEIS (% EM MASSA)	FC	FV	F1	F2
Óleo de Girassol	N.A	N.A	0	5
IPTB	N.A	N.A	20	20
Amido de Milho	N.A	N.A	10	10
Cloreto de Cálcio	N.A	N.A	1	1
Tampão Fosfato de Sódio	N.A	N.A	69	64

Legenda: FC: formulação controle – queijo tradicional comercial; FV: formulação vegana – queijo vegano comercial; F1: formulação 1 – sem emulsão; F2: formulação 2 – com emulsão.

2.3 Análise de Umidade (%) e Atividade de água (Aw)

A umidade foi determinada pela metodologia de Adolfo Lutz (2008) utilizando secagem em estufa de circulação de ar, em triplicata. Cinco gramas de cada amostra (1 e 2) foram aquecidos por 24 h a 70 °C. O teor de umidade ($U\%$) foi calculado pela Equação 1, em que n representa a perda de massa (g), e p representa a massa da amostra (g).

$$nU\% = 100 - p(1)$$

A atividade de água (a_w) foi determinada em triplicata utilizando um analisador de atividade de água (Aqualab® 4TE, Meter, Brasil). A escala varia de 0 (nenhuma água disponível) a 1 (água totalmente disponível) e é essencial para a preservação e qualidade do produto ao longo do tempo (FOOD SAFETY BRASIL, 2016).

2.4 Análise de Textura (TPA)

A análise de textura foi conduzida utilizando um texturômetro (Analisador de Testes Mecânicos, marca Instron), equipado com uma sonda (60mm) para testes de compressão. O equipamento foi calibrado de acordo com as instruções do fabricante antes da realização dos testes. As amostras de gel foram posicionadas no suporte do equipamento, onde foi realizado um teste de compressão dupla. As amostras foram comprimidas a uma taxa de 2 mm/s até uma deformação correspondente de 50% da altura original. Os dados de força registrados durante o teste foram utilizados para calcular os seguintes parâmetros texturais: dureza (força máxima durante a compressão), coesividade (área sob a curva de compressão), elasticidade (relação entre a altura original e a altura após a compressão) e mastigabilidade (produto da coesividade e elasticidade). A análise foi repetida em três repetições para cada amostra, garantindo a reprodutibilidade dos resultados. Os dados foram processados utilizando software específico para a análise de textura (VU et al., 2022).

2.5 Observação visual das propriedades de fusão

A capacidade de fusão dos géis foi avaliada utilizando um teste em estufa de acordo com metodologia utilizada por Zhihoung, Sala & Scholten (2023) com modificações. Os géis foram desenhados e colocados em placas de petri seladas com papel alumínio para evitar a evaporação da água e aquecidos a 100 °C 16 minutos, em estufa. Em seguida, as amostras foram resfriadas à temperatura ambiente por 30 minutos. Depois, fotos dos géis foram tiradas com uma câmera. Os experimentos de teste de fusão foram conduzidos em duplicata, onde as amostras foram colocadas em estufa de circulação de ar em temperatura 60 °C durante 30 minutos, e uma imagem representativa foi escolhida para cada gel.

2.6 Análise Estatística

Os resultados foram expressos como média \pm desvio padrão. A análise estatística foi realizada por meio de análise de variância (ANOVA), seguida do teste de comparações múltiplas de Tukey, adotando-se nível de significância de 5% ($p < 0,05$). As análises foram conduzidas no software R (versão 4.2.0).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise de Umidade e Atividade de água (*Aw*)

Na Tabela 2 são apresentados os valores de umidade e atividade de água das formulações experimentais de géis (F1 e F2), bem como das matrizes comerciais utilizadas como referência: o queijo vegano (FV), composto por cerca de 1% de proteína e 20% de gordura, e o queijo mussarela tradicional (FC), que possui aproximadamente 23% de proteína e 25% de gordura. A comparação entre esses sistemas possibilita observar como diferentes composições podem estar associadas a distintas capacidades de retenção de água e organização estrutural, considerando que níveis mais elevados de proteína ou gordura tendem a influenciar tanto o aprisionamento de água quanto a dinâmica das interações entre fases (SILVA et al., 2021). Nesse contexto, as formulações F1 e F2, desenvolvidas com isolado proteico de tremçoço branco, apresentam perfis de umidade e *aw* que podem ser interpretados com base nas diferenças na proporção de óleo, da distribuição dos componentes e do modo como essas variáveis modulam a densidade da rede formada (SOUZA et al., 2017). A partir desses valores, torna-se possível observar sobre o comportamento mecânico e térmico dos géis, uma vez que a disponibilidade de água e o grau de hidratação da matriz desempenham papel central na textura, na fusibilidade e na estabilidade dos produtos que buscam mimetizar queijos convencionais (SHARMA & AMINI, 2018).

Tabela 2. Atividade de água e umidade das formulações de géis de IPTB.

FORMULAÇÃO	UMIDADE (%)	<i>aw</i>
FC	75,9 ± 6,5 ^a	0,96 ± 0,01 ^a
FV	61,4 ± 12,0 ^b	0,96 ± 0,01 ^a
F1	60,4 ± 4,1,0 ^b	0,90 ± 0,2 ^a
F2	45,6 ± 0,01 ^c	0,87 ± 0,01 ^a

Os valores são apresentados como média ± desvio padrão. Médias seguidas pela mesma letra minúscula dentro de cada coluna de pH não diferiram significativamente ($p > 0,05$). Legenda: FC: formulação controle – queijo tradicional comercial; FV: formulação vegana – queijo vegano comercial; F1: formulação 1 – sem emulsão; F2: formulação 2 – com emulsão.

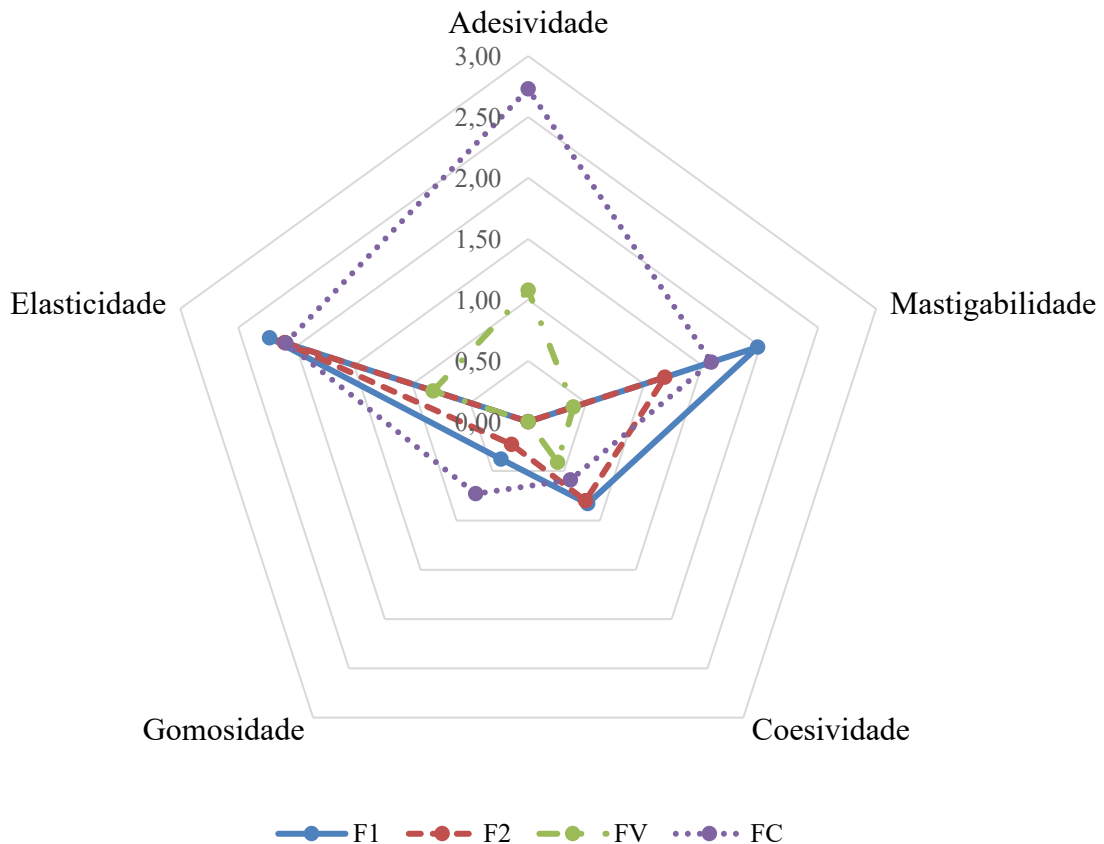
A formulação FC, apresentou o maior teor de umidade ($75,9\pm 6,5\%$), mantém elevada atividade de água ($0,96\pm 0,01$), sugerindo uma rede menos densa, capaz de reter maior volume de fase aquosa. Esse comportamento pode estar relacionado à interação incompleta entre proteína e fase lipídica, resultando em maior mobilidade de água e consequente influência sobre propriedades mecânicas, como mastigabilidade e elasticidade. Em contrapartida, F2 apresentou o menor conteúdo de água ($45,6\pm 0,01\%$) e a_w ($0,87\pm 0,01$), indicando maior compactação da rede, possivelmente favorecida por interações proteína-proteína mais extensas, além da interferência lipídica. Já FV e F1, estatisticamente semelhantes entre si em umidade ($61,4\pm 12,0\%$ e $60,4\pm 4,1\%$), mas distintos quanto à a_w ($0,96\pm 0,01$ e $0,90\pm 0,2$, respectivamente), evidenciam que o teor de água total não necessariamente reflete sua disponibilidade, revelando que a forma como a água se distribui e se associa à matriz é determinante para a estabilidade físico-química. Nesse contexto, a incorporação do óleo pode atuar como elemento modulador quando disperso em emulsão.

Em estudo comparativo sobre a caracterização de tofus elaborados a partir de soja e tremoço, Jayasena, Khu & Nasar-Abbas (2008) reportaram valores de umidade variando entre 83,1% e 86,4%, diretamente associados à redução do teor de soja e consequente substituição por tremoço. De forma semelhante, ao desenvolver queijos análogos combinada com amidos de milho e de tapioca, Mattice e Marangoni (2020) observaram teores de umidade entre 62,89% e 68,76%, os quais diminuíram proporcionalmente ao aumento da concentração de zeína, que alcançou até 40% da formulação.

3.2 Análise de Textura (TPA)

O gráfico 1 apresenta os parâmetros de textura (mastigabilidade, coesividade, gomosidade e elasticidade) determinados das formulações F1 e F2 (géis experimentais contendo IPTB), FV e FC.

Gráfico 1. Análise comparativa de parâmetros texturais (TPA) nas formulações.



A análise dos parâmetros texturais (TPA) entre as formulações F1, F2, FV e FC revela variações que refletem diferenças na estrutura física e na percepção sensorial dos produtos. Cada formulação apresenta um perfil distinto, evidenciando o impacto das variações composicionais ou processuais sobre a textura final. A formulação FC destaca-se por apresentar o maior valor de adesividade, indicando uma tendência a aderência à superfície oral ou utensílios. Essa característica pode ser indesejável em produtos que exigem liberação rápida ou menor pegajosidade, mas pode ser vantajosa em formulações que buscam maior retenção de sabor ou sensação de cremosidade.

Por outro lado, a formulação F1 apresenta os maiores valores de mastigabilidade e elasticidade, sugerindo uma matriz mais firme e resistente à deformação. Esses atributos são geralmente associados a produtos com maior integridade estrutural, como snacks ou produtos cárneos reestruturados, onde a resistência à mastigação é valorizada.

A formulação FV demonstra característica intermediária em coesividade e gomosidade, o que pode indicar uma textura mais uniforme e estável, com boa capacidade de manter sua forma durante o consumo. Essa combinação pode ser interessante para produtos que exigem

consistência sem excessiva dureza ou adesividade. Já a formulação F2 apresenta um perfil mais equilibrado entre os parâmetros, sem picos acentuados, o que pode representar uma alternativa versátil para aplicações que demandam moderação nas características texturais, como produtos voltados para públicos com restrições alimentares ou sensoriais.

De modo geral, observa-se que a presença de óleo, seja na emulsão teste ou em formulações comerciais, influenciou diretamente as propriedades texturais, aumentando parâmetros como adesividade, mastigabilidade, gomosidade e elasticidade, embora tenha reduzido a coesividade em comparação à formulação sem adição lipídica (F1) (MAFALDO, 2019). Os resultados obtidos evidenciam que a presença de gordura, água e proteína, são determinantes na estruturação de géis (SOUZA et al., 2017). A formulação FC, que é a formulação comercial, possui uma lista de ingredientes que corroboram para que o produto seja estruturado, pela presença das proteínas do leite sugerindo a formação de uma matriz mais densa e resistente à deformação, porém, torna-se necessário a verificação de outras matrizes utilizando esses valores e percentuais como referência. As demais formulações que possuem proteínas vegetais em sua composição (F1, F2 e FV) apresentaram valores semelhantes para os parâmetros analisados. A inserção de uma matriz lipídica emulsionada atuou como fase dispersa, a qual interage com a rede proteica, reforçando sua estrutura e aumentando a consistência, enquanto a água contribui para a plasticidade e suavidade da textura. Dessa forma, formulações com maior teor de lipídios geraram géis mais consistentes, mastigáveis e resistentes à quebra, semelhante à formulação comercial (SHARMA & AMIN, 2018).

Em estudos realizados por Mafaldo (2019), os resultados das formulações de queijos veganos se assemelham aos observados neste trabalho. A adesividade e a elasticidade foram maiores nas formulações com gordura, indicando o papel dos lipídios em colaborar com a rede proteica. Já a mastigabilidade e dureza foram parâmetros que apresentaram valores significativos onde associaram este fato à combinação entre água e gordura, a qual modulou diretamente a consistência, firmeza e cremosidade final. Os análogos de queijo à base de leguminosas apresentam textura mais firme, mastigável e menos coesa quando comparados a queijos convencionais, mas destacam seu potencial como alternativa mais saudável e sustentável dentro do mercado de queijos vegetais. Além disso, esses produtos podem atuar como veículos para o aumento do consumo de leguminosas, embora se ressalte a importância de estudos complementares de aceitabilidade sensorial e otimização de sabor, por meio da utilização de culturas microbianas starter, para ampliar sua viabilidade tecnológica e mercadológica (FERAWATI et al. 2021).

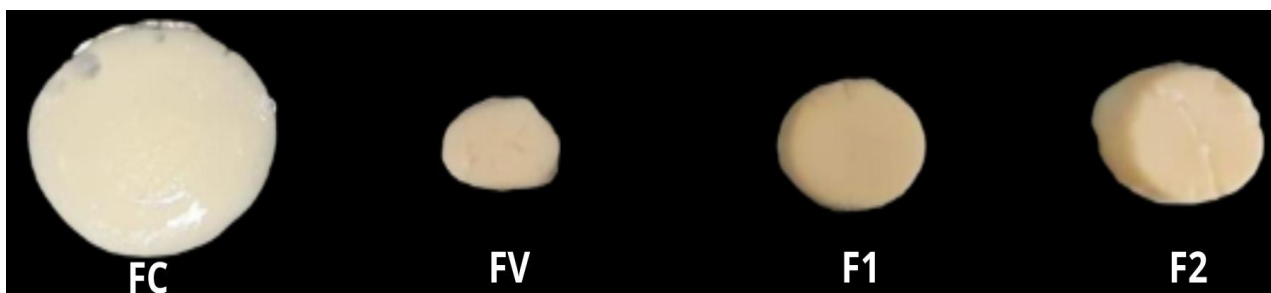
3.3 Propriedades de fusão – derretimento dos géis

Quatro formulações foram avaliadas: queijo mussarela comercial (FC), queijo vegano de castanha de caju comercial (FV) e duas formulações experimentais (F1 e F2) contendo proteínas isoladas de tremço (IPTB), amido de milho, cloreto de cálcio e tampão fosfato de sódio (Figura 1). As amostras foram cortadas e dispostas em placas de petri seladas com papel alumínio para minimizar a evaporação da água e evitar a formação de crostas superficiais.

Figura 1. Formulações analisadas quanto à capacidade de derretimento.



Figura 2. Formulações analisadas após o derretimento.



Os resultados demonstraram diferentes comportamentos térmicos entre as amostras, conforme apresentado na Figura 2, sugerindo que a capacidade de fusão está fortemente relacionada à composição e interação dos ingredientes. O queijo mussarela comercial (FC) apresentou fusão completa. Além disso, o teor de gordura (30-40% para queijos mussarelas comerciais) contribui para a mobilidade das cadeias proteicas, facilitando a transição para um estado líquido (LYU, SALA & SCHOLTEN, 2023).

Por outro lado, o queijo vegano (FV) exibiu fusão parcial, o que pode estar relacionado à presença de componentes como o cloreto de cálcio e polissacarídeos, como o amido. O cloreto de cálcio pode promover ligações iônicas entre moléculas de proteína, favorecendo a formação de uma rede mais estável e menos propensa a se fundir completamente. Já o amido, ao

gelatinizar, retém água e aumenta a viscosidade da matriz, limitando a mobilidade dos lipídios e proteínas durante o aquecimento. Essa combinação pode ter resultado em uma estrutura que se deforma parcialmente com o calor, mas não apresenta fusão completa como observado em queijos convencionais (LYU, SALA & SCHOLTEN, 2023).

Em estudos realizados por Lyu, Sala e Scholten (2023), observou-se que queijos processados comerciais apresentaram fusão completa em função do enfraquecimento da rede de caseína, enquanto queijos plant-based mantiveram módulo elástico elevado mesmo após o aquecimento, o que dificultou a fusão total. Resultados semelhantes foram identificados neste trabalho, em que a mussarela comercial apresentou fusão completa, enquanto o queijo vegano (FV) exibiu apenas fusão parcial. De modo análogo ao sistema modelo descrito pelos autores quanto ao queijo vegano, que apresentou redução do módulo elástico sem colapso estrutural, as formulações experimentais contendo isolado proteico de tremoço, amido e cloreto de cálcio também mostraram estabilidade sob aquecimento, deformando-se parcialmente, mas sem liquefação total. Esses paralelos reforçam que tanto os sistemas modelos estudados quanto as formulações à base de leguminosas possuem limitações de fusibilidade associadas à presença de polissacarídeos e sais cálcicos, indicando a necessidade de ajustes de composição para alcançar comportamento mais próximo ao de queijos convencionais.

4. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos para umidade, atividade de água, textura e comportamento de fusão, torna-se possível considerar que as diferenças observadas entre as quatro formulações podem estar associadas às variações composicionais e estruturais presentes em cada sistema. As distinções nos teores de água e na disponibilidade hídrica podem indicar possíveis influências sobre o grau de hidratação da matriz e sobre a maneira como a rede interna poderia estar organizada. De modo semelhante, os parâmetros texturais podem sugerir que a interação entre proteína, água e fração lipídica desempenhe um papel na forma como cada gel responde à deformação mecânica, podendo refletir tanto em maior resistência quanto em menor coesão, dependendo da distribuição e da capacidade de interação entre as fases. Esses aspectos, por sua vez, poderiam estar relacionados ao comportamento térmico, uma vez que estruturas mais compactas ou mais hidratadas tendem a apresentar respostas diferentes durante o aquecimento, variando desde maior propensão à fusão até manutenção parcial da integridade. Assim, os resultados reunidos podem oferecer indícios sobre como a composição e a microestrutura de cada matriz poderiam influenciar suas propriedades físico-químicas e

funcionais, abrindo espaço para reflexões mais amplas acerca dos elementos que possivelmente modulam a qualidade e o desempenho de géis análogos a queijos.

5. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

A. MOHD SHUKRI, A. KARIM ALIAS, M. MURAD, K.S. YEN, L.H. CHENG. A review of natural cheese and imitation cheese. **Journal of Food Processing and Preservation**. (2021).

AOAC (2005). Official methods of analysis of AOAC International. In W. H. G. W. Latimer (ED.), Food composition; additives; natural contaminants (18th ed., Vol. II). California, USA.

DEKKERS, B., BOOM, R., VAN DER GOOT. Structuring processes for meat analogues. **Trends in Food Science & Technology**, 81 (2018), pp. 25-36, DOI: 10.1016/j.tifs.2018.08.011.

F.K.G. SCHREUDERS, L.M.C. SAGIS, I. BODNÁR, P. ERNI, R.M. BOOM, A.J. VAN DER GOOT. Mapping the texture of plant protein blends for meat analogues **Food Hydrocolloids**, 118 (2021), 10.1016/j.foodhyd.2021.106753.

FERAWATI, F.; HEFNI, M.; ÖSTBRING, K.; WITTHÖFT, C. The Application of Pulse Flours in the Development of Plant-Based Cheese Analogues: Proximate Composition, Color, and Texture Properties. **Foods** 2021, 10, 2208.

FOOD SAFETY BRAZIL, 2016. Difference between Water Activity (aw) and Moisture Content in Foods. Disponível em: [Acesso em 30 de agosto de 2024].

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 4. ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. 1020 p.

JAYASENA, VIJAY; NASAR-ABBAS, SYED M.; YII, YANG JENG; SENARATNA, MALA. Development of lupin based low cost, high fibre and high protein innovative foods. In: **PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INNOVATIONS IN FOOD PROCESSING TECHNOLOGY AND ENGINEERING (ICFPTE'08)**, 2009, Pathumthani, Thailand. Asian Institute of Technology, 2009.

L. GROSSMANN, D.J. MCCLEMENTS. The science of plant-based foods: Approaches to create nutritious and sustainable plant-based cheese analogs. **Trends in Food Science & Technology**, 118 (2021), pp. 207-229, DOI: 10.1016/j.tifs.2021.10.004.

LINA ZHANG, XINYU WANG, XIAOXI QI, GUOFANG ZHANG, VOROZHEIKINA NATALIA, LIBO LIU, ZHICHENG CHEN, QUAN SU, JIAZHOU WEI, CHUN LI. Effects of Sanxan gum on the physical and structural properties of hemp protein plant-based cheese, **LWT**, Volume 224, 2025, 117847,

ZHIHONG LYU, GUIDO SALA, ELKE SCHOLTEN. Melting properties of vegan cheese: Effect of emulsion and protein addition on the thermal behaviour of starch gels. **Food Hydrocolloids**. Volume 144, 2023,108917, ISSN 0268-005X.

MAFALDO, I. M. (2019). **Desenvolvimento de “queijo vegetal” cremoso probiótico a base de amendoim (Arachis hypogaea)**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal da Paraíba.

MATTICE KD, MARANGONI AG. Evaluating the use of zein in structuring plant-based products. **Curr Res Food Sci**. 2020 Mar 21;3:59-66. PMID: 32914121; PMCID: PMC7473336.

M. MEFLEH, A. PASQUALONE, F. CAPONIO, M. FACCIA. Legumes as basic ingredients in the production of dairy-free cheese alternatives: A review **Journal of the Science of Food and Agriculture** (2021).

RAMOS, L. et al. Technical-functional and surfasse properties of White common bean proteins (*Phaseolus vulgaris* L.): Effect of pH, protein concentration, and guar gum presence. **Food Research International**, Vol. 192, pag. 114809, 2024.

SILVA, R. et al. Extraction, purification by cation exchange supermacroporous cryogel and physico-chemical characterization of γ -conglutin from lupin seeds (*Lupinus albus* L.), **Journal of Separation Science**, August, 2021, pp. 1-10, DOI: 10.1002/jssc.202100675.

SOUZA, I. A. et al. Qualidade microbiológica de queijo minas frescal comercializado na zona da mata mineira. **Rev. Inst. Laticínios Cândido Tostes**, Juiz de Fora, v. 72,

n. 3, p. 152- 162, jul/set, 2017.

SHARMA, P.; SHARMA, D.; AMIN, A. Development of a functional fermented peanutbased cheese analog using probiotic bacteria. *Journal of Biotechnology, Computational Biology and Bionanotechnology*. vol. 99(4) C pp. 435–441 C 2018.

Y. ZHANG, M. XU, X. ZHANG, Y. HU, G. LUAN. Application of zein in gluten-free foods: A comprehensive review. **Food Research International**, 160 (2022), Article 111722, DOI: 10.1016/j.foodres.2022.111722.

VU. G. et al (2022). Impact of cooking method on properties of beef and plant-based burgers: Appearance, texture, thermal properties, and shrinkage. **Journal of Agriculture and Food Research**. Volume 9, setembro, 100355. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100355>.

W. JIA, E. RODRIGUEZ-ALONSO, M. BIANEIS, J.K. KEPPLER, A.J. VAN DER GOOT. Assessing functional properties of rapeseed protein concentrate versus isolate for food applications. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, 68 (2021), DOI: 10.1016/j.ifset.2021.102636.

W. WEI, H. YANO. Development of “new” bread and cheese. **Processes** (2020).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A articulação entre os resultados obtidos para emulsões e géis permite levantar reflexões sobre o papel das proteínas vegetais em sistemas alimentares estruturados. Ao considerar o comportamento do isolado proteico de tremço branco em comparação a matrizes comerciais como o queijo mussarela tradicional (FC) e um produto vegetal já estabelecido (FV) torna-se possível visualizar como diferentes arranjos físico-químicos respondam às variações de composição, processamento e organização interna. Os valores apresentados para umidade e atividade de água nas formulações de géis, por exemplo, podem sugerir caminhos interpretativos que aproximam a compreensão da hidratação, da mobilidade dos constituintes e da possível formação de redes mais ou menos coesas, convidando a pensar em como esses fatores poderiam influenciar atributos funcionais posteriores.

Nesse cenário, a integração entre as discussões sobre comportamento interfacial em emulsões e formação de redes tridimensionais em géis cria um ponto de encontro no qual o tremço se insere como um ingrediente capaz de suscitar hipóteses sobre sua relevância tecnológica. Ao mesmo tempo, as diferenças observadas entre os sistemas analisados tendem a estimular questionamentos sobre como proporções de óleo, interações proteína-lipídio e condições de processabilidade poderiam atuar como moduladores de estabilidade, reologia e textura.

Dessa forma, este trabalho não apenas reúne elementos que ampliam a compreensão sobre proteínas de leguminosas em sistemas complexos, mas também corrobora para a elaboração de estudos futuros, nos quais abordagens mais específicas, variações metodológicas e novas combinações de ingredientes possam aprofundar a interpretação dos fenômenos aqui delineados.