

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ISRAEL JOVINO CANESCHI

PRODUÇÃO DE GÉIS ALIMENTÍCIOS A PARTIR DO ISOLADO PROTEICO DE SOJA  
USANDO CONGELAMENTO COMO TECNOLOGIA ESTRUTURANTE

CURITIBA

2025

ISRAEL JOVINO CANESCHI

PRODUÇÃO DE GÉIS ALIMENTÍCIOS A PARTIR DO ISOLADO PROTEICO DE SOJA  
USANDO CONGELAMENTO COMO TECNOLOGIA ESTRUTURANTE

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação  
em Engenharia de Alimentos, Setor de Tecnologia,  
Universidade Federal do Paraná, como requisito à  
obtenção do título de Mestre em Engenharia de  
Alimentos.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Maria Lucia Masson

CURITIBA

2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Caneschi, Israel Jovino

Produção de géis alimentícios a partir do isolado proteico de soja usando congelamento como tecnologia estruturante. / Israel Jovino Caneschi. – Curitiba, 2025.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Lucia Masson

1. Alimentos - Análogos de carne. 2. Alimentos – Congelamento. 3. Anisotropia. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos. III. Masson, Maria Lucia. IV. Título.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA DE ALIMENTOS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **ISRAEL JOVINO CANESCHI**, intitulada: **PRODUÇÃO DE GÉIS ALIMENTÍCIOS A PARTIR DO ISOLADO PROTEICO DE SOJA USANDO CONGELAMENTO COMO TECNOLOGIA ESTRUTURANTE**, sob orientação da Profa. Dra. MARIA LUCIA MASSON, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 08 de Agosto de 2025.

Assinatura Eletrônica

12/08/2025 17:44:45.0

MARIA LUCIA MASSON

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

13/08/2025 11:56:10.0

AGNES DE PAULA SCHEER

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

12/08/2025 21:33:27.0

MÁRCIA CRISTINA TEIXEIRA RIBEIRO VIDIGAL

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA)

Dedico este trabalho aos meus pais, Aloísio e Rosimar, e à memória da minha avó,  
Dona Nega, que, mesmo diante do medo e da incompreensão, sonharam os meus sonhos  
como se fossem seus.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à vida pelos caminhos que me trouxeram até aqui e por me permitir seguir em direção aos meus sonhos.

Aos meus pais, pelo incentivo constante e por serem a base da minha trajetória, e às minhas irmãs, pelo apoio e compreensão incondicional.

Ao meu sogro e à “sogra”, pelo carinho e por fazerem do afeto um lar.

Ao meu companheiro, Dábliu Júnior, pela parceria e por caminhar comigo em mais um projeto profissional.

Aos amigos, pela presença generosa e afetuosa. Aos técnicos e colegas de laboratório, pela dedicação, aprendizado mútuo e colaboração diária.

À colega Paula Santos pelo empenho em compartilhar seus conhecimentos.

À EMBRAPA Florestas, em especial à Dra. Cristiane Vieira Helm, ao Laboratório de Anatomia da Madeira da UFPR e ao Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais da UTFPR, pela estrutura e parceria fundamentais à realização deste trabalho.

Aos Professores Charles Windson e Daniel Angelo, que contribuíram de forma genuína para o avanço deste trabalho.

À minha orientadora, Maria Lucia Masson, por sua orientação, paciência e valiosos ensinamentos ao longo desta jornada.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos (PPGEAL), pela oportunidade, e à CAPES em parceria com a Fundação Araucária, pelo apoio por meio da concessão da bolsa.

É como se todos nós fôssemos algo que ainda não se concretizou, somos um botão de alguma coisa que ainda não sabemos o que é. Por mais enigmático e assustador que isso possa parecer [...] descobrir esse algo que já somos, mas ainda não nos transformamos, parece ser um forte concorrente a sentido da vida (Dabliu, 2024, p. 23).

## RESUMO

A crescente demanda por proteínas alternativas é impulsionada pelo aumento populacional e pela maior conscientização do consumidor, que agora considera não apenas a saudabilidade, mas também o bem-estar animal, o impacto ambiental e a sustentabilidade dos produtos. Nesse contexto, os géis proteicos de fonte vegetal são produtos promissores, desenvolvidos para replicar as propriedades sensoriais da carne a partir de proteínas como o Isolado Proteico de Soja (IPS). Este trabalho avaliou a obtenção de produtos análogos à carne utilizando IPS e Alginato de Sódio (AS) e a técnica de estruturação por congelamento. Um Delineamento Fatorial Completo de dois níveis e três fatores com duplicata no ponto central, foi aplicado para avaliar o *Teor de sólidos* ( $X_1$ ), *pH* ( $X_2$ ) e a *Temperatura de Congelamento* ( $X_3$ ) em função das respostas *Dureza* ( $Y_1$ ) e *Coesividade* ( $Y_2$ ). Adicionalmente, análises físico-químicas caracterizaram os géis formados e suas propriedades de textura e cor foram comparadas às de carnes convencionais. Os resultados revelaram um efeito significativo de todos os fatores em  $Y_1$ , enquanto para  $Y_2$ , os efeitos influentes foram *Teor de sólidos*, *pH* e as interações *Teor de sólidos*\**pH* e *pH*\**Temperatura de Congelamento*. Os tratamentos A5 (5% de sólidos; pH 5,0; -5 °C), A2 (13% de sólidos; pH 5,0; -15 °C) e A1 (5% de sólidos; pH 5,0; -15 °C) apresentaram dureza similar à do peito de frango, enquanto A3 (5% de sólidos; pH 6,0; -15 °C) e A7 (5% de sólidos; pH 6,0; -5 °C) se assemelharam ao contrafilé. Em relação à coesividade, A5 (5% de sólidos; pH 5,0; -5 °C) obteve médias iguais à do contrafilé, enquanto A7 (5% de sólidos; pH 6,0; -5 °C) e A3 (5% de sólidos; pH 6,0; -15 °C) foram similares à do filé de peixe. A elasticidade de todos os tratamentos foi equivalente à do filé de peixe, ao passo que a mastigabilidade de A7 (5% de sólidos; pH 6,0; -5 °C) foi semelhante à do contrafilé bovino. Para a cor, as menores diferenças foram observadas entre os tratamentos A6 (13% de sólidos; pH 5,0; -5 °C) e A5 (5% de sólidos; pH 5,0; -5 °C), em relação ao peito de frango e o filé de peixe, respectivamente. Os géis apresentaram acidez de 0,079 a 0,167 g de ácido láctico/100 g, pH entre 5,54 e 6,54, atividade de água ( $a_w$ ) de 0,992 a 0,996 e umidade variando de 63,35% a 69,84%. Os tratamentos A6 (13% de sólidos, pH 5,0, -5 °C), A8 (13% de sólidos, pH 6,0, -5 °C) e A9 (9% de sólidos, pH 5,5, -10 °C) exibiram estruturas lamelares e grau de texturização superior a 1. As curvas de congelamento indicaram perda de calor vertical pelo material, sugerindo congelamento unidirecional no processo e caracterizando sua anisotropia. Desse modo, o congelamento mostrou-se uma técnica promissora para a obtenção dos produtos sendo recomendado o uso dos parâmetros de 9% de sólidos, pH 5,5 e temperatura de congelamento de -10 °C como melhor tratamento para o estudo.

**Palavras-Chave:** Análogos cárneos; Delineamento Fatorial Completo; Alinhamento por Congelamento; Estrutura anisotrópica.

## ABSTRACT

The growing demand for alternative proteins is driven by population growth and greater consumer awareness, which now considers not only healthiness but also animal welfare, environmental impact, and product sustainability. In this context, protein gels from plant sources are promising products, developed to replicate the sensory properties of meat using proteins such as Soy Protein Isolate (SPI). This work evaluated the production of meat analogue products using SPI and Sodium Alginate (SA) and the freeze structuring technique. A two-level, three-factor Full Factorial Design with a duplicate centre point was applied to evaluate the *solid content* ( $X_1$ ), *pH* ( $X_2$ ), and *freezing temperature* ( $X_3$ ) as a function of the responses *Hardness* ( $Y_1$ ) and *Cohesiveness* ( $Y_2$ ). Additionally, physicochemical analyses characterised the gels formed, and their textural and colour properties were compared with those of conventional meats. The results revealed a significant effect of all factors on  $Y_1$ , while for  $Y_2$ , the influential effects were *solid content*, *pH*, and the interactions *solid content*\**pH* and *pH*\**freezing temperature*. Treatments A5 (5% solids; pH 5.0; -5 °C), A2 (13% solids; pH 5.0; -15 °C), and A1 (5% solids; pH 5.0; -15 °C) showed hardness similar to that of chicken breast, while A3 (5% solids; pH 6.0; -15 °C) and A7 (5% solids; pH 6.0; -5 °C) resembled sirloin steak. In terms of cohesiveness, A5 (5% solids; pH 5.0; -5 °C) achieved values equal to sirloin, while A7 (5% solids; pH 6.0; -5 °C) and A3 (5% solids; pH 6.0; -15 °C) were similar to fish fillet. The springiness of all treatments was equivalent to fish fillet, whereas the chewiness of A7 (5% solids; pH 6.0; -5 °C) was similar to beef sirloin. For colour, the smallest differences were observed between treatments A6 (13% solids; pH 5.0; -5 °C) and A5 (5% solids; pH 5.0; -5 °C), in relation to chicken breast and fish fillet, respectively. The gels had an acidity of 0.079 to 0.167 g of lactic acid/100 g, pH between 5.54 and 6.54, water activity (aw) of 0.992 to 0.996, and moisture content ranging from 63.35% to 69.84%. Treatments A6 (13% solids, pH 5.0, -5 °C), A8 (13% solids, pH 6.0, -5 °C), and A9 (9% solids, pH 5.5, -10 °C) exhibited lamellar structures and a texturisation degree greater than 1. The freezing curves indicated vertical heat loss by the material, suggesting unidirectional freezing in the process and characterising its anisotropy. Thus, freezing proved to be a promising technique for producing the products, with the use of the parameters 9% solids, pH 5.5, and a freezing temperature of -10 °C being recommended as the best treatment for the study.

**Palavras-Chave:** Meat analogs; Full Factorial Design; Freeze Structuring; Anisotropic structure.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Fluxograma geral: Processos de obtenção de Concentrados e Isolados Proteicos....                                                            | 24 |
| Figura 2. Curvas de congelamento para água e alimento .....                                                                                           | 33 |
| Figura 3. Texturizados obtidos usando congelamento sendo (A), (B) e (C) amostras contendo proporção IPS:AS de 9,5:0,5, 9:1 e 8:2 respectivamente..... | 49 |
| Figura 4. Gráfico de Pareto para a análise fatorial de (A) <i>Dureza</i> ( $Y_1$ ) e (B) <i>Coesividade</i> ( $Y_2$ ) .....                           | 51 |
| Figura 5. Gráficos de efeitos principais para (A) <i>Dureza</i> ( $Y_1$ ) e (B) <i>Coesividade</i> ( $Y_2$ ) .....                                    | 52 |
| Figura 6. Gráficos de efeitos de interação para (A) <i>Dureza</i> ( $Y_1$ ) e (B) <i>Coesividade</i> ( $Y_2$ ).....                                   | 54 |
| Figura 7. Parâmetros de Cor (L, a, b*, C*, h°) e ensaios (1 a 10) e Produtos Cárneos.....                                                             | 58 |
| Figura 8. Imagens obtidas em MEV para os tratamentos codificados de 1 a 9.....                                                                        | 63 |
| Figura 9. Imagens obtidas em Lupa para os tratamentos codificados de 1 a 9.....                                                                       | 64 |
| Figura 10. Imagens obtidas em câmera digital para os tratamentos codificados de 1 a 9.....                                                            | 65 |
| Figura 11. Perfil de Temperatura em Diferentes Pontos da Amostra Durante o Processo de Congelamento.....                                              | 66 |

## LISTA DE QUADROS

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 1. Classificação de proteínas a partir de sua solubilidade .....                  | 22 |
| Quadro 2. Propriedades tecnológicas para IPS ou CPS comerciais .....                     | 27 |
| Quadro 3. Principais técnicas bottom-up aplicadas à texturização de proteínas .....      | 29 |
| Quadro 4. Principais técnicas <i>top-down</i> aplicadas à texturização de proteínas..... | 30 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 . Delineamento Fatorial Completo $2^3$ com duplicata no ponto central apresentados em ordem padrão.....                                                                       | 43 |
| Tabela 2. Composição centesimal do IPS em base úmida .....                                                                                                                             | 47 |
| Tabela 3. Propriedades funcionais do IPS .....                                                                                                                                         | 47 |
| Tabela 4. Resultados obtidos para <i>Dureza</i> ( $Y_1$ ) e <i>Coesividade</i> ( $Y_2$ ) usando Delineamento Fatorial Completo $2^3$ com duplicata no ponto central apresentados ..... | 49 |
| Tabela 5. Coeficientes estimados do modelo para a resposta <i>Dureza</i> ( $Y_1$ ).....                                                                                                | 50 |
| Tabela 6. Coeficientes estimados do modelo para a resposta <i>Coesividade</i> ( $Y_2$ ).....                                                                                           | 50 |
| Tabela 7. Validação dos modelos nos níveis -0,5 e 0,5.....                                                                                                                             | 55 |
| Tabela 8. Resultados obtidos para a comparação entre as propriedades de textura e diferentes tipos de carnes.....                                                                      | 55 |
| Tabela 9. Resultados para a variação de cor entre as amostras e as carnes.....                                                                                                         | 59 |
| Tabela 10. Resultados de Umidade, $a_w$ , Acidez, pH e Proteína para os géis proteicos.....                                                                                            | 60 |
| Tabela 11. Ponto de congelamento e tempo de congelamento observados para os cinco pontos estudados.....                                                                                | 67 |

## LISTA DE SIGLAS

|         |                                                                      |
|---------|----------------------------------------------------------------------|
| AE      | Atividade Emulsionante                                               |
| ANOVA   | Análise de Variância, Análise de Variância                           |
| AS      | Alginato de Sódio. Consulte                                          |
| $a_w$   | Atividade de água                                                    |
| CEE     | Capacidade de Estabilizar Emulsão                                    |
| CFE     | Capacidade de Formar Emulsão                                         |
| CMCM    | Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais                   |
| EE      | Capacidade Mínima de Gelificação                                     |
| CONAB   | Companhia Nacional de Abastecimento                                  |
| CPS     | Concentrado Proteico De Soja                                         |
| CRA     | Capacidade de Retenção de Água                                       |
| CRO     | Capacidade de Retenção de óleo                                       |
| DFC     | Delineamento Fatorial Completo                                       |
| EE      | Estabilidade Emulsionante                                            |
| EMBRAPA | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária                          |
| FSD     | Farinha de Soja Desengordurada                                       |
| g       | gramas                                                               |
| GT      | Grau de Texturização                                                 |
| IAL     | Instituto Adolfo Lutz                                                |
| IPS     | Isolado Proteico De Soja                                             |
| MEV     | Microscopia Eletrônica de Varredura                                  |
| MM      | Massa molecular                                                      |
| PDCAAS  | Pontuação de Aminoácidos Corrigida pela Digestibilidade de Proteínas |
| pH      | Potencial hidrogeniônico                                             |
| pI      | Ponto Isoelétrico ou pH Isoelétrico                                  |
| RDC     | Resolução da Diretoria Colegiada                                     |
| TPA     | Análise do perfil de textura                                         |
| UFPR    | Universidade Federal do Paraná                                       |
| UTFPR   | Universidade Tecnológica Federal do Paraná                           |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|              |                                                        |
|--------------|--------------------------------------------------------|
| $a^*$        | Eixo verde-vermelho                                    |
| $b^*$        | Eixo azul-amarelo                                      |
| $C^*$        | Croma                                                  |
| $F_L$        | Força na direção transversal ao comprimento das fibras |
| $F_V$        | Força na direção vertical ao comprimento das fibras    |
| $GT$         | Grau de Texturização                                   |
| $h^\circ$    | Ângulo hue                                             |
| $ISN$        | Índice de Solubilidade de Nitrogênio                   |
| $L^*$        | Luminosidade                                           |
| $SP$         | Solubilidade de Proteínas                              |
| $X_1$        | Teor de Sólidos                                        |
| $X_2$        | pH                                                     |
| $X_3$        | Temperatura de congelamento                            |
| $Y_1$        | Dureza                                                 |
| $Y_2$        | Coesividade                                            |
| $\Delta E^*$ | Diferença total de cor                                 |

## SUMÁRIO

|           |                                                                                           |           |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1.</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                                                   | <b>16</b> |
| <b>2.</b> | <b>OBJETIVOS .....</b>                                                                    | <b>18</b> |
| 2.1.      | OBJETIVO GERAL.....                                                                       | 18        |
| 2.2.      | OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                                                               | 18        |
| <b>3.</b> | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>                                                         | <b>19</b> |
| 3.1.      | MATÉRIA – PRIMA .....                                                                     | 19        |
| 3.1.1.    | Contextualização da Soja: Panorama Histórico e Produtivo.....                             | 19        |
| 3.1.2.    | A soja e seus derivados .....                                                             | 20        |
| 3.1.3.    | Composição proteica .....                                                                 | 21        |
| 3.1.4.    | Concentrado e Isolado Proteico de Soja.....                                               | 23        |
| 3.2.      | TEXTURIZAÇÃO E PRODUÇÃO DE EXTRUSADOS PROTEICOS .....                                     | 28        |
| 3.2.1.    | Texturização em alimentos: principais métodos .....                                       | 28        |
| 3.2.2.    | Estruturação por Congelamento .....                                                       | 31        |
| 3.2.3.    | Princípios termodinâmicos aplicáveis ao congelamento de alimentos.....                    | 32        |
| 3.3.      | HIDROCOLOIDES.....                                                                        | 34        |
| 3.4.      | AVANÇOS RECENTES EM PESQUISA SOBRE O TEMA .....                                           | 36        |
| <b>4.</b> | <b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>                                                          | <b>39</b> |
| 4.1.      | MATERIAIS .....                                                                           | 39        |
| 4.2.      | MÉTODOS.....                                                                              | 39        |
| 4.2.1.    | Caracterização e Propriedades Funcionais da Matéria-Prima.....                            | 39        |
| 4.2.2.    | Preparo do gel proteico.....                                                              | 41        |
| 4.2.2.1.  | Alinhamento por congelamento .....                                                        | 41        |
| 4.2.2.2.  | Delineamento Experimental empregado no estudo das propriedades Dureza e Coesividade ..... | 41        |
| 4.2.3.    | Análise de Cor e Perfil de Textura dos géis proteicos e carnes convencionais.....         | 43        |
| 4.2.3.1.  | Cor.....                                                                                  | 43        |
| 4.2.3.2.  | Textura.....                                                                              | 43        |
| 4.2.3.3.  | Preparo das carnes .....                                                                  | 44        |
| 4.2.4.    | Caracterização do Gel Proteico .....                                                      | 44        |
| 4.2.5.    | Avaliação da estrutura do gel proteico .....                                              | 45        |
| 4.2.5.1.  | Aparência visível.....                                                                    | 45        |
| 4.2.5.2.  | Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....                                           | 45        |
| 4.2.5.3.  | Grau de Texturização .....                                                                | 46        |

|           |                                                                                                                                                                                                         |           |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.2.6.    | Obtenção das curvas de congelamento.....                                                                                                                                                                | 46        |
| 4.2.7.    | Análise estatística.....                                                                                                                                                                                | 46        |
| <b>5.</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                                                                                                                                                                     | <b>47</b> |
| 5.1.      | CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA.....                                                                                                                                                                    | 47        |
| 5.2.      | OBTENÇÃO DO TEXTURIZADO PROTEICO DE SOJA E DEFINIÇÃO DO<br>TEOR DE ALGINATO DE SÓDIO .....                                                                                                              | 48        |
| 5.3.      | ANÁLISE DO DELINEAMENTO EXPERIMENTAL .....                                                                                                                                                              | 49        |
| 5.3.1.    | Significância do modelo.....                                                                                                                                                                            | 49        |
| 5.3.2.    | Efeitos principais.....                                                                                                                                                                                 | 52        |
| 5.3.3.    | Interação entre os efeitos.....                                                                                                                                                                         | 53        |
| 5.3.4.    | Validação do modelo.....                                                                                                                                                                                | 54        |
| 5.4.      | PROPRIEDADES DE TEXTURA E COR FRENTE A PADRÕES CÁRNEOS .....                                                                                                                                            | 55        |
| 5.5.      | PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DOS GÉIS PROTEICOS .....                                                                                                                                                   | 60        |
| 5.6.      | AVALIAÇÃO DA ESTRUTURA .....                                                                                                                                                                            | 62        |
| 5.6.1.    | MEV e aparência visível .....                                                                                                                                                                           | 62        |
| 5.6.2.    | Grau de Texturização .....                                                                                                                                                                              | 65        |
| 5.7.      | CURVA DE CONGELAMENTO .....                                                                                                                                                                             | 66        |
| <b>6.</b> | <b>CONCLUSÃO .....</b>                                                                                                                                                                                  | <b>68</b> |
| 6.1.      | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....                                                                                                                                                                  | 68        |
|           | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                                                                                                                                                                | <b>70</b> |
|           | <b>ANEXO 1 – Anova obtida para Dureza (<math>Y_1</math>) .....</b>                                                                                                                                      | <b>82</b> |
|           | <b>ANEXO 2 – Anova obtida para Coesividade (<math>Y_2</math>).....</b>                                                                                                                                  | <b>82</b> |
|           | <b>ANEXO 3 – Resultados da análise de cor (<math>L^*</math>, <math>a^*</math>, <math>b^*</math>, <math>C^*</math> e <math>h^\circ</math>) para diferentes<br/>amostras e carnes de referência .....</b> | <b>82</b> |
|           | <b>ANEXO 4 – Resultados dos Cortes Vertical (<math>F_V</math>) e Transversal (<math>F_L</math>) em Relação<br/>ao Crescimento das Fibras para as Amostras 6, 8 e 9.....</b>                             | <b>83</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

Produtos de origem vegetal (*plant-based*) têm se consolidado como uma alternativa proteica às fontes animais na alimentação. Inicialmente voltados ao público vegano e vegetariano, esses produtos passaram a atrair também os consumidores flexitarianos, definidos como aqueles que buscam reduzir, mas não eliminar, o consumo de proteína animal (Galdeano, 2022). Esse novo perfil de consumo reflete uma crescente preocupação com temas como sustentabilidade, impacto ambiental, saúde e bem-estar animal relacionados à pecuária, o que intensifica os desafios enfrentados pela Indústria de Alimentos no desenvolvimento de soluções compatíveis com esse cenário (Clark et al., 2017; Heinrich Böll Foundation, 2014; McAfee et al., 2010; Micha; Wallace; Mozaffarian, 2010). Para atender às expectativas dos consumidores, produtos como queijos e carnes têm suas propriedades sensoriais, como aparência, sabor, aroma e textura, replicadas em alternativas conhecidas como produtos análogos.

Diferentes fontes vêm sendo exploradas nos últimos anos, dentre elas, folhas (beterraba, ora-pro-nóbis, espinafre), leguminosas (soja, feijão, fava, ervilha, lentilha, grão de bico), cereais e pseudocereais (arroz, aveia, cevada), sementes, grãos e nozes (girassol, gergelim, canola, cânhamos, linhaça, amêndoas, trigo, amendoim) e ainda algumas não convencionais como algas e fungos (Pacheco; Sadahira, 2022). Dentre todas, as sementes oleaginosas são consideradas excelentes para essa extração, pois, ao extrair o óleo é realizada também a concentração das proteínas, etapa essencial para sua obtenção e uso subsequente (Day, 2013). Além disso, de acordo com Ritchie; Rosado; Roser, (2022), a produção de 100 g de proteínas provenientes de leguminosas emite cerca de 90% menos gases de efeito estufa em comparação com a mesma quantidade de proteína de origem bovina, o que evidencia seu menor impacto ambiental.

Em 2021, a soja se destacou como a proteína vegetal mais comercializada globalmente, respondendo por 60% do total (GlobeNewswire, 2022). Reconhecida como a leguminosa mais importante do mundo, teve o Brasil como principal produtor na safra 2024/2025, sendo produzidos 169 milhões de toneladas de acordo com o relatório disponibilizado pela USDA (2025b). Com teor proteico entre 35% e 40%, a soja contém todos os aminoácidos essenciais e apresenta Pontuação de Aminoácidos Corrigida pela Digestibilidade de Proteínas (PDCAAS) e taxa de digestibilidade semelhantes a do leite, sendo considerada uma excelente fonte de proteína e uma alternativa promissora às fontes de origem animal, apesar de deficiente em aminoácidos sulfurados (Day; Cakebread; Loveday, 2022a; Qin; Wang; Luo, 2022; Zhang et al., 2021). Além disso, o consumo de soja tem sido associado à redução do risco de diversas doenças crônicas, como obesidade, complicações cardiovasculares, diabetes tipo 2, certos tipos

de câncer e distúrbios imunológicos. Isso se deve ao fato de a soja conter inúmeros peptídeos com propriedades bioativas no organismo, como as isoflavonas e as saponinas (Chatterjee; Gleddie; Xiao, 2018).

No setor industrial, os principais derivados proteicos da soja são a farinha, o concentrado e o isolado proteico, que despertam grande interesse devido às suas propriedades funcionais, como boa capacidade de retenção de água e gordura, emulsificação, gelificação e formação de espuma (Qin; Wang; Luo, 2022; Tian et al., 2018). Dentre suas diversas aplicações, esses derivados são usados na produção de análogos a carne, onde tecnologias de estruturação são empregadas para replicar a morfologia fibrosa, aproximando a textura final do produto à de um produto cárneo (Chantanuson et al., 2022). A carne apresenta estrutura complexa, formada por pequenas unidades chamadas miofibrilas, que se alinham para compor estruturas maiores, as fibras, organizadas por sua vez na formação dos músculos. Essa disposição confere à carne uma característica específica, a anisotropia estrutural, entendida como a tendência observada em um corpo ou material de exibir propriedades físicas distintas quando mudamos sua orientação ou posição (Galdeano, 2022).

A tecnologia nomeada como Alinhamento por Congelamento consiste em congelar uma solução binária composta por água e biopolímeros, formando cristais de gelos de formas similares a de uma folha plana. Esses ocasionam a separação e organização das proteínas, de forma que, durante a remoção de calor, seja formada uma estrutura porosa e fibrosa, tal qual os músculos da carne. É imprescindível que a remoção de calor seja unidirecional, pois só assim será formada a estrutura anisotrópica desejada (Galdeano, 2022; Ozturk; Hamaker, 2023; Yuliarti; Kiat Kovis; Yi, 2021).

Criar uma textura que se assemelhe à carne real tem sido um dos desafios atuais da Indústria de Alimentos. Nesse passo, o uso de biopolímeros como o Alginato de Sódio (AS), que atuem em sinergia com proteínas, podem ser grandes aliados na preparação de géis, já que são comumente empregados em alimentos para obtenção de melhorias em propriedades macroscópicas tais como: fluidez, estabilidade, textura e sensação na boca. Assim, a presente pesquisa explora a aplicação da tecnologia de congelamento na estruturação de géis proteicos. Para isso, propõe-se uma formulação simplificada, utilizando apenas proteína vegetal e um agente gelificante. A metodologia de congelamento, realizada em uma única etapa com o auxílio de um refrigerador doméstico, foca na análise da estrutura dos géis por meio de análises mecânicas e estruturais. As propriedades de textura e cor obtidas são comparadas com as de três produtos cárneos de consumo comum, fornecendo um parâmetro de referência relevante.

## 2. OBJETIVOS

Esta seção descreve os objetivos deste trabalho de maneira a orientar a sua compreensão.

### 2.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar o uso da tecnologia de congelamento para a texturização de análogos à carne, investigando a influência dos parâmetros de processo nas propriedades físico-químicas, textura, cor e estrutura dos géis proteicos elaborados.

### 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a Composição Química do Isolado Proteico de Soja (IPS) determinando seus teores de proteínas, gordura, cinzas, fibras e carboidratos;
- Avaliar a capacidade do Isolado Proteico de Soja de se ligar à água por meio das análises de Solubilidade Proteica e Índice de Solubilidade de Nitrogênio;
- Estabelecer a influência do teor de sólidos, pH e temperatura de congelamento na dureza e coesividade do texturizado proteico de soja utilizando um Delineamento Fatorial Completo  $2^3$  com duplicata no ponto central;
- Analisar as propriedades químicas e físicas dos texturizados proteicos obtidos pelos métodos aplicados, incluindo teor de proteínas, acidez, pH, umidade, atividade de água ( $a_w$ ), textura, cor, microestrutura e macroestrutura;
- Comparar as propriedades de cor e textura do análogo às de carnes convencionais (contrafilé bovino, filé de peixe Panga e peito de frango);
- Construir a curva de congelamento para o produto texturizado identificando o ponto de congelamento e seu tempo de congelamento.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção do trabalho foi estruturada pensando em orientar o leitor quanto ao trabalho realizado, de forma que ele compreenda o ponto de partida no qual foi dado início a pesquisa apresentada.

#### 3.1. MATÉRIA – PRIMA

##### 3.1.1. Contextualização da Soja: Panorama Histórico e Produtivo

As plantas oleaginosas são caracterizadas pela alta concentração de gordura em suas sementes, um atributo essencial para a extração de óleo com propriedades específicas. Essa característica é o principal motivo que impulsiona estudos e pesquisas voltados para o desenvolvimento desses vegetais (Arghiroiu; Cristea; Alecu, 2015; Soare; Chiurciu, 2018). Dentro das culturas oleaginosas, a soja lidera como a principal contribuinte para a economia global desse setor, seguida pela mostarda de colza, algodão, amendoim e girassol (Sharma; Gupta; Mondal, 2012).

Há indícios de que a soja (*Glycine max* (L.) Merr.) tenha surgido na China há cerca de 3.000 anos (Li et al., 2008), introduzida na Europa no século XX e adotada pelo Brasil como cultura comercial no final da década de 1960 (EMBRAPA, 2025b). Desde então, o Brasil tem investido em pesquisas e aprimorado as técnicas de cultivo e adaptação da cultura às condições locais, além de aplicar políticas de incentivo à produção, processamento e consumo do óleo de soja e farelo, explica Campos (2010). Atualmente, os principais produtores mundiais de soja são Brasil, Estados Unidos, Argentina, China, Índia e Paraguai. Segundo levantamento de maio de 2025 feito pela Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB (2025), o Brasil produziu 167,87 milhões de toneladas de soja, representando quase 40% da produção global, que foi estimada em 420,87 milhões de toneladas no mesmo período (USDA, 2025). No cenário nacional, oleaginosa é cultivada em todas as cinco regiões do Brasil, sendo o Mato Grosso o principal estado produtor, seguido por Paraná, Rio Grande do Sul e Goiás, de acordo com levantamento da CONAB realizado em abril de 2025. Ainda de acordo com a CONAB (2025), o Brasil registra uma área plantada de 47.613 mil hectares, com produtividade de 3.536 mil kg/ha. De acordo com a EMBRAPA (2025), a maior parte da produção nacional é destinada ao mercado externo: em 2024, aproximadamente 98.815 mil toneladas de grãos de soja foram exportadas, o que corresponde a 63,9% da produção total, sendo o restante, apenas 36,1%, direcionados ao consumo interno.

### 3.1.2. A soja e seus derivados

A soja é uma das culturas vegetais mais importantes do mundo. Seu grão é reconhecido por sua composição rica em proteínas, lipídios, vitaminas, isoflavona, saponinas e inibidores de protease (Fan et al., 2025a; Huang et al., 2026). Sua composição centesimal é influenciada pela herança genética, pelas técnicas de cultivo e condições ambientais a que são submetidas, mas no geral as sementes secas e maduras apresentam ~35–40% de proteína, ~20% de lipídios, ~9% de fibra alimentar e ~8,5% de umidade (Qin; Wang; Luo, 2022). Esses números a configuram como excelente matéria-prima para extração de óleo e farelo pela indústria, possibilitando a obtenção de uma gama de produtos.

O processamento da soja inicialmente teve como objetivo abastecer o mercado de proteína animal, que cresceu exorbitantemente entre os anos 2001 e 2021, demandando farelo proteico para fabricação de ração animal. Em paralelo, o beneficiamento do óleo extraído do grão encontrou mercado quando associado à alimentação humana, na forma de margarina, produtos hidrogenados e principalmente na forma de óleo de cozinha, que em 2000/2001 correspondia a 96,1% de seu consumo. Anos depois, as políticas implantadas por demanda energética renovável levaram ao aumento na produção de biocombustíveis, que em 10 anos apresentou um crescimento de 16% (Balbinot Junior et al., 2022; Campos, 2010).

Atualmente a soja desempenha um papel fundamental como matéria-prima em diversos setores. Na alimentação o grão é comumente consumido cozido em saladas ou frito. A soja pode ser torrada para obtenção de farinha (*Kinako*), ou ainda podem ser consumidos na forma molho de soja (*shoyu*), grãos (*tempeh* e *Natto*) ou pasta (*Missô*) fermentados, queijo de soja (*tofu*), ou bebida à base de soja (EMBRAPA, 2018; Huang et al., 2026). No ambiente industrial, o processamento da soja envolve diferentes etapas, desde o recebimento do grão até a geração de produtos de alto valor agregado. Entre os principais derivados industriais estão o óleo cru, o farelo de soja, a farinha desengordurada e a proteína isolada/concentrada. Os principais produtos estão apresentados a seguir de acordo com o exposto por EMBRAPA (2018):

- Óleo Cru: sua extração é uma das primeiras etapas industriais. A partir dele, obtém-se o óleo refinado para consumo humano, usado em óleos de cozinha, margarinas, temperos, maioneses e produtos medicinais. Para fins industriais, o óleo é aplicado na fabricação de sabões, tintas, revestimentos, tecidos, isolantes térmicos e elétricos, entre outros. Entre os outros produtos extraídos do óleo estão: lecitina (emulsificante e estabilizante alimentar), esteróis, ácidos graxos, glicerol e biodiesel, todos com amplo uso nas indústrias alimentícia, cosmética e química.

- Farelo de Soja: é obtido como resíduo da extração do óleo e é amplamente utilizado na alimentação de bovinos, suínos, aves, peixes e animais de estimação, por seu alto teor proteico e excelente digestibilidade.
- Farinha de Soja Desengordurada (FSD): apresenta aplicação expressiva na indústria de alimentos. É empregada como ingrediente funcional em massas alimentícias, produtos de panificação, salsichas, almôndegas, barras de cereais, fórmulas infantis, alimentos dietéticos, proteínas texturizadas e bebidas. Sua versatilidade e valor nutricional fazem dela um insumo estratégico em linhas alimentares voltadas à saudabilidade e ao alto teor proteico.
- Concentrado Proteico de Soja (CPS) e Isolado Proteico de Soja (IPS): são proteínas extraídas do farelo e da FSD com elevado grau de pureza, utilizados para enriquecer o conteúdo proteico de produtos alimentícios. O CPS é frequentemente incorporado a alimentos processados à base de carne, peixe e aves, atuando como realçador de sabor, cor e textura. O IPS, por sua vez, destaca-se por sua solubilidade, viscosidade e capacidade de formar espumas, sendo aplicado em sopas, molhos, bebidas, fórmulas infantis e alimentos hospitalares. Além do setor alimentício, essas proteínas são também utilizadas na indústria têxtil, de papel e na produção de extintores de incêndio.

Com base no que foi exposto, a soja destaca-se como uma matéria-prima altamente versátil para a indústria, além de representar um importante objeto de pesquisa e desenvolvimento em escala global. Por ser uma rica fonte de proteína vegetal, sobressai-se em comparação a outras leguminosas, tanto pelo valor nutricional quanto pelas amplas possibilidades de aplicação.

### 3.1.3. Composição proteica

As proteínas são macronutrientes nitrogenados que estão presentes em toda matéria viva. São constituídas por aminoácidos ligados entre si por ligações peptídicas. Essas são ligações estabelecidas entre o átomo de carbono do grupo carboxila e o átomo de nitrogênio do grupo amino de dois aminoácidos diferentes, formando uma cadeia polimérica (Damodaran; Parkin, 2019; Macedo; Matos, 2015; Ribeiro; Seravalli, 2007). A sequência em que estão ligados, o tamanho da cadeia e até mesmo a conformação tridimensional obtida pela proteína, refletem em sua diversidade e suas inúmeras funções biológicas (DAMODARAN; PARKIN, 2019; MACEDO; MATOS, 2015).

Ao todo, são vinte os aminoácidos frequentemente encontrados nos alimentos, sendo nove deles considerados “condicionalmente essenciais”, isso porque são necessários em fases específicas da vida e o corpo humano não é capaz de sintetizá-los (Day; Cakebread; Loveday, 2022b). Assim, a histidina, lisina, isoleucina, leucina, metionina, fenilalanina, treonina, triptofano e a valina (aminoácidos essenciais) precisam ser consumidos na alimentação e só são encontrados em proporções adequadas para as necessidades do organismo em fontes de proteína animal (laticínios, ovos, carne) ou na proteína vegetal extraída da soja (Damodaran; Parkin, 2019; Day; Cakebread; Loveday, 2022; Macedo; Matos, 2015). Em contrapartida, a soja é deficiente em aminoácidos sulfurados, podendo ser complementada na alimentação com cereais (Zhang et al., 2021). Além de apresentar um alto teor de proteína e incorporar os aminoácidos essenciais, as proteínas da soja apresentam boa digestibilidade. A farinha de soja e a sua proteína isolada apresentam resultados comparáveis a proteínas animal para digestibilidade em indivíduos com idade superior a 3 anos, conforme apresenta Day, Cakebread e Loveday (2022), sendo, portanto, considerada uma fonte proteica completa.

É possível classificar as proteínas a partir de sua organização estrutural entre globulares e fibrosas. As proteínas globulares apresentam formato esférico ou elipsoidal, ocasionado pelo dobramento das cadeias polipeptídicas. Já as proteínas fibrosas apresentam o formato de bastonete, conformação obtida pela torção das cadeias peptídicas (Damodaran; Parkin, 2019; Ribeiro; Seravalli, 2007). As proteínas também podem ser classificadas em função de sua solubilidade, como apresenta o Quadro 1.

Quadro 1. Classificação de proteínas a partir de sua solubilidade

|                   |                                                   |                                           |
|-------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| <b>Albuminas</b>  | Solúveis em água                                  | Ovoalbumina e lactoalbumina               |
| <b>Globulinas</b> | Solúveis em soluções salinas diluídas em pH 7,0   | Miosina, ovoglobulina e lactoglobulina.   |
| <b>Prolaminas</b> | Solúveis em soluções de etanol                    | Gliadina (trigo e centeio), zeína (milho) |
| <b>Glutelinas</b> | Solúveis em soluções ácidas e alcalinas diluídas. | Glutenina (trigo)                         |

FONTE: Adaptado de Damodaran e Parkin, (2019) e Ribeiro e Seravalli (2007).

As proteínas da soja são categorizadas em quatro diferentes classes baseadas nas diferentes propriedades de sedimentação, sendo elas: 2S, 7S, 11S e 15S. As frações 2S e 15S representam o menor grupo proteico da soja. A fração 2S é composta por proteínas de baixa massa molar (MM), como o citocromo C, a globulina 2S e inibidores de tripsina. Já a fração 15S possivelmente corresponde a um dímero de glicinina, sendo considerada o menor componente entre as frações identificadas (Sui; Zhang; Jiang, 2021). As proteínas  $\beta$ -conglucina (7S) e glicinina (11S) são as subunidades predominantes na soja, representando cerca de 80% do total dessas proteínas (Nishinari et al., 2014; Peng et al., 2023; Sui; Zhang; Jiang, 2021). Ainda de acordo com Nishinari et al. (2014), a globulina 11S apresenta uma estrutura hexamérica

composta por cinco pares de subunidades, sendo cada par formado por uma subunidade ácida tipo A, de ponto isoelétrico (pI) ácido e MM aproximado de 35 kDa, e uma subunidade básica tipo B, de pI básico e MM aproximado de 20 kDa, interligadas por pontes dissulfeto. Já a globulina 7S é formada por três subunidades distintas,  $\alpha$ ,  $\alpha'$  e  $\beta$ , com MM aproximados de 67, 71 e 50 kDa, respectivamente.

#### 3.1.4. Concentrado e Isolado Proteico de Soja

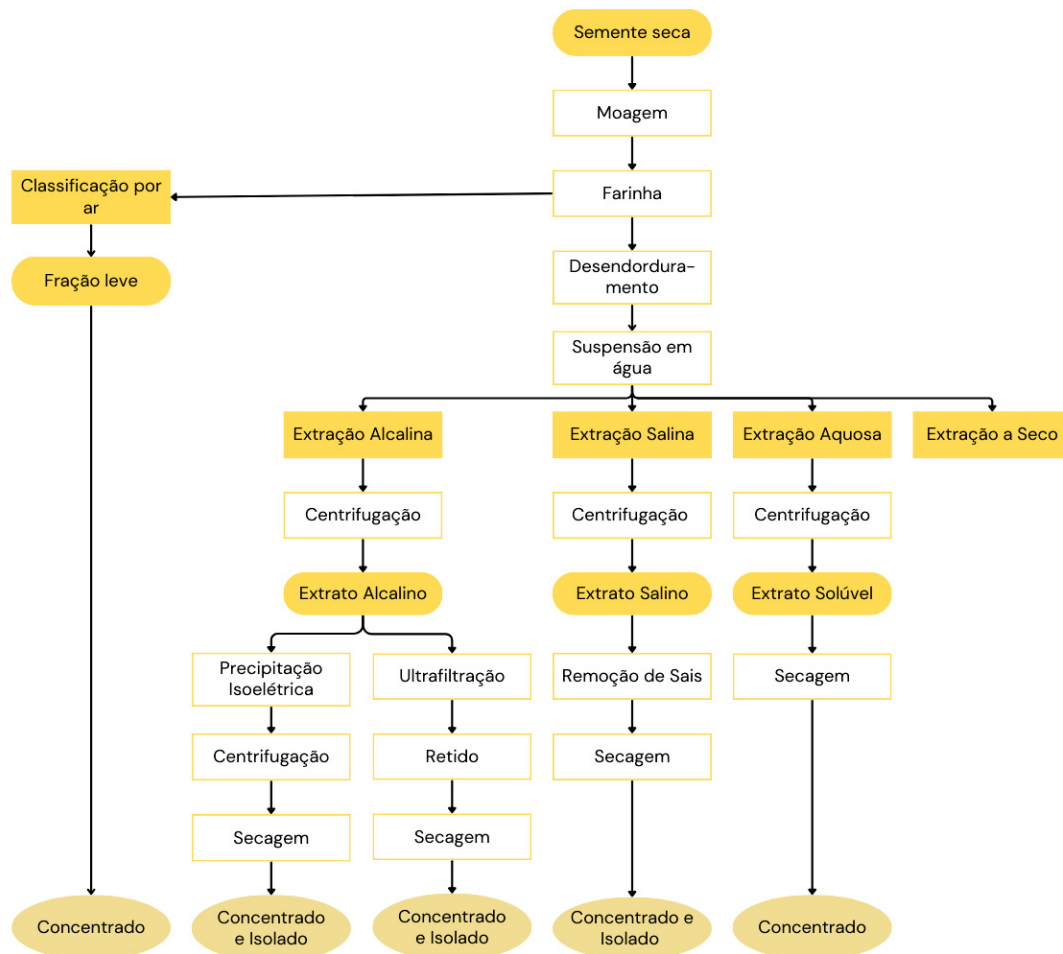
A produção de concentrados proteicos a partir de oleaginosas ocorre indiretamente, sendo realizada a remoção dos compostos não proteicos (óleo, minerais solúveis, carboidratos, compostos nitrogenados de baixa massa molar e fatores antinutricionais) e obtido o material de interesse em altas concentrações (Gültekin Subaşı et al., 2021).

No Brasil, a RDC nº 268 de 22 de setembro de 2005 classifica os produtos proteicos de origem vegetal como alimentos provenientes das partes proteicas de espécies vegetais, podendo ser comercializados em forma de grânulos, pó, líquidos ou outras apresentações. Os teores mínimos de proteína em base seca (N x 6,25) são estabelecidos apenas para o concentrado de soja (68%) e para o isolado de soja (88%), enquanto para outros produtos proteicos o teor mínimo de proteína definido é de 40% (BRASIL, 2005).

Diferentes métodos são aplicados na obtenção dos concentrados e isolados proteicos, no entanto, todos eles se baseiam no conteúdo de proteínas presente na matéria-prima e suas características. O fluxograma presente na Figura 1 apresenta uma classificação geral para os processos de extração de proteínas vegetais.

Pacheco e Sadahira (2022) classificam os processos em Seco e Úmido. O processo que ocorre a seco tem como princípio a diferença de densidade e tamanho das frações da farinha. Dessa forma, esse processo que é frequentemente aplicado em matérias primas ricas em amido, realiza a separação das partes proteicas (leves) e amiláceas (pesadas). Os teores obtidos de proteína são limitados, alcançando somente os concentrados proteicos, não deixando de ser um processo alternativo à extração úmida por apresentar vantagens de menor custo e trabalho, e por não fazer uso de reagentes químicos dispensando tratamento de efluentes, como explicam Sosulski e Youngs (1979) *apud* Pacheco e Sadahira (2022).

Figura 1. Fluxograma geral: Processos de obtenção de Concentrados e Isolados Proteicos



FONTE: Adaptado de (Pacheco; Sadahira, 2022)

Para Pacheco e Sadahira, (2022) são consideradas extrações úmidas aquelas que ocorrem com uso de processos químicos (aplicação de álcalis ou uso de solventes orgânicos), bioquímicos (enzimas) ou ainda, físicos (não utilizam reagente, mas utilizam equipamentos que permitem a recuperação da proteína).

Na extração por via úmida, a técnica de solubilização de proteínas em pH alcalino ou ácido, e sua precipitação isoelétrica Sgarbieri (1996); Boye *et al.* (2010) *apud.* Pacheco; Sadahira (2022). Esse método é o mais amplamente utilizado, não apenas para a soja, mas também de outras fontes vegetais distintas (Karaca; Low; Nickerson, 2011 *apud.* Gültekin Subaşı et al., 2022). Nele são consideradas a variação na carga líquida da proteína ao ajustar o pH do meio. Kaur e Singh (2007), Ghribi *et al.* (2015) e Papalamprou *et al.* (2009) *apud.* Jebitta et al. (2021) explicam que, em soluções em que o  $\text{pH} < \text{pI}$ , sendo  $\text{pI}$  o ponto isoelétrico, as proteínas têm cargas positivas, em  $\text{pH} > \text{pI}$  essas proteínas assumem cargas negativas, enquanto em pH próximo ao  $\text{pI}$  suas cargas tendem a ser neutras. Nesse último, não há impedimento para

que agregações proteína-proteína ocorram por meio de interações hidrofóbicas e a ação de forças atrativas de van der Waals, levando à sua precipitação. Vale destacar que pesquisas de Freitas, Albano, Telis (2017), Pimentel et al. (2024) e Silveira et al., (2020) demonstraram que o ponto isoelétrico (pI) do IPS variou entre pH 4 e 5, com um valor aproximado de 4,5.

A aplicação tecnológica das proteínas é fundamental na estruturação e estabilização dos sistemas alimentares, afetando alguns critérios de qualidade como textura, estabilidade, aceitação pelo consumidor e prazo de validade do material alimentício (Gültekin Subaşı et al., 2021). Considerar as características físico-químicas é crucial ao estudar as propriedades funcionais. O tamanho da proteína impacta as interações interfaciais e a resistência dos filmes, enquanto as características anfífilas são influenciadas pela distribuição de resíduos polares e não polares, adsorção interfacial, e atividades espumantes e emulsificantes. Grupos carregados influenciam a interação entre proteínas em filmes, a repulsão de bolhas em espumas, a estabilidade das emulsões, e a hidratação e solubilidade em água. A flexibilidade da proteína é determinante no desenvolvimento de filmes, espumas e emulsões (Kaur; Ghoshal, 2022).

Dentre essas propriedades, destaca-se a solubilidade, descrita como sua capacidade de interagir com uma solução. Essa propriedade muda de acordo com a quantidade de grupos carregados, configuração, pH, força iônica e concentração e está relacionada à hidrofobicidade/hidrofobicidade dos aminoácidos presentes na estrutura da proteína (Zayas, 1997 *apud*. Kaur; Ghoshal, 2022). Em geral, quanto maior a solubilidade, maior tende a ser a viscosidade, induzindo à melhor formação de espuma, emulsificação e capacidade de formar gel (Gültekin Subaşı et al., 2021).

Associadas à solubilidade, as propriedades Capacidade de Retenção de Água (CRA) e a Capacidade de Retenção de óleo (CRO) também são comumente investigadas. A CRA pode ser compreendida como o volume de água retido por grama de proteína ou, alternativamente, como a resistência da proteína em manter a água absorvida, mesmo sob a ação da gravidade (Boye; Zare; Pletch, 2010; Shevkani et al., 2015). De forma análoga, a CRO se refere à quantidade de óleo que uma proteína é capaz de reter, sendo para a funcionalidade em sistemas alimentares oleosos.

O pH é um fator importante, uma vez que, afeta solubilidade e hidrofobicidade superficial das proteínas, afetando também as demais propriedades apresentadas. A emulsificação é influenciada também pela força iônica, o que pode ser visto com a adição de sal, que promove a redução das propriedades emulsionantes e a tensão superficial da água (Zayas, 1997 *apud*. Kaur; Ghoshal, 2022). Geralmente é avaliada pela Atividade Emulsionante (AE) e pela Estabilidade Emulsionante (EE).

No contexto da formação de espumas, compreendidas como dispersões de bolhas de gás em fases líquidas ou sólidas (Dabbour et al., 2020), as proteínas desempenham um papel crucial. Durante esse processo, as proteínas se desdobram, posicionando suas regiões hidrofóbicas em direção à fase gasosa e as hidrofílicas voltadas para a fase líquida (Damodaran; Parkin, 2019). Assim, tanto a capacidade de formar (CFE) quanto de estabilizar (CEE) espumas são aspectos relevantes a serem explorados nas aplicações alimentícias.

Por fim, as características estruturais e reológicas dos produtos alimentares estão fortemente associadas à capacidade das proteínas de formar géis, sendo verificada pela Capacidade Mínima de Gelificação (CMG). A gelificação ocorre quando moléculas de proteína em solução aquosa interagem para formar uma rede tridimensional, resultando em um sistema coeso que retém água, lipídeos e outros componentes. Esse processo, geralmente iniciado por desnaturação parcial ou modificação conformacional das proteínas globulares, promove sua agregação progressiva, conferindo ao alimento a textura desejada (Gaonkar; Mcpherson, 2006). Em geral, a proteína de soja possui grande potencial para melhorar muitas propriedades no processamento alimentos (Nishinari et al., 2014). Os resultados disponíveis na literatura para propriedades funcionais do IPS e do CPS comerciais são apresentados no Quadro 2.

Quadro 2. Propriedades tecnológicas para IPS ou CPS comerciais

| ISP ou CPS Comercial | CRA   | CRO    | Solub. (%) | CMG (%) | AE (%)             | EE (%)            | CFE (ΔV%)       | CEE (%)              | Referência                                     |
|----------------------|-------|--------|------------|---------|--------------------|-------------------|-----------------|----------------------|------------------------------------------------|
| 1                    | –     | –      | –          | –       | 290 <sup>1</sup>   | 180               | –               | –                    | Chove et al. (2001) apud. Moure et al., (2006) |
|                      | –     | –      | –          | –       | 307 <sup>1</sup>   | 190               | –               | –                    |                                                |
|                      | –     | –      | –          | –       | 262 <sup>1</sup>   | 180               | –               | –                    |                                                |
| 2                    | –     | –      | –          | –       | 64,93 <sup>1</sup> | 39,6              | 253,46          | 41,8                 | Aluko et al. (2005) apud. Moure et al., (2006) |
| 3                    | –     | –      | –          | –       | 0,198              | 0,369             | –               | 203–165 <sup>3</sup> | Hua et al., (2005)                             |
|                      | –     | –      | –          | –       | 0,203              | 0,66              | –               | 228–2103             |                                                |
| 4                    | –     | –      | 51         | –       | 34 <sup>1</sup>    | 1 <sup>2</sup>    | –               | –                    | López et al., (2003)                           |
| 5                    | –     | 2,93   | –          | –       | 11,61 <sup>1</sup> | –                 | 64 <sup>2</sup> | 64–53 <sup>3</sup>   | Sze-Tao; Sathe, (2000)                         |
| 6                    | –     | 100,49 | –          | 16      | 106,7 <sup>1</sup> | 27,6 <sup>2</sup> | 71,7            | 51,5–31 <sup>3</sup> | Moure; Domínguez; Parajó, (2005)               |
| 7                    | 25,83 | –      | 85         | –       | –                  | –                 | –               | 92,07                | Silveira et al., (2020)                        |
| 8                    | 8,1   | 2,98   | –          | –       | 33,06              | 70,14             | 139,2           | –                    | Pimentel et al., (2024)                        |

FONTE: Adaptado de Moure et al., (2006). CRA - Capacidade de Retenção de Água (g água/g material seco g), CRO - Capacidade de Retenção de Óleo (g óleo/g material seco g), Solubilidade expressa como Índice de Solubilidade do Nitrogênio (ISN) e Solubilidade de Proteínas (PS), CMG – Capacidade mínima de gelificação, AE – Índice de Atividade Emulsificante (1 – m<sup>2</sup>/g), EE – Estabilidade Emulsionante (2 – minutos), CFE – Capacidade de Formação de Espuma (2 – minutos); CEE – Capacidade de Estabilizar Espumas (11 mL de espuma, 1 – 60 ou 120 minutos).

### 3.2. TEXTURIZAÇÃO E PRODUÇÃO DE EXTRUSADOS PROTEICOS

Esta seção é dedicada a uma revisão sobre a texturização de alimentos, com foco em produtos análogos à carne. Serão abordados diversos processos, com ênfase no congelamento como tecnologia estruturante.

#### 3.2.1. Texturização em alimentos: principais métodos

A texturização é uma técnica de estruturação usada para criar produtos com características sensoriais similares às da carne. Durante esse processo são considerados diferentes atributos de qualidade, sendo a textura a principal delas e obtida pela replicação da morfologia fibrosa da carne em produtos análogos, garantindo sua propriedade anisotrópica (Chantanuson et al., 2022). Para isso, faz-se uso de tecnologias de processo que vêm sendo aprimoradas nos últimos anos. Essas podem ser classificadas com base em sua abordagem, sendo denominadas como *bottom-up* ou *top-down* (Dekkers; Boom; Van der Goot, 2018; Galdeano, 2022).

As tecnologias *bottom-up* (de baixo para cima) são aquelas nas quais a morfologia fibrosa da carne é replicada em escala macro e microscópica, havendo a construção de uma estrutura básica menor, que posteriormente produzirá estruturas maiores, que por sua vez passarão por uma organização. Finalmente, essa estrutura secundária passa pelo processo de alinhamento que garante a anisotropia do produto. Ao trabalhar com tecnologias *top-down* (de cima para baixo), a morfologia é replicada em escalas maiores. Um campo de força (congelamento ou cisalhamento unidirecional) forma uma estrutura de biopolímeros, a partir de um sistema água-biopolímero, resultando em um produto anisotrópico em escala micrométrica (Dekkers; Boom; Van der Goot, 2018). Segundo Galdeano (2022), as técnicas *bottom-up* apresentam o potencial de imitar a carne com maior fidelidade, enquanto as estratégias *top-down* são mais robustas, escalonáveis e têm melhor eficiência dos recursos utilizados. Os Quadros 3 e 4 apresentam algumas técnicas conhecidas empregadas nestes processos, bem como suas características.

Quadro 3. Principais técnicas bottom-up aplicadas à texturização de proteínas

| <b>Técnica</b>  | <b>Fonte proteica</b>       | <b>Princípio</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | <b>Equipamento</b>                                               | <b>Escalonável</b> | <b>Referência</b>                                                                                                                                                    |
|-----------------|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Eletrofição     | Soja, milho                 | Aplicação de alta voltagem em soluções de biopolímeros, que são empurradas através de uma fiação para obtenção de fibras. Estas são obtidas finas e secas devido ao acúmulo de carga na superfície da gota que sai da fiação e são atraídas para o coletor de solo.                                                                                                      | Barril, fonte de alta tensão, elemento de aterramento            | Sim                | (Dekkers; Boom; Van der Goot, 2018; Librán; Castro; Lagaron, 2017; Miyoshi; Toyohara; Minematsu, 2005; Nicuwlund et al., 2014; Torres-Giner; Gimenez; Lagaron, 2008) |
| Fiação úmida    | soja, zeína, ervilha e fava | O processo consiste em bombear a solução alcalina de proteína pelo molde (ponteira fina) em um banho de coagulação contendo ácido e sal, o que resulta na precipitação e solidificação da proteína para formar as fibrilas, isto é, as finas fibras insolúveis                                                                                                           | Barril, banho-maria, bocal giratório, dispositivo de enrolamento | Não                | (Gallant et al., 1984; Rampon et al., 1999)                                                                                                                          |
| Mico proteína   | -                           | Produtos filamentosos são obtidos a partir da biomassa residual do processo de difusão do RNA de fungos <i>Fusarium venenatum</i> para o meio extracelular. O fungo produzido em processo contínuo de fermentação e submetido a tratamentos térmicos para a obtenção da biomassa, que passa por etapas de formação, vaporização, resfriamento e finalmente texturização. | Biorreator                                                       | Sim                | (Wiebe, 2002; WIEBE, 2004)                                                                                                                                           |
| Carne Cultivada | Tecido muscular esquelético | Cultivo de células musculares <i>in vitro</i> colhidas no músculo esquelético animal, utilizando técnicas de engenharia de tecidos, que posteriormente são replicadas e transformadas em carne a partir de campos elétricos (ou outras técnicas) que promovem o alinhamento e desenvolvimento das fibras musculares.                                                     | Biorreator                                                       | Não                | (Benjaminson; Gilchrist; Lorenz, 2002; Edelman et al., 2005; Post, 2012),                                                                                            |

FONTE: Adaptado de Dekkers; Boom; Van Der Goot (2018).

Quadro 4. Principais técnicas *top-down* aplicadas à texturização de proteínas

| <b>Técnica</b>                       | <b>Fonte proteica</b>                             | <b>Princípio</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | <b>Equipamento</b>                                                                                          | <b>Escalonável</b> | <b>Referência</b>                                                                                                                                                                                                                        |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Células de Cisalhamento              | Soja, glúten de trigo                             | Uso de cisalhamento e calor aplicados à dispersão de proteínas em solução de NaCl, levando a formação de estruturas fibrosas;                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Dispositivo do tipo cone-em-cone ( <i>shear cell</i> )                                                      | Não                | (Dekkers et al., 2016; Grabowska et al., 2014, 2016; Krintiras et al., 2014, 2015; Schreuders et al., 2019; Sha; Xiong, 2020)                                                                                                            |
| Extrusão seca                        | Soja, glúten de trigo, ervilha e o grão de bico   | Processo termomecânico na qual a proteína vegetal é submetida à combinação de calor, energia mecânica, pressão e umidade. Como resultado, a proteína sofre desnaturação seguido pelo seu alinhamento orientado e formação de rede, modificações que promovem a propriedade de anisotropia no produto obtido. Os produtos obtidos na Extrusão seca apresentam baixa umidade, enquanto àqueles obtidos na Extrusão úmida apresentam alta umidade (>50%) devido à presença de uma longa matriz de resfriamento, que evita a evaporação de água no produto. | Dispositivo com uma geometria de cilindro concêntrico ( <i>couette cell</i> )<br>Extrusora simples ou dupla | Sim                | (Arêas, 1992; Cheffell; Kitagawa; Quéguiner, 1992; Guyony; Fayolle; Jury, 2023; Kinney; Weston; Bauman, 2019; Mitchell et al., 1992; Samard; Gu; Ryu, 2019)                                                                              |
| Extrusão úmida                       | Soja, glúten de trigo, ervilha, amendoim e feijão |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                             |                    |                                                                                                                                                                                                                                          |
| Estruturação por congelamento        | Soja, glúten de trigo e ervilha                   | Consiste no congelamento unidirecional de uma solução proteica, o que leva a formação de cristais de gelo alinhados, que forçam a separação e compactação das proteínas. A desidratação do produto congelado permite gerar uma microestrutura de orientação paralela em forma de folha, que conectadas formam um material de morfologia anisotrópica.                                                                                                                                                                                                   | Congelamento unidirecional                                                                                  | Sim                | (MIDDENDORF; WAGGLE; CORNELL, 1973; LUGAY; KIM, 1978 <i>apud</i> . DEKKERS; BOOM; VAN DER GOOT, 2018; MEADE <i>et al.</i> , 2005 <i>apud</i> . GALDEANO, 2022; GUAN et al., 2010; YULIARTI; KIAT KOVIS; YI, 2021; OZTURK; HAMAKER, 2023) |
| Mistura de proteínas e hidrocolóides | soja, arroz, milho e tremoço                      | Uso de cátion multivalentes na precipitação de misturas (proteínas e hidrocolóides), seguida da lavagem e prensagem dos produtos fibrosos obtidos.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Misturador                                                                                                  | Sim                | (KWELDAM, 2011 <i>apud</i> . DEKKERS; BOOM; VAN DER GOOT, 2018)                                                                                                                                                                          |

FONTE: Adaptado de Dekkers; Boom; Van Der Goot (2018).

A partir dos Quadros 3 e 4, observa-se que a proteína de soja é frequentemente empregada na texturização de alimentos, independentemente do método utilizado. Isso se deve tanto às suas propriedades tecnológicas quanto nutricionais. No entanto, algumas dessas metodologias não são escalonáveis para a produção em larga escala, ao contrário do processo de Congelamento, que permite o escalonamento.

### 3.2.2. Estruturação por Congelamento

Também designada como “Alinhamento por Congelamento”, essa técnica consiste em congelar uma solução binária composta por água e biopolímeros, formando cristais de gelos em formatos de agulha ou folhas. Esses ocasionam a segregação e organização das proteínas, de forma que, durante a remoção de calor, seja formada uma estrutura porosa e fibrosa, tal qual os músculos da carne. É imprescindível que a remoção de calor seja unidirecional, pois só assim será formada a estrutura anisotrópica desejada (Ozturk; Hamaker, 2023; Yuliarti; Kiat Kovis; Yi, 2021).

O congelamento é uma técnica chave de conservação de alimentos que envolve mantê-los em temperaturas baixas para assim transformar a maior parte da água contida em gelo. Esse processo permite prolongar sua vida útil de dias ou meses, para anos (Damodaran; Parkin; Fennema, 2010; LeBail et al., 2003; Soyer et al., 2010). Congelar um alimento provoca estresse em suas proteínas, levando a potencial degradação ou desnaturação. À medida que o gelo se forma, há o aumento na concentração de solutos na fase líquida, o que pode levar à separação de fases. Outra consequência é a desestabilização das proteínas devido ao estresse osmótico resultante das concentrações mais elevadas de sais e outros solutos nesta fase. Por outro lado, a formação de gelo pode excluir solutos, levando a mudanças no pH na fase descongelada, o que também pode afetar a estabilidade das proteínas. Há também o que é denominado por desnaturação a frio, quando ocorrem mudanças nas características hidrofóbicas e alteração nos padrões de hidrogênio levando ao desdobramento e possível degradação das proteínas em temperaturas frias. Por fim, a formação de cristais de gelo pode perturbar fisicamente a estrutura das proteínas, especialmente aquelas que fazem parte das estruturas celulares, causando seu rompimento (Bhatnagar; Bogner; Pikal, 2007).

Para a texturização, os efeitos do congelamento podem ser considerados desejados, uma vez que se busca a fusão e desnaturação proteica controlada, o que torna possível obter uma textura semelhante à da carne (Chantanuson et al., 2024). Para resultados eficientes, é essencial que sejam feitos o monitoramento da temperatura de congelamento e o controle do crescimento dos cristais de gelo. Os cristais formados impactam diretamente na textura dos géis obtidos e

são influenciados pela taxa de congelamento imposta ao processo que afetam seu tamanho e forma (Alizadeh et al., 2007). É sabido que o congelamento rápido produz cristais menores, enquanto o congelamento lento, leva a cristais de gelo maiores, resultado desejável na texturização (Miyawaki; Yano; Abe, 1992; Provesi; Amante, 2015).

### 3.2.3. Princípios termodinâmicos aplicáveis ao congelamento de alimentos

A técnica de congelamento consiste em diminuir a temperatura do alimento normalmente para -18 °C ou menos, e ocorre em várias etapas: pré-resfriamento, transição de fase (quando a água se cristaliza) e estabilização (Fennema; Powrie; Marth, 1973 apud. Castro-Giráldez Et Al., 2014). Durante o congelamento, a condução, a convecção ou a radiação podem ser usadas para provocar a perda de energia pelo produto, e assim reduzir sua temperatura (Castro-Giráldez *et al.*, 2014). Justificada pela limitada condução de calor nos alimentos, o resfriamento nos métodos convencionais de congelamento começa na superfície e gradualmente se move em direção ao centro das amostras alimentares. Consequentemente, as taxas de congelamento diminuem na mesma direção (Alizadeh et al., 2007).

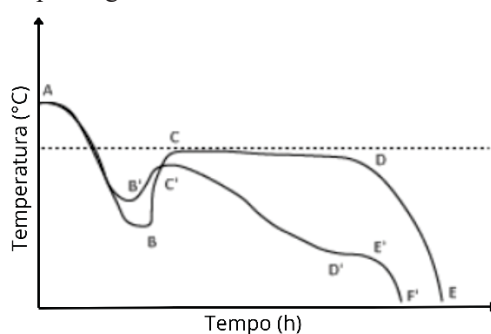
A taxa de congelamento afeta diretamente o crescimento dos cristais de gelo (Dalvi-Isfahan et al., 2019; Van der Sman et al., 2013). Dentre os fatores relacionados a ela está a espessura do produto congelado, o coeficiente de transferência de calor da superfície e a temperatura do meio de refrigeração (Jha et al., 2017). Estudos demonstraram que as amostras mais finas apresentaram uma transferência de calor mais rápida da superfície para o interior, havendo a mudança de fase da água para gelo rapidamente (Kaale et al., 2013). Comparações entre o congelamento por ar e por imersão foram realizadas, indicando que o segundo apresentava um coeficiente de transferência de calor mais alto, resultando no congelamento mais rápido e cristais de gelo menores ao congelar filés de baiacu escuros (*Takifugu Obscurus*) (Yang et al., 2020).

Para explicar a formação de cristais de gelo durante o congelamento existe a teoria da nucleação, que permite calcular a energia livre dos cristais de gelo como a soma de uma energia livre de superfície e uma energia livre de volume. A relação existente entre essas energias mencionadas demonstra que à medida que o raio do cristal aumenta, a energia livre do volume cresce mais rapidamente do que a energia livre de superfície, explicando a maior instabilidade encontrada para cristais menores (Tan; Mei; Xie, 2021). Essa instabilidade, comparada a grandes cristais de gelo, é explicada pelas moléculas de água na superfície de pequenos cristais de gelo apresentarem alta curvatura, sendo mais termodinamicamente instáveis (Alizadeh et al., 2007).

A entalpia é uma função de estado que quantifica o calor total presente no sistema, combinando a energia sensível associada às mudanças de temperatura e a energia latente associada à proporção de água congelada no produto (Hamdami; Monteau; Le Bail, 2004). Durante o congelamento, essa propriedade do sistema diminui, o que caracteriza o processo como exotérmico, ou seja, há liberação de calor à medida que o líquido se transforma em sólido (Powell-Palm, 2022). A partir dela define-se o calor específico como sendo a taxa de sua variação pela variação da temperatura ( $dH/dT$ ). Durante o congelamento, é considerada a contribuição do calor latente de fusão da água em uma propriedade chamada calor específico aparente (Hamdami; Monteau; Le Bail, 2004).

Compreender as propriedades termodinâmicas é fundamental para a análise e avaliação do processo de congelamento de alimentos. Esses conhecimentos permitem estimar o tempo total necessário para o congelamento de um produto, informação essencial para garantir a preservação de seu valor nutricional e de sua qualidade (Qiu et al., 2020; Soltani Firouz; Farahmandi; Hosseinpour, 2019). Além disso, dispor do tempo de congelamento possibilita a otimização de processos, a redução de custos operacionais e a inovação em diversos setores industriais (Assegehegn et al., 2019). O monitoramento desse processo permite construir curvas de temperatura em função do tempo, como as da Figura 2, que descrevem o comportamento típico observado no congelamento de água pura e de alimentos.

Figura 2. Curvas de congelamento para água e alimento



FONTE: Adaptado de Oliveira (2020).

Nas curvas típicas de comportamento da água (Figura 2), o pré-resfriamento (de A a B) envolve a remoção de calor do líquido, resultando na perda de energia sensível e na redução da energia cinética. Em B, ocorre o super-resfriamento, caracterizado pela queda da temperatura abaixo do ponto de equilíbrio líquido-sólido e pela nucleação dos cristais de gelo, fenômeno que provoca a liberação do calor latente de cristalização e o subsequente aumento térmico até o ponto de congelamento (C). A partir daí, inicia-se a segunda fase (de C a D), correspondente à transição de fase com liberação de calor latente. Por fim, a terceira etapa (de D a E)

compreende o declínio da temperatura do produto até sua estabilização no valor final predefinido (Castro-Giráldez et al., 2014; Damodaran; Parkin, 2019; Oliveira, 2020).

Para alimentos ou soluções, nas quais os solutos estão ligados à água, Kumar et al. (2020) explicam que durante o pré-resfriamento (de A a B') há uma redução no ponto de super-resfriamento (Ponto B') em razão das propriedades coligativas, o que impede a ocorrência de nucleação. Ao atingir o ponto de congelamento (Ponto C') inicia-se a solidificação da água, com liberação de calor latente e aumento gradual da concentração dos solutos, até alcançar o estado de super-saturação (Ponto D'). Nesse estágio, o sistema passa a se comportar de forma homogênea, em equilíbrio eutético, liberando o calor latente de cristalização do soluto. Isso provoca um aumento de temperatura até o ponto de solidificação eutética (E'). A partir daí, observa-se a queda da temperatura até alcançar a temperatura final do processo (Castro-Giráldez et al., 2014; Damodaran; Parkin, 2019; Oliveira, 2020; Rahman, 2006; Yu Et Al., 2012). Devido à heterogeneidade e complexidade de sua composição, o ponto de super-resfriamento (B') em alimentos pode não ser facilmente identificado na curva. Além disso, é comum que o congelamento seja interrompido antes de se alcançar o ponto eutético (E'). Isso ocorre porque a grande quantidade de solutos diminui a temperatura eutética, resultando em custos de processos elevados para atingir esse ponto (Ordoñez Pereda, 2005).

Jie, Lite, Yang (2003) estudaram o congelamento de diferentes frutas e seus respectivos sucos. A partir das curvas foram observados resultados diferentes entre eles, o que foi explicado pela diferença de composição, impedimento gerado pelas membranas celulares à formação dos cristais de gelo e pela respiração das frutas que emitem calor durante o processo. Diferenças na curva de congelamento foram observadas entre a batata e a água destilada. Cuibus et al. (2014) mostraram em seus testes que o ponto de congelamento para as amostras foi diferente, uma vez que o resultado da batata sofreu interferência pela presença de solutos. Outros alimentos também tiveram seu ponto de congelamento analisado usando a curva de congelamento, sendo eles o leite, o café, tâmaras e a carne de atum (Chen, X.; Chen, P., 1996; Chen et al., 1996; Barnett, 1973; Kasapis, Rahman; Guizani; Al-Aamri, 2000; Rahman et al., 2003; apud. Rahman, 2006).

### 3.3. HIDROCOLOIDES

Hidrocoloides, ou gomas, são polissacarídeos solúveis em água e/ou polissacarídeos modificados que são admitidos em formulações alimentares devido às suas propriedades gelificantes e nutricionais. São categorizados como amidos nativos e modificados e polissacarídeos não amiláceos, na maioria das vezes comercializados na forma de pó, com

tamanho variado das partículas (Damodaran; Parkin, 2019). Uma vez empregados, atuam sobre atributos nutricionais e texturais de análogos de carne (Yuliarti; Kiat Kovis; Yi, 2021), devido à sua capacidade de retenção de água (Majzoobi *et al.*, 2017 *apud.* Baune *et al.*, 2022). A aplicação de polissacarídeos vem sendo estudada com o objetivo de estabilizar e modificar as propriedades mecânicas em géis alimentares. A metilcelulose, a inulina, a pectina, além de amidos nativos e modificados, foram usados na emulsão de géis e apresentaram resultados satisfatórios em sua proposta de aplicação (Boison; Taranto; Cheryan, 1983; Wen *et al.*, 2021).

A formação de géis a partir de polissacarídeos pode ser induzida tanto pelo aquecimento quanto pela adição de agentes coagulantes, como sais ou ácidos, resultando na criação de estruturas poliméricas dentro da fase aquosa de uma emulsão. Géis mistos ou multicomponentes são preparados a partir de misturas de hidrocoloides com proteínas, e agem como agentes reticulantes e unindo filamentos de proteínas (Boison; Taranto; Cheryan, 1983 *apud.* Taghian Dinani *et al.*, 2023). Diferentes fatores podem influenciar as interações eletrostáticas entre essas duas moléculas durante a formação dos géis, tais como: massa molar, densidade de carga e flexibilidade dos polímeros; condições de mistura (pH, força iônica, temperatura, agitação, proporção de proteína em relação ao polissacarídeo e a sequência de adição das dispersões); e a ordem de mistura, estudada por Lin, Kelly e Miao (2021).

É sabido que o uso desses polissacarídeos afeta as propriedades de textura de análogos cárneos, tornando possível obter características de qualidade desejadas. Taghian Dinani *et al.* (2023) estudaram a influência de diferentes hidrocoloides na textura e em aspectos sensoriais de produtos à base de proteína de ervilha e do trigo. Foram usados: goma xantana, iota-carragenina, alginato de sódio, goma guar, carboximetilcelulose, goma gelana com baixo teor de acil, pectina com baixo teor de metilação e goma de alfarroba. Preparadas em três concentrações diferentes (1%, 2% ou 3% m/m), foi verificado que todos os hidrocoloides melhoraram positivamente o índice de anisotropia do análogo preparado. Estudos para a proteína de soja também mostraram que o emprego de diferentes hidrocoloides são capazes de afetar a textura desses produtos em análogos cárneos (Boison; Taranto; Cheryan, 1983; Palanisamy *et al.*, 2018; Yuliarti *et al.*, 2023).

Em estudos que aplicaram a técnica de alinhamento por congelamento, o alginato de sódio foi inserido nas formulações em quantidades variando de 1-2% m/m (Chantanuson *et al.*, 2022, 2024). Extraído de algas marinhas, esse carboidrato é amplamente utilizado na indústria como agente espessante, estabilizante e gelificante, sendo também empregado na produção de filmes e revestimentos comestíveis para aplicações alimentícias (Sellimi *et al.*, 2015). Além

disso, é conhecido por seu baixo custo, baixa citotoxicidade e alta degradabilidade (Yan; Lan; Xie, 2024).

O alginato de sódio é um polissacarídeo natural, aniônico e linear, composto por unidades estruturais de ácido  $\beta$ -D-manurônico (unidade M) e ácido  $\alpha$ -L-gulurônico (unidade G). Essas unidades estão conectadas por ligações 1,4-glicosídicas em três formas distintas: MM, GG e blocos MG. Os anéis dessas unidades possuem um grupo carboxila ( $-\text{COOH}$ ) e dois grupos hidroxila ( $-\text{OH}$ ) em diferentes orientações (Andrade et al., 2004; Larsen et al., 2003; Szekalska et al., 2016). Quando o grupo carboxila está ionizado, como no caso do alginato de sódio, o composto se torna altamente hidrofílico devido ao grande número de grupos polares, sendo facilmente solúvel em água e formando uma solução coloidal viscosa. Ele pode formar géis fracos sozinho ou géis mais fortes quando combinado com cátions divalentes como  $\text{Ca}^{2+}$ , através de uma cavidade formada pela ligação do ácido gulurônico adjacente ao grupo carboxila na estrutura do alginato, resultando em uma estrutura conhecida como caixa de ovo (Damodaran; Parkin; Fennema, 2010; Yan; Lan; Xie, 2024). Os géis formados são estáveis em uma faixa de pH entre 4,0 e 9,0, mas se desestabilizam a temperaturas acima de 60 °C, apresentando características de fluido newtoniano sob baixa taxa de cisalhamento, enquanto sob alta taxa de cisalhamento, torna-se pseudoplástico (Ekezie; Sun; Cheng, 2017).

### 3.4. AVANÇOS RECENTES EM PESQUISA SOBRE O TEMA

Estudos relacionados à estruturação por congelamento foram realizados nos últimos anos. Géis proteicos foram obtidos a partir da proteína de soja (farinha e isolado proteico) por Chantanuson et al. (2022). A técnica de congelamento foi utilizada para obter géis com características anisotrópicas. Observou-se uma relação direta com a concentração de proteínas na formulação, com resultados superiores para a farinha em comparação aos isolados proteicos, atribuídos ao alto poder gelificante dos isolados. Foram elaboradas formulações com três concentrações diferentes de sólidos (5%, 10% e 15%), compostas por: farinha de soja ou isolado proteico de soja, alginato de sódio, sal, glucono- $\delta$ -lactona, óleo de canola e água. Os resultados para a concentração de 10% mostraram características superiores às demais formulações, destacando-se a resistência à ruptura, que foi equivalente à da carne de frango usada como referência.

Em um novo trabalho, Chantanuson et al. (2024) estudaram o efeito na formação de estruturas alinhadas por congelamento a partir de isolados proteicos de soja, que foram submetidos a tratamento térmico seco. Foram verificados resultados promissores para o alinhamento e observado que o grau de anisotropia aumentou à medida que o índice de

solubilidade de nitrogênio e a solubilidade das proteínas diminuíram, uma vez que o isolado proteico da soja não submetido ao processo térmico apresentou menor anisotropia por apresentar alta capacidade de se ligar à água.

Ainda sobre as proteínas da soja, Masson; Fugmann (1998) investigaram as condições nas quais a criotexturização poderia ser aplicada na produção de produtos alternativos à carne. O estudo avaliou como o teor de sólidos, pH e temperatura de congelamento influenciam a textura do análogo produzido, utilizando análise sensorial conduzida por uma equipe de provadores treinados. O trabalho indicou que o pH no momento da texturização não afeta a textura final do produto, ao contrário do teor de sólidos, que interfere na cristalização da água e, consequentemente, na estrutura anisotrópica formada. Quanto ao congelamento, foram testadas temperaturas de -15 °C e -25 °C, sem observar diferenças significativas nas propriedades físicas (densidade aparente e capacidade de absorção de água) e nas características sensoriais. No entanto, o estudo ressalta a importância do congelamento lento para obter uma estrutura fibrosa, optando pela temperatura de -15 °C para garantir essa condição.

Outras proteínas foram exploradas usando o alinhamento de congelamento. Singh; Sit, (2025) buscaram otimizar a formulação à base de proteínas extraídas da semente de tamarindo de Manila, foi empregada a abordagem D-ótimo para misturas. Os resultados indicaram as seguintes proporções dos constituintes: 6,53% de isolado proteico, 1,23% de glúten, 1,15% de farinha de jaca e 3,6% de alginato de sódio, com a fração líquida representando 87,48%, na proporção de 10:1 (água:óleo). O processo de congelamento foi conduzido em moldes de silicone, utilizando liofilização a -10 °C, dividida em duas etapas de 8 horas cada. Entre essas etapas, a amostra foi estabilizada em solução de  $\text{CaCl}_2$  a 3%. Verificou-se um grau de anisotropia de 1,42, além da presença de estruturas em camadas nas proteínas texturizadas, conforme observado por micrografias eletrônicas.

As proteínas de ervilha e trigo também foram testadas. Yuliarti, Kiat Kavis e Yi (2021) obtiveram sucesso ao produzir nuggets a partir de proteínas vegetais, usando uma mistura de ervilha e trigo, indicando resultados positivos na textura usando o método de Alinhamento por Congelamento. Diferentes formulações foram preparadas contendo, para 100 g da amostra, água gelada (~4 °C; 57%), amido de batata (18%), óleo vegetal (3,5%), de cloreto de cálcio (0,2%), sal (0,3%), fermento em pó (2,5%) e Metilcelulose (1,5%). A composição de 4:13, proteína de ervilha: proteína do trigo, apresentou estrutura fibrosa e em camadas, responsáveis pela microestrutura anisotrópica apropriada ao análogo à carne, sendo considerada a melhor entre os formulados. Esse resultado se deve à relação entre as estruturas observadas e as propriedades viscoelásticas, sendo afetadas pelas ligações cruzadas entre proteínas.

A técnica de congelamento também foi utilizada por Nakagawa et al., (2024), empregando pó de grilo (*Acheta domestica*) como fonte proteica, em combinação com a farinha de arroz e a farinha de arroz pegajosa, ricas em carboidratos, em suas formulações. Outros componentes utilizados na composição das amostras incluíram alginato de sódio, sal, glutamato monossódico, pimenta, óleo e água. Foram observadas estruturas multicamadas nos géis proteicos formados, e a formulação considerada ideal ao final dos testes apresentou uma proporção de 6:1 de pó de grilo para farinha de arroz pegajosa, resultando em melhorias na textura, estrutura da fibra e valor nutricional em relação às outras formulações. O estudo destacou a influência da técnica de congelamento na maior capacidade de retenção de água das amostras, impactando suas propriedades viscoelásticas.

O pó de pupa de bicho-da-seda também foi utilizado como fonte proteica na elaboração de análogos à carne. Boonarsa et al. (2025) aplicaram três diferentes teores desse ingrediente para avaliar as propriedades físico-químicas e texturais de produtos obtidos por congelamento. Os géis formados apresentaram melhorias na viscosidade e nas características gelatinosas. No entanto, observou-se uma redução na capacidade de retenção de água e no conteúdo total de sulfidrila à medida que aumentava a concentração da proteína de pupa. Além disso, houve aumento no teor de proteínas, diminuição no teor de carboidratos e melhora nas propriedades de mastigabilidade, coesividade e firmeza. Estruturas fibrosas foram identificadas em formulações com 5% e 10% de proteína, evidenciando o potencial dessa matéria-prima para o desenvolvimento de produtos análogos.

Diante dos avanços na área, este estudo investiga a aplicação do congelamento na estruturação de géis proteicos. A metodologia empregada baseia-se em uma formulação de baixa complexidade, que utiliza exclusivamente proteína vegetal e um agente gelificante. O processo de congelamento em uma única etapa, realizado em um refrigerador doméstico, facilita sua replicação e representa uma alternativa de menor custo, tornando-o acessível a pequenas empresas. A estrutura e as propriedades são analisadas por meio de técnicas mecânicas e estruturais que permitem a avaliação da textura e da cor. Por fim, essas características são comparadas às de três produtos cárneos de consumo comum, com o objetivo de determinar a aproximação com o material de referência.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

A presente seção detalha os materiais e métodos aplicados na pesquisa, descrevendo os procedimentos técnicos para garantir a compreensão e reprodutibilidade do estudo.

### 4.1. MATERIAIS

Os materiais necessários para que o projeto seja realizado estão apresentados a seguir.

- Isolado Proteico de Soja (IPS) doado pela Bremil S/A Indústria de Produtos Alimentícios – International Flavors & Fragrances;
- Alginato de sódio (AS) – êxodo científica (Pureza mínima de 90,8%);
- Ácido láctico – Nuclear;
- Formas de Poliestireno Expandido cilíndricas, de dimensões 110 x 68 x 82 mm (altura, diâmetro interno e diâmetro externo);
- PHmetro – QUIMIS;
- Chapa de aquecimento e agitação NOVA ÉTICA – 114;
- Banho-maria Nova Ética – 0580/04;
- Centrífuga HERMLE – Z 383 K;
- Espectrofotômetro NOVA – 1600UV;
- Agitador Mecânico Fisatom – 713 DX;
- Freezer Doméstico Eletrolux – PROSDOCIMO H40C;
- Sensor PT-100;
- Registrador de Dados LogBox BLE – NOVUS PRODUTOS ELETRÔNICOS LTDA;
- Autoclave Vertical PHOENIX – AV 30;
- Aqualab – 3 TE;
- Texturômetro Brookfield – CT3 25K;
- Colorímetro MiniScan – XE Plus;
- Microscópio Eletrônico de Varredura – Zeiss EVO MA 15;
- Lupa – Biotika 5MP.

### 4.2. MÉTODOS

#### 4.2.1. Caracterização e Propriedades Funcionais da Matéria-Prima

Como mencionado anteriormente, a caracterização da matéria-prima é essencial para entender e detalhar sua composição e propriedades funcionais. A seguir, estão apresentadas as análises que serão realizadas neste primeiro bloco.

#### 4.2.1.1. Composição química

A composição do IPS foi analisada em relação aos teores de umidade e cinzas, utilizando o método gravimétrico (012/IV e 018/IV). A quantificação de lipídeos seguiu o método 032/IV, enquanto a determinação das proteínas foi realizada pelo método de Kjeldahl (037/IV), considerando o fator  $N \times 6,25$ . Os carboidratos foram calculados por diferença. Já a fibra alimentar total foi obtida pelo método enzimático-gravimétrico (045/IV). Todos os métodos seguidos estão descritos por IAL, (2008).

#### 4.2.1.2. Solubilidade de Proteínas (SP%) e Índice de Solubilidade de Nitrogênio (ISN%)

A SP (%) foi determinada de acordo com MORR et al., (1985). O IPS ( $M_{IPS}$ , 0,4 g) foi disperso em solução de NaCl (0,15 mol/L, 40 mL) utilizando um agitador magnético por 1 h. A dispersão foi então centrifugada (HERMLE – Z 383 K, 20.000 g, 30 min) e o sobrenadante filtrado em papel de filtro quantitativo. A concentração de proteína ( $CP_s$  (mg/mL)) foi determinada em 1 mL ( $V_s$ ) de sobrenadante pelo método do biureto (padrão BSA e Espectrofotômetro Shimadzu, UV-1800 padrão BSA e ESPEC). A proteína presente no sobrenadante foi analisada e a solubilidade calculada pela Equação 1, considerando o conteúdo de proteína total ( $P_T$ ).

$$SP(\%) = 100 \times \frac{(CP_s \times V_s)}{M_{IPS} \times \frac{P_T}{100}} \quad (1)$$

O ISN do IPS foi determinado em uma dispersão de 2% m/m. Para a análise, 1 g da amostra foi colocado em tubos Falcon, seguido da adição de 49 mL de água Milli-Q. A dispersão foi agitada por 24 h. Em seguida, as amostras foram centrifugadas ( $15.000 \times g$ , 20 °C, 10 min), os sobrenadantes foram descartados, e os pellets úmidos transferidos para um cadinho de alumínio. Para o cálculo, os pellets úmidos foram pesados ( $M_{PU}$ ) e então secos em estufa a 105 °C por 24h. Após a secagem, os pellets secos ( $M_{PS}$ ) e a amostra original ( $M_O$ ) foram pesados. O teor de nitrogênio no pellet seco ( $N_{PS}$ ) e na amostra original ( $N_O$ ) foi determinado pelo método Kjeldahl como no IPS. Todas as medições foram realizadas em triplicata. O valor do ISN foi calculado pela Equação 2, conforme realizado por Jia et al. (2022).

$$ISN (\%) = \frac{(N_O \times M_O) - (N_{PS} \times M_{PS})}{N_O \times M_O} \quad (2)$$

#### 4.2.2. Preparo do gel proteico

Neste segundo bloco são descritas as metodologias para a formulação do gel proteico, que serve de base para a obtenção do texturizado por congelamento. Além disso, é descrito o Delineamento Experimental empregado no estudo das propriedades Dureza e Coesividade.

##### 4.2.2.1. Alinhamento por congelamento

A formulação para a obtenção do gel proteico foi preparada na metodologia de Masson; Fugmann, (1998) modificada, sendo adicionado AS à formulação. Assim, o IPS foi hidratado em dispersão 10% (m/v) agitada durante 2h em temperatura ambiente e levado ao banho maria refrigerado a 4°C durante 12h. Em seguida, a dispersão passou pela coagulação utilizando solução salina (CaCl<sub>2</sub>, 5%) e banho-maria a 90 °C por 2 h. O material resultante dessa etapa foi dessorado e empregado na formulação, na qual foram adicionados Alginato de Sódio (AS), na proporção de 9,5:0,5 (IPS:AS), e água, com o pH ajustado por meio da adição de ácido láctico. O produto formulado foi transferido para moldes de isopor e submetido ao congelamento por 36 horas em freezer (Electrolux PROSDOCIMO H40C). Após o congelamento, as amostras texturizadas foram estabilizadas com vapor em autoclave (marca HOENIX), operando a 1,4 kgf/cm<sup>2</sup> por 40 min, resfriadas a temperatura ambiente (20 °C) e levadas às análises de interesse.

##### 4.2.2.2. Delineamento Experimental empregado no estudo das propriedades Dureza e Coesividade

O software OriginPro, (2025) foi utilizado para estudar sistematicamente três variáveis de processo, sendo elas: *Teor de Sólidos* –  $X_1$ , *pH* –  $X_2$ , e *Temperatura de Congelamento* –  $X_3$ . Esses parâmetros foram avaliados quanto às propriedades de textura (*Dureza* –  $Y_1$  e *Coesividade* –  $Y_2$ ) e o teor de proteínas do produto. Dessa forma, o delineamento fatorial completo de dois níveis e 3 fatores (DFC 2<sup>3</sup>), com duplicata no ponto central, foi empregado para identificar variáveis experimentais e interações que influenciam significativamente a produção de texturizados proteicos de soja usando congelamento.

As respostas obtidas foram obtidas experimentalmente e a equação de primeira ordem apresentada na Equação 6 foi ajustada aos dados experimentais para estimar os seus coeficientes.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{j < i} \sum \beta_{ij} X_i X_j + \epsilon \quad (3)$$

Onde  $X$  corresponde as variáveis controláveis de processo (em unidades codificadas),  $Y$  corresponde as variáveis resposta estudadas, o  $\beta_0$  é o coeficiente constante,  $n$  é o número de fatores,  $\beta_i$  representa os coeficientes dos parâmetros lineares,  $\beta_{ij}$  representa os coeficientes dos parâmetros de interação, e  $\epsilon$  o termo de erro.

As variáveis de processo tiveram seus níveis (baixo e alto) estabelecidos com base em estudos preliminares, sendo  $X_1$  – *Teor de Sólidos* (5% e 13%),  $X_2$  – *pH* (5,0 e 6,0) e  $X_3$  – *Temperatura de Congelamento* (-15 °C e -5 °C). O ponto central foi definido como 9%, 5,5 e -10°C para  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_3$  respectivamente. O DFC apresentado na Tabela 1, contou com 10 ensaios executados de maneira aleatória para eliminar possíveis vieses conforme explica Mohd Sharif; Jamaluddin; Zainol, (2021). A análise estatística foi conduzida no software OriginPro, (2025), adotando-se um nível de confiança de 95% (p-valor < 0,05) usando regressão linear e análise de variância (ANOVA, apresentadas nos Anexos 1 e 2) para avaliar a significância dos efeitos. A análise foi feita inicialmente para os efeitos principais e as interações secundárias, sendo as variáveis não significativas retiradas e o modelo novamente testado. Uma vez que o modelo se apresentou adequado com base no  $R^2$  e  $R^2$  ajustado, ele foi estabelecido e apresentado neste trabalho.

Tabela 1 . Delineamento Fatorial Completo 2<sup>3</sup> com duplicata no ponto central apresentados em ordem padrão

| Ordem<br>Padrão | Ordem<br>Aleatória | Teor de Sólidos<br>(%)<br>$X_1$ | pH<br>-<br>$X_2$ | Temp. de<br>Congelamento<br>°C<br>$X_3$ |
|-----------------|--------------------|---------------------------------|------------------|-----------------------------------------|
| 1               | 8                  | 5 (-1)                          | 5,0 (-1)         | -15 (-1)                                |
| 2               | 2                  | 13 (1)                          | 5,0 (-1)         | -15 (-1)                                |
| 3               | 3                  | 5 (-1)                          | 6,0 (1)          | -15 (-1)                                |
| 4               | 5                  | 13 (1)                          | 6,0 (1)          | -15 (-1)                                |
| 5               | 9                  | 5 (-1)                          | 5,0 (-1)         | -5 (1)                                  |
| 6               | 10                 | 13 (1)                          | 5,0 (-1)         | -5 (1)                                  |
| 7               | 1                  | 5 (-1)                          | 6,0 (1)          | -5 (1)                                  |
| 8               | 4                  | 13 (1)                          | 6,0 (1)          | -5 (1)                                  |
| 9               | 7                  | 9 (0)                           | 5,5 (0)          | -10 (0)                                 |
| 10              | 6                  | 9 (0)                           | 5,5 (0)          | -10 (0)                                 |

FONTE: Elaborado pelo autor usando OriginPro (2025). Os números indicados entre parêntesis nas colunas das variáveis  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_3$  correspondem aos níveis baixo, alto e central (-1, 1 e 0).

#### 4.2.3. Análise de Cor e Perfil de Textura dos géis proteicos e carnes convencionais

A seguir, são detalhadas as metodologias para o preparo das carnes convencionais e a avaliação de cor e textura dos géis proteicos e das mesmas.

##### 4.2.3.1. Cor

As medidas de cor foram realizadas utilizando um colorímetro MiniScan XE Plus, HunterLab. A avaliação da cor (CIE  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) foi realizada na superfície dos amostra em pontos diferentes, e os valores croma ( $C^*$ ) e ângulo hue ( $h^\circ$ ) foram calculados conforme as Equações 3 e 4 respectivamente. A diferença total da cor ( $\Delta E^*$ ) da amostra foi obtida em relação aos alimentos cárneos, sendo calculado conforme a Equação 5. Buscou-se realizar a análise de cor conforme Pathare; Opara; Al-Said, (2013).

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (4)$$

$$h^\circ = \tan^{-1} \left( \frac{b^*}{a^*} \right) \quad (5)$$

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

##### 4.2.3.2. Textura

A análise de textura seguiu o teste *Texture Profile Analysis* (TPA – Análise do perfil de textura) como nos trabalhos (Gonçalves; Magalhães, 2018; Wagner et al., 2024; Yuliarti; Kiat Kovis; Yi, 2021) com adaptações. Dessa maneira, cada amostra passou por duas compressões seguidas e o teste foi realizado 5 amostras diferentes para cada tratamento. A compressão foi realizada com velocidade pré-teste 1,0 mm/s, teste de 2,0 mm/s e pós-teste de 2,0 mm/s, definida para 30% do tamanho da amostra, com probe cilíndrica de 38 mm (diâmetro) e força

de gatilho de 25 kg. Assim, as propriedades dureza, coesividade, elasticidade e mastigabilidade do análogo produzido foram obtidos usando o analisador de textura CT3 25K, BROOKFIELD.

#### 4.2.3.3. Preparo das carnes

Peito de frango, filé de peixe Panga e contrafilé bovino foram utilizados como parâmetros de comparação dos produtos desenvolvidos neste estudo. O peito de frango e o filé de peixe foram cortados em pedaços de 40×40×20 mm e submetidos ao cozimento em autoclave, seguindo os mesmos parâmetros da etapa de estabilização empregada na preparação dos análogos de carne. O contrafilé, por sua vez, foi fatiado em bifes de 2,5 cm de espessura e grelhado em fogo médio por 2,5 minutos de cada lado, tempo suficiente para atingir o ponto ideal para consumo de churrasco no Brasil. Após o preparo, os materiais foram deixados em repouso até atingirem a temperatura ambiente (20 °C), para então serem submetidos à análise de TPA, seguindo o mesmo procedimento descrito no tópico [4.2.3.2. Textura.](#)

#### 4.2.4. Caracterização do Gel Proteico

Os géis proteicos foram estudados por diferentes análises (químicas, físico-químicas, físicas) para uma compreensão abrangente de suas propriedades. Os métodos utilizados estão descritos a seguir.

##### 4.2.4.1. Teor de proteína

O teor de proteínas foi estabelecido a mesma maneira que na matéria prima, usando o método 037/IV IAL, (2008).

##### 4.2.4.2. Acidez titulável

A acidez foi determinada pelo método titulométrico 312/IV segundo IAL, (2008) com adaptações.

##### 4.2.4.3. pH

O valor de pH das amostras foi determinado pelo método potenciométrico utilizando-se o eletrodo do pHmetro digital em uma dispersão 10% (m/v) formada pelo análogo moído e água deionizada, sendo a metodologia adaptada de IAL, (2008).

##### 4.2.4.4. Teor de umidade

O teor de umidade do análogo foi determinado utilizando o Analisador de Umidade IVT 200, da marca Gehaka, por infravermelho a 105°C, conforme Chantanuson et al., (2024). A massa da amostra foi monitorada até que a variação fosse inferior a 0,05% em relação à massa inicial. Por fim, a umidade foi calculada com base na diferença entre a massa da amostra antes e depois da análise.

#### 4.2.4.5. Atividade de água ( $a_w$ )

A atividade de água foi determinada utilizando o analisador de atividade de água da marca AquaLab, modelo de serie 3 TE, introduzindo a amostra no recipiente, e posteriormente no equipamento onde é feita a leitura.

#### 4.2.5. Avaliação da estrutura do gel proteico

As metodologias a seguir descrevem como foram realizadas a avaliação da macroestrutura e da microestrutura formada ao aplicar técnica de alinhamento por congelamento na obtenção dos géis proteicos.

##### 4.2.5.1. Aparência visível

As amostras foram seccionadas longitudinalmente expondo sua estrutura interna. Em seguida, imagens foram feitas utilizando uma câmera digital como realizado por (Singh; Sit, 2025). Posteriormente, a amostra foi fracionada ao meio e em seguida seccionado em dimensões de 10x10 mm, sendo congelado rapidamente usando nitrogênio líquido e então liofilizado. O material seco teve então sua macroestrutura observada em uma lupa, marca Biotika e modelo 5MP, disponível no Laboratório de Anatomia da Madeira do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Para aprimorar a observação, foram utilizadas lentes de aproximação de 2X, permitindo maior nitidez na análise. As imagens obtidas foram registradas para uso no trabalho.

##### 4.2.5.2. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi aplicada conforme Yuliarti et al. (2019) salvo algumas modificações. Foi utilizando um Microscópio Eletrônico de Varredura Zeiss, modelo EVO MA 15, disponível no Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM) na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). O preparo

das amostras foi similar ao realizado para as análises em lupa, sendo o material metalizado com ouro após a liofilização.

#### 4.2.5.3. Grau de Texturização

O Grau de Texturização (GT) foi determinado seguindo Chen et al., (2010), com algumas modificações. As amostras foram cortadas com uma faca cilíndrica de 12,5 mm de diâmetro. Utilizando a sonda TA7, as amostras foram cortadas até 75% de sua espessura original, a uma velocidade de 1 mm/s. O teste foi repetido pelo menos 10 vezes, nas direções vertical ( $F_V$ ) e transversal ( $F_L$ ) ao comprimento das fibras, sendo o GT calculado pela razão entre  $F_V$  e  $F_L$ .

#### 4.2.6. Obtenção das curvas de congelamento

A curva de temperatura foi obtida conforme realizado por Jie et al. (2003). Foram utilizados sensores tipo PT-100, posicionados em 5 pontos diferentes da amostra. Três sensores foram alinhados verticalmente no centro da amostra, respeitando um espaçamento de 30 mm entre o ponto inferior (Ponto 1), o ponto central (Ponto 2) e o ponto superior (Ponto 3) e dois sensores (Pontos 4 e 5) foram dispostos horizontalmente em relação ao ponto inferior, localizados próximos à base da forma e separados entre si por 20 mm. As medições de temperatura foram registradas com o equipamento Novus – LogBoxble, em intervalos regulares de 60 segundos, sendo encerradas ao término do processo de congelamento. A partir desses dados serão estimados o tempo efetivo de congelamento e o ponto de congelamento.

#### 4.2.7. Análise estatística

As análises foram realizadas em replicatas, sendo os resultados expressos como média  $\pm$  desvio padrão. A análise estatística foi realizada por ANOVA ao nível de confiança de 95% ( $p \leq 0,05$ ). O teste de Tukey foi utilizado para verificar diferenças significativas entre as médias, também ao nível de confiança de 95%, sendo representadas pelas diferentes letras maiúsculas dentro de uma mesma coluna para a caracterização dos géis proteicos. O software OriginPro (2025) foi utilizado para a realização de todas as análises.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, os resultados da pesquisa são apresentados e discutidos usando a literatura existente de forma a contemplar os objetivos do trabalho.

### 5.1. CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA

O Isolado Proteico de Soja (IPS) empregado neste estudo trata-se de um produto comercial fornecido pela Bremil S/A, sob a denominação PROT ISOLADA DE SOJA PE GMO. Conforme especificado na ficha técnica fornecida pelo fabricante, o IPS é obtido por meio de processos industriais de lavagem e centrifugação, destinados à remoção de carboidratos da farinha de soja. Entretanto, não foram fornecidos detalhes quanto aos parâmetros utilizados no processo, tais como temperatura, reagentes extratores ou demais condições operacionais. Em base seca, o teor de proteína do material apresenta variação entre 88 e 92%, respeitando o mínimo de 88% estabelecido pela RDC Nº 268 (BRASIL, 2005), estando sua composição em base úmida apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Composição centesimal do IPS em base úmida

| Umidade (%) | Proteínas (%) | Cinzas (%)  | Lipídeos (%) | Fibras (%)  | Carboidratos (%) |
|-------------|---------------|-------------|--------------|-------------|------------------|
| 6,16 ± 0,00 | 79,13 ± 0,82  | 4,65 ± 0,04 | 0,19 ± 0,04  | 4,49 ± 0,01 | 5,38             |

FONTE: Elaborado pelo autor (2025).

As propriedades funcionais do IPS foram avaliadas quanto à solubilidade proteica em meio aquoso e em solução salina (NaCl 0,15 mol/L), e ao índice de solubilidade do nitrogênio (ISN). Os resultados dessas análises estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Propriedades funcionais do IPS

|                        |              |
|------------------------|--------------|
| SP <sub>água</sub> (%) | 19,78 ± 0,21 |
| SP <sub>NaCl</sub> (%) | 8,88 ± 0,26  |
| ISN (%)                | 62,15 ± 0,03 |

FONTE: Elaborado pelo autor (2025). Os resultados são expressos como média ± desvio padrão (DP), considerando três repetições.

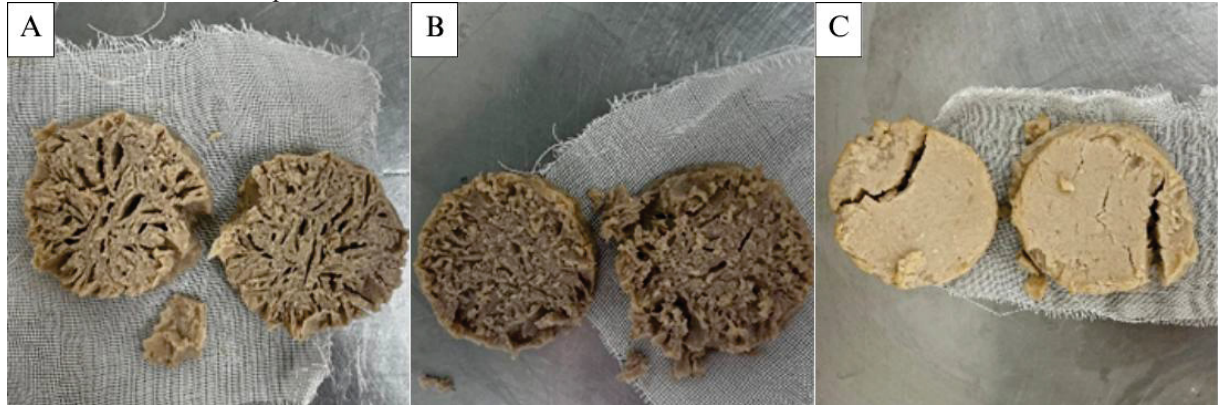
A solubilidade da proteína se mostrou maior em água do que em solução salina, efeito resultante da força iônica do meio. De acordo com Damodaran, Parkin e Fennema (2010), em soluções de força iônica < 0,5 os íons interagem com a proteína da soja neutralizando sua superfície, o que reduz sua solubilidade. Segundo Căpriță; Căpriță; Crețescu, (2010), no processamento da farinha de soja, após a extração lipídica com solventes como o hexano, é comum a aplicação de calor para recuperação do solvente e inativação de fatores antinutricionais. No entanto, o uso de temperaturas elevadas pode comprometer as propriedades

funcionais da farinha, que funcionam como indicadores do grau de processamento térmico ao qual o material foi submetido. Solórzano Lemos, Costa De Mello e Chaves Cabral, (1997) investigaram o impacto da temperatura em extratos hidrossolúveis de soja, observando uma redução do ISN de 90,57% para 25,31%. De forma semelhante, Chantanuson et al., (2024) avaliaram IPS submetidas a tratamento térmico e constataram variações significativas tanto no ISN quanto na solubilidade proteica. O ISN apresentou queda de 97,5% para 4,7%, enquanto a solubilidade proteica diminuiu de 10,29% para 4,7%, atingindo até 1,99% sob a mesma condição experimental. Neste estudo, o ISN apresentou solubilidade de 62,15%, menor que aqueles encontrados para IPS que não haviam sido submetidos à ação do calor, mas ainda superior àqueles tratados termicamente. Esse resultado sugere o emprego de calor moderado no processo de obtenção do IPS.

## 5.2. OBTENÇÃO DO TEXTURIZADO PROTEICO DE SOJA E DEFINIÇÃO DO TEOR DE ALGINATO DE SÓDIO

Diferentes amostras foram preparadas usando IPS e AS a fim de verificar a efetividade da texturização usando congelamento. Assim, os testes mantiveram o teor de sólidos em 10%, variando em proporções IPS:AS em 9,5:0,5, 9:1, 8:2. As amostras foram identificadas como A, B e C respectivamente, sendo preparadas em pH 6 e submetidas à -10 °C para congelamento durante 36 horas. A Figura 3 ilustra a textura obtida para as três diferentes concentrações de AS utilizadas no experimento. Verificou-se que, à medida que o teor de AS aumentou nas amostras, houve uma redução na formação da textura folhosa ou lamelar desejada. Esse efeito está relacionado ao processo de congelamento: após a cristalização, é essencial que a água livre presente no material possa se mover e contribuir para o crescimento dos cristais, formando espaços vazios que, ao serem descongelados, promovem a textura característica do produto. Com base na análise visual das amostras, a formulação A foi considerada a mais adequada, por apresentar uma distribuição mais homogênea da textura folhosa ao longo da estrutura.

Figura 3. Texturizados obtidos usando congelamento sendo (A), (B) e (C) amostras contendo proporção IPS:AS de 9,5:0,5, 9:1 e 8:2 respectivamente



FONTE: Elaborado pelo autor (2025).

### 5.3. ANÁLISE DO DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

A seguir são apresentados e discutidos detalhes do delineamento experimental, o qual teve os resultados apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 . Resultados obtidos para *Dureza* ( $Y_1$ ) e *Coesividade* ( $Y_2$ ) usando Delineamento Fatorial Completo  $2^3$  com duplicata no ponto central apresentados

| Ordem Padrão | Ordem Aleatória | Teor de Sólidos (%)<br>$X_1$ | pH<br>$X_2$ | Temp. de Congelamento °C<br>$X_3$ | Dureza (N)<br>$Y_1$ | Coesividade<br>$Y_2$ |
|--------------|-----------------|------------------------------|-------------|-----------------------------------|---------------------|----------------------|
| 1            | 8               | 5 (-1)                       | 5,0 (-1)    | -15 (-1)                          | 81,62±2,30          | 0,65±0,01            |
| 2            | 2               | 13 (1)                       | 5,0 (-1)    | -15 (-1)                          | 83,76±2,19          | 0,63±0,02            |
| 3            | 3               | 5 (-1)                       | 6,0 (1)     | -15 (-1)                          | 50,26±0,52          | 0,70±0,01            |
| 4            | 5               | 13 (1)                       | 6,0 (1)     | -15 (-1)                          | 98,45±1,06          | 0,64±0,01            |
| 5            | 9               | 5 (-1)                       | 5,0 (-1)    | -5 (1)                            | 74,94±1,93          | 0,62±0,01            |
| 6            | 10              | 13 (1)                       | 5,0 (-1)    | -5 (1)                            | 125,42±8,12         | 0,63±0,03            |
| 7            | 1               | 5 (-1)                       | 6,0 (1)     | -5 (1)                            | 44,65±2,73          | 0,71±0,04            |
| 8            | 4               | 13 (1)                       | 6,0 (1)     | -5 (1)                            | 127,16±3,12         | 0,68±0,01            |
| 9            | 7               | 9 (0)                        | 5,5 (0)     | -10 (0)                           | 93,06±2,06          | 0,66±0,02            |
| 10           | 6               | 9 (0)                        | 5,5 (0)     | -10 (0)                           | 91,86±4,88          | 0,67±0,02            |

FONTE: Elaborado pelo autor usando OriginPro (2025). Os números indicados entre parêntesis nas colunas das variáveis  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_3$  correspondem aos níveis baixo, alto e central (-1, 1 e 0). Os resultados  $Y_1$  e  $Y_2$  estão indicados por sua média ± desvio padrão (DP), com base em cinco repetições.

#### 5.3.1. Significância do modelo

Os resultados apresentados na Tabela 5 são referentes à variável resposta *Dureza* ( $Y_1$ ) para o modelo da Equação 6 ajustado aos dados experimentais.

Tabela 5. Coeficientes estimados do modelo para a resposta *Dureza* ( $Y_1$ )

|  | Effect                    | Value    | Standard Error | t-Value | Prob >  t |
|--|---------------------------|----------|----------------|---------|-----------|
|  | <b>(Intercept)</b>        | 87,119   | 1,6898         | 51,5556 | 8,47E-07  |
|  | $X_1$                     | 45,8258  | 22,913         | 1,8893  | 0,0003    |
|  | $X_2$                     | -11,3025 | -5,651         | 1,8893  | 0,0403    |
|  | $X_3$                     | 14,5208  | 7,260          | 1,8893  | 0,0184    |
|  | $X_1 * X_2$               | 19,5225  | 9,761          | 1,8893  | 0,0067    |
|  | $X_1 * X_3$               | 20,6658  | 10,333         | 1,8893  | 0,0054    |
|  | <b>R<sup>2</sup></b>      | 0,983    |                |         |           |
|  | <b>Adj. R<sup>2</sup></b> | 0,961    |                |         |           |

FONTE: Elaborado pelo autor usando o software OriginPro (2025).

A partir da análise usando p-valor menor que  $\alpha$  (0,05) observa-se que a constante (na tabela indicada como “*intercept*”), os efeitos principais  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ , e os efeitos de interação  $X_1 * X_2$  e  $X_1 * X_3$  apresentaram coeficientes significativos, sendo considerados estatisticamente diferente de zero. Em outras palavras, esses efeitos são associados à resposta *Dureza* ( $Y_1$ ) pela Equação 7 apresentada a seguir.

$$Y_1 = 87,12 + 22,91 X_1 - 5,65 X_2 + 7,26 X_3 + 9,76 X_1 * X_2 + 10,33 X_1 * X_3 \quad (7)$$

O mesmo procedimento de análise foi realizado para a variável de resposta *Coesividade* ( $Y_2$ ) que tem os coeficientes apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Coeficientes estimados do modelo para a resposta *Coesividade* ( $Y_2$ )

|  | Effect                             | Value  | Standard Error | t-Value  | Prob >  t |        |
|--|------------------------------------|--------|----------------|----------|-----------|--------|
|  | <i>(Intercept)</i>                 | 0,659  | 0,0028         | 232,0052 | 1,77E-07  |        |
|  | <i>X<sub>1</sub></i>               | -0,029 | -0,014         | 0,0032   | -4,4861   | 0,0207 |
|  | <i>X<sub>2</sub></i>               | 0,051  | 0,025          | 0,0032   | 7,9942    | 0,0041 |
|  | <i>X<sub>3</sub></i>               | 0,001  | 0,001          | 0,0032   | 0,1700    | 0,8759 |
|  | <i>X<sub>1</sub>*X<sub>2</sub></i> | -0,024 | -0,012         | 0,0032   | -3,7256   | 0,0337 |
|  | <i>X<sub>1</sub>*X<sub>3</sub></i> | 0,014  | 0,007          | 0,0032   | 2,1900    | 0,1163 |
|  | <i>X<sub>2</sub>*X<sub>3</sub></i> | 0,021  | 0,011          | 0,0032   | 3,3523    | 0,0440 |
|  | <b>R<sup>2</sup></b>               | 0,974  |                |          |           |        |
|  | <b>Adj. R<sup>2</sup></b>          | 0,923  |                |          |           |        |

FONTE: Elaborado pelo autor usando o software OriginPro (2025).

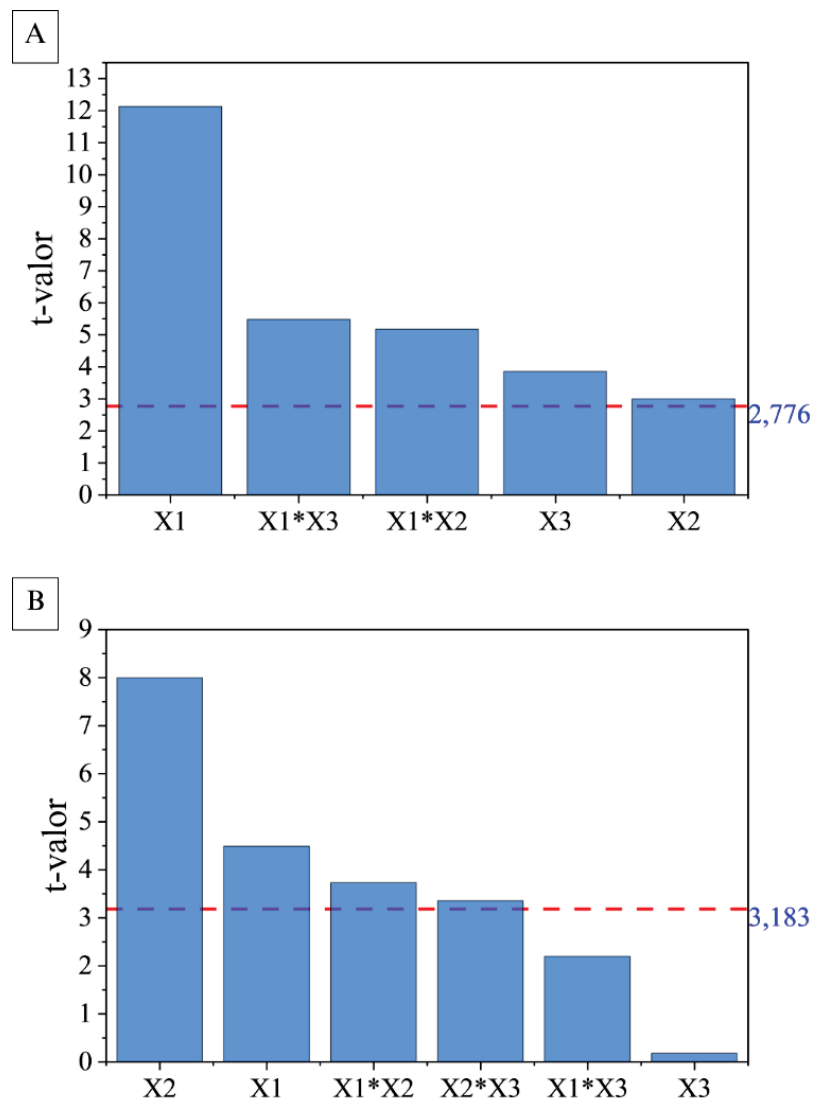
Para a segunda variável resposta analisada ( $Y_2$ ) os coeficientes significativos estimados foram diferentes da primeira. Para este, a constante “(*intercept*)”, os efeitos principais  $X_1$  e  $X_2$ , e os efeitos de interação  $X_1 * X_2$ ,  $X_2 * X_3$  foram significativos para p-valor a 5% de significância (p-valor<0,05), estando associadas ao modelo gerado. Diferente do modelo obtido para a variável *Dureza* ( $Y_1$ ), os coeficientes  $X_3$  e  $X_1 * X_3$  não foram significativos. Portanto, foram retirados da Equação 8 que descreve o modelo obtido para a variável *Coesividade* ( $Y_2$ ).

$$Y_2 = 0,66 - 0,01 X_1 + 0,03 X_2 - 0,01 X_1 * X_2 + 0,01 X_2 * X_3 \quad (8)$$

A análise do teste *t de Student* também pode ser feita a partir do valor de *t*-crítico. Os modelos de  $Y_1$  e  $Y_2$  respectivamente tiveram seus efeitos representados no Diagrama de Pareto

(Figura 4), nos quais esses foram ordenados em grau de importância do mais significativo para o menos significativo conforme explica Adio et al., (2017). No gráfico, a linha crítica está representada pela linha horizontal tracejada em vermelho. Efeitos que superam a linha do  $t$ -crítico são consideradas significativos, enquanto aqueles que estão dentro do seu limite não foram significativos para o modelo. Assim, as interpretações estão de acordo, apontando que os cinco efeitos apresentados no diagrama para a *Dureza* ( $Y_1$ ) foram significativos, enquanto  $X_3$  e  $X_1 * X_3$  não foram significativos para a variável *Coesividade* ( $Y_2$ ).

Figura 4. Gráfico de Pareto para a análise fatorial de (A) *Dureza* ( $Y_1$ ) e (B) *Coesividade* ( $Y_2$ )



FONTE: Elaborado pelo autor usando o software OriginPro (2025).

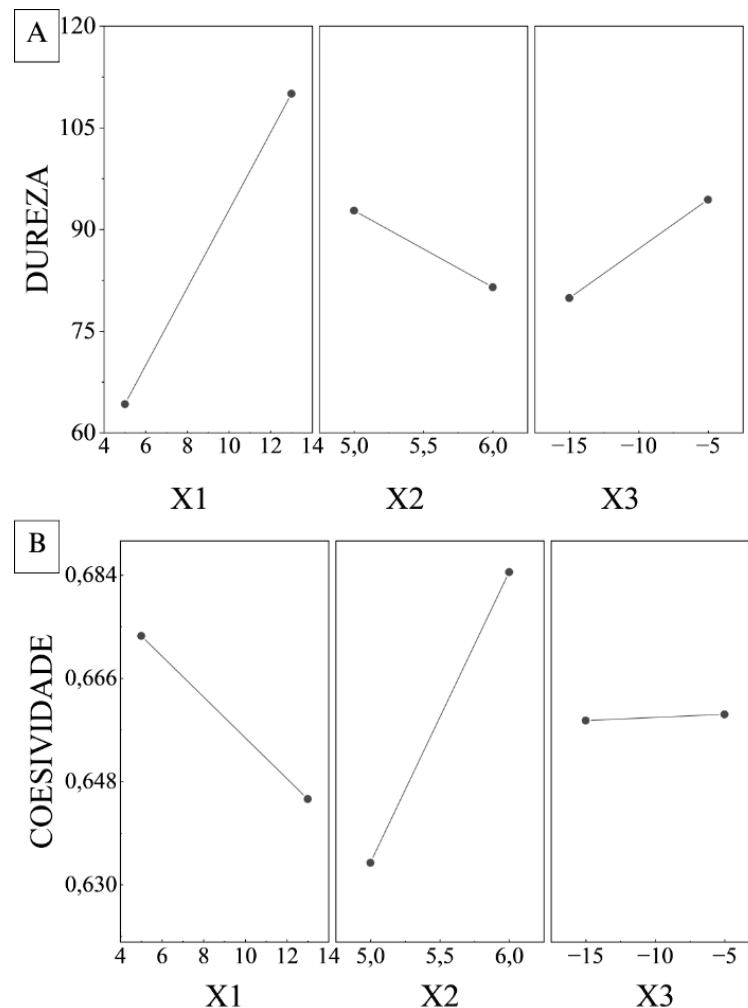
A fim de verificar a adequação do modelo os valores de  $R^2$  e  $R^2_{aj}$  foram analisados, já que de acordo com Nowalid, Hamid e Giwa (2024) e esses valores indicam o quão próximo os dados estão da linha da regressão. De acordo com Karazhiyan, Razavi e Phillips (2011) modelos apresentam bons ajustes experimentais para  $R^2$  mínimo de 0,8. Rahmani e Firouzi (2021)

indicaram que valores mais altos e próximo de um para  $R^2$  e a proximidade entre esse valor e o do  $R^2_{aj}$ . sugerem a alta capacidade dos modelos ajustados. Assim, as equações geradas para *Dureza* ( $Y_1$ ) ( $R^2 = 0,983$  e  $R^2_{aj} = 0,961$ ) e *Coesividade* ( $Y_2$ ) ( $R^2 = 0,974$  e  $R^2_{aj} = 0,923$ ) estão bem ajustadas aos dados experimentais, indicando que o modelo tem boa capacidade em descrever as propriedades estudadas.

### 5.3.2. Efeitos principais

Analisar os efeitos principais dentro do planejamento fatorial é importante para compreender os elementos-chave em um ou mais níveis. Os fatores *Teor de Sólidos* ( $X_1$ ), *pH* ( $X_2$ ) e *Temperatura de Congelamento* ( $X_3$ ) estão apresentados na Figura 5 para cada uma das variáveis estudadas e são avaliados a partir da inclinação da reta que relaciona o nível e a resposta de interesse. Retas com menor ou nenhuma inclinação indicam baixo efeito da variável sobre a resposta.

Figura 5. Gráficos de efeitos principais para (A) *Dureza* ( $Y_1$ ) e (B) *Coesividade* ( $Y_2$ )



FONTE: Elaborado pelo autor usando o software OriginPro (2025).

Os resultados demonstram que  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_3$  exercem uma influência significativa na *Dureza* ( $Y_1$ ). Em particular,  $X_1$  e  $X_3$  afetam positivamente  $Y_1$ , de modo que um aumento no teor de sólidos ou na temperatura de congelamento resulta em uma maior Dureza do material. Por outro lado, o pH apresenta um comportamento oposto, indicando que, quando a formulação possui um pH elevado, a Dureza tende a diminuir.

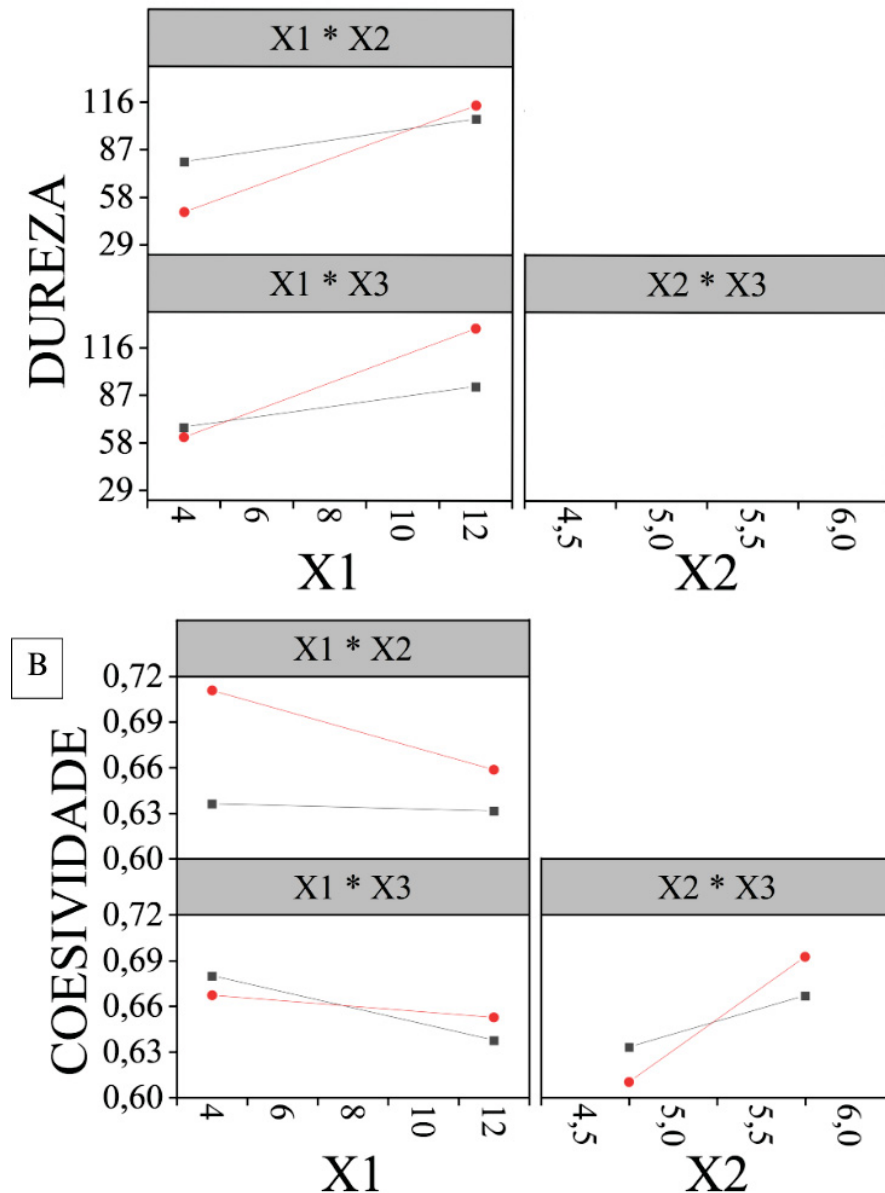
Ao avaliar esses efeitos sobre a *Coesividade* ( $Y_2$ ), verifica-se que essa propriedade é predominantemente impactada pelo pH, apresentando valores mais elevados quando a formulação possui um pH mais alto. O teor de sólidos também exerce influência, embora de forma inversa e com menor impacto em comparação ao pH. Já a temperatura de congelamento demonstra uma influência mínima sobre a resposta  $Y_2$ , como indicado pela baixa inclinação da reta na  $X_3$  e pela não significância desse efeito na Equação 8.

### 5.3.3. Interação entre os efeitos

As interações existentes entre os fatores de um delineamento fatorial podem potencializar ou reduzir os efeitos principais, sendo então importantes no estudo (Altayb et al., 2021). Para esta investigação, o gráfico de interações foi plotado (Figura 6) representando os níveis alto (+1) e baixo (-1) dos parâmetros pelas cores vermelha e preta respectivamente.

Os gráficos exibem apenas as interações que demonstraram significância estatística na análise prévia. Dessa forma, a interação  $X_2 * X_3$  é apresentada exclusivamente para a *Coesividade* ( $Y_2$ ), uma vez que, para a *Dureza* ( $Y_1$ ), ela foi removida por não ser significativa e impactar os efeitos principais. Segundo Altayb et al. (2021), inclinações acentuadas sugerem interação entre os fatores analisados, o que pode ser observado nos gráficos da Figura 6. Tanto a interação  $X_2 * X_3$  para  $Y_2$ , quanto as interações  $X_1 * X_2$  e  $X_1 * X_3$  para  $Y_1$  e  $Y_2$  são representadas por linhas de inclinação evidente, indicando a interação entre os respectivos fatores.

Figura 6. Gráficos de efeitos de interação para (A) *Dureza* ( $Y_1$ ) e (B) *Coesividade* ( $Y_2$ )



FONTE: Elaborado pelo autor usando o software OriginPro (2025).

Com base na Figura 6, observamos que para a *Dureza* ( $Y_1$ )  $X_1 * X_2$  e  $X_1 * X_3$  atingiram valores mais elevados nos níveis altos das interações. Em contraste, a *Coesividade* ( $Y_2$ ) apresentou um comportamento oposto, sendo menor nesses mesmos níveis. Além disso, verificou-se que níveis altos da interação  $X_2 * X_3$  resultaram em um aumento da *Coesividade* ( $Y_2$ ) no produto.

#### 5.3.4. Validação do modelo

Parâmetros dentro da faixa de estudo foram estabelecidos para a validação do modelo. Considerando que o ponto central (0) foi usado no delineamento, decidiu-se por estudar o ponto

médio positivo (+0,5), cujos parâmetros são 11%, 5,75 e -7,5, e o ponto médio negativo (-0,5) para *Teor de Sólidos* ( $X_1$ ), *pH* ( $X_2$ ) e *Temperatura de Congelamento* ( $X_3$ ) respectivamente. A Tabela 7 apresenta os níveis estudados bem como os resultados teórico e experimental obtidos para cada um deles. Levando em conta a não uniformidade do material e a variabilidade observada na textura dos géis proteicos, o erro inferior a 18% encontrado sugere a validade deste estudo.

Tabela 7. Validação dos modelos nos níveis -0,5 e 0,5

| Parâmetros   Níveis                   | -0,5    | +0,5         |         |              |
|---------------------------------------|---------|--------------|---------|--------------|
| Teor de Sólidos ( $X_1$ )             | 7       | 11           |         |              |
| pH ( $X_2$ )                          | 5,25    | 5,75         |         |              |
| Temperatura de congelamento ( $X_3$ ) | -12,5   | -7,5         |         |              |
| Propriedades                          | Teórico | Experimental | Teórico | Experimental |
| Dureza ( $Y_1$ )                      | 79,88   | 93,92        | 104,40  | 121,87       |
| Coesividade ( $Y_2$ )                 | 0,66    | 0,73         | 0,67    | 0,75         |

FONTE: Elaborado pelo autor (2025).

5.4. PROPRIEDADES DE TEXTURA E COR FRENTE A PADRÕES CÁRNEOS

As amostras foram nomeadas com base na ordem padrão estabelecida no DFC 2<sup>3</sup>, variando de A1 a A10. Os resultados obtidos na análise de TPA para os géis proteicos e as três carnes de referência estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8. Resultados obtidos para a comparação entre as propriedades de textura e diferentes tipos de carnes

| Amostra           | Dureza (N)                | Coesividade              | Elasticidade             | Mastigabilidade (N)       |
|-------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 1                 | 81,62±2,30 <sup>CD</sup>  | 0,65±0,01 <sup>ABC</sup> | 0,83±0,00 <sup>A</sup>   | 44,02±0,85 <sup>EF</sup>  |
| 2                 | 83,76±2,19 <sup>CD</sup>  | 0,63±0,02 <sup>C</sup>   | 0,88±0,03 <sup>A</sup>   | 46,76±1,44 <sup>DE</sup>  |
| 3                 | 50,26±0,52 <sup>E</sup>   | 0,70±0,01 <sup>AB</sup>  | 0,88±0,03 <sup>A</sup>   | 31,35±1,09 <sup>G</sup>   |
| 4                 | 98,45±1,06 <sup>B</sup>   | 0,64±0,01 <sup>BC</sup>  | 0,85±0,02 <sup>A</sup>   | 53,58±1,71 <sup>C</sup>   |
| 5                 | 74,94±1,93 <sup>D</sup>   | 0,62±0,01 <sup>CD</sup>  | 0,84±0,01 <sup>A</sup>   | 38,72±1,98 <sup>F</sup>   |
| 6                 | 125,42±8,12 <sup>A</sup>  | 0,63±0,03 <sup>C</sup>   | 0,86±0,02 <sup>A</sup>   | 67,26±5,88 <sup>B</sup>   |
| 7                 | 44,65±2,73 <sup>E</sup>   | 0,71±0,04 <sup>A</sup>   | 0,86±0,06 <sup>A</sup>   | 27,38±1,83 <sup>GH</sup>  |
| 8                 | 127,16±3,12 <sup>A</sup>  | 0,68±0,01 <sup>ABC</sup> | 0,90±0,03 <sup>A</sup>   | 77,63±0,19 <sup>A</sup>   |
| 9                 | 93,06±2,06 <sup>BC</sup>  | 0,66±0,02 <sup>ABC</sup> | 0,90±0,01 <sup>A</sup>   | 55,64±1,38 <sup>C</sup>   |
| 10                | 91,86±4,88 <sup>BC</sup>  | 0,67±0,02 <sup>ACB</sup> | 0,85±0,02 <sup>A</sup>   | 52,34±1,32 <sup>CD</sup>  |
| Peito de Frango   | 54,17 ± 9,22 <sup>E</sup> | 0,24 ± 0,03 <sup>E</sup> | 0,43 ± 0,03 <sup>C</sup> | 7,54 ± 0,57 <sup>I</sup>  |
| Filé de Peixe     | 24,04 ± 1,35 <sup>F</sup> | 0,63 ± 0,01 <sup>C</sup> | 0,83 ± 0,04 <sup>A</sup> | 12,54 ± 0,08 <sup>I</sup> |
| Contrafilé Bovino | 71,41 ± 5,80 <sup>D</sup> | 0,55 ± 0,01 <sup>D</sup> | 0,72 ± 0,01 <sup>B</sup> | 21,46 ± 3,39 <sup>H</sup> |

FONTE: Elaborado pelo autor usando o software OriginPro (2025). Os resultados são apresentados como média ± desvio padrão (DP), com base em cinco repetições. Médias seguidas por letras distintas indicam diferenças estatisticamente significativas ( $p < 0,05$ ) dentro da mesma coluna de cada parâmetro avaliado. Os ensaios foram numerados de 1 a 10, sendo que a combinação de fatores (*Teor de sólidos* ( $X_1$ ) em %; *pH* ( $X_2$ ); *Temperatura de congelamento* ( $X_3$ ) em °C) para cada um é a seguinte: A1 (5; 5,0; -15), A2 (13; 5,0; -15), A3 (5; 6,0; -15), A4 (13; 6,0; -15), A5 (5; 5,0; -5), A6 (13; 5,0; -5), A7 (5; 6,0; -5), A8 (13; 6,0; -5), A9 (9; 5,5; -10) e A10 (9;5,5;-10).

De acordo com Jonkers et al. (2021), a dureza está diretamente relacionada à resistência de um material ao sofrer deformação, sendo um indicador de tenacidade e maturidade em produtos cárneos. Neste estudo, os tratamentos aplicados resultaram em produtos com dureza variando de 44,65 N (A7) a 127,16 N (A8), sendo o teste de Tukey utilizado para comparar esses valores com os dos produtos cárneos de referência. Entre os produtos cárneos analisados, o filé de peixe apresentou a menor dureza (24,04 N), diferenciando-se estatisticamente de todos os tratamentos. O peito de frango (71,41 N) mostrou semelhança estatística com as amostras A5 (74,94 N), A1 (81,62 N) e A2 (83,76 N), enquanto o contrafilé bovino (54,17 N) teve resultados equivalentes às amostras A3 (50,26 N) e A7 (44,65 N). Esses resultados confirmam a discussão sobre o modelo gerado pelo DFC, que demonstrou que amostras com menor teor de sólidos resultaram em menor dureza do material. Nesse sentido, as amostras A8 e A6, preparadas com maior teor de sólidos e sob temperatura de congelamento mais alta, apresentaram a maior dureza entre os tratamentos, diferenciando-se dos produtos cárneos avaliados. Além disso, materiais com alta capacidade de gelificação tendem a apresentar maior dureza, como é o caso do IPS. Chantanuson et al. (2022) demonstraram em seus estudos que a dureza é influenciada tanto pelo teor de sólidos quanto pela capacidade de gelificação da proteína da soja. Também explicaram que essa propriedade está diretamente relacionada à solubilidade da matéria-prima: quanto maior a solubilidade, maior será a capacidade de gelificação observada. Chantanuson et al. (2024), verificaram, em outro estudo, que a textura dos géis proteicos melhorou após a redução da solubilidade do IPS para 1,99%, em uma solução de 0,15 mol/L de NaCl. Dessa forma, considerando que a solubilidade do IPS usado neste estudo foi significativamente maior (8,88% em solução de 0,15 mol/L de NaCl e 19,78% em água), é provável que a propriedade de gelificação tenha contribuído para o aumento da dureza do gel.

Os resultados obtidos para a elasticidade indicaram semelhança estatística a 5% entre todos os tratamentos, com valores variando de 0,83 (A1) a 0,90 (A8). Todas as amostras apresentaram elasticidade equivalente à do filé de peixe (0,83), mas diferiram significativamente do contrafilé (0,72) e do peito de frango (0,43). Esses resultados sugerem que o material tende a se fragmentar em pedaços maiores quando submetido à compressão (Lee et al., 2022).

A coesividade descreve a ligação interna do material, refletindo sua integridade estrutural sob estresse mecânico (Rosenthal & Thompson, 2021 apud. Fan et al., 2025). Valores elevados de coesividade indicam maior força intermolecular e uma estrutura mais reticulada (Fan et al., 2024). Entre os produtos cárneos avaliados, o peito de frango (0,24) diferiu

estatisticamente de todos os tratamentos, enquanto o filé de peixe (0,63) apresentou diferença estatística apenas com A7 (0,71) e A3 (0,70) e o contrafilé (0,55) foi considerado igual apenas à amostra A5 (0,62). Dessa forma, as amostras analisadas demonstraram, em sua maioria, maior coesividade em comparação ao peito de frango e ao contrafilé, sugerindo uma estrutura altamente reticulada.

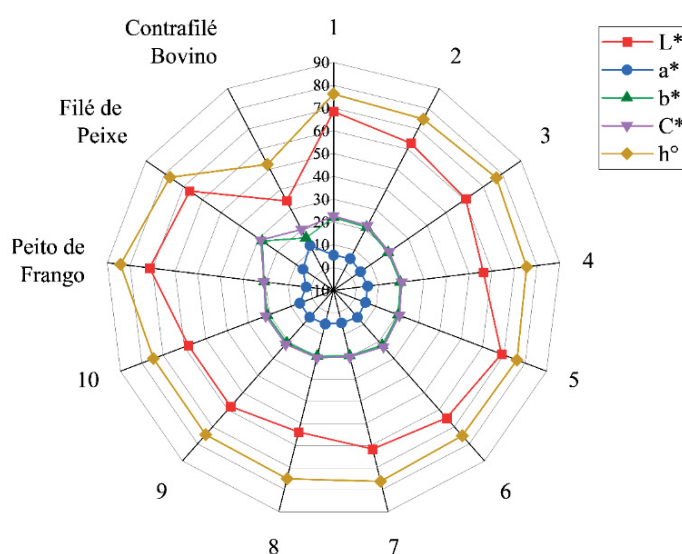
A mastigabilidade de todas as amostras foi superior à do filé de peixe (12,54 N) e à do peito de frango (7,54 N), atingindo 77,63 N na amostra A8. O contrafilé (21,47 N) apresentou semelhança estatística com a amostra A7 (27,38 N), que obteve o menor valor entre os tratamentos. Como a mastigabilidade resulta da interação entre dureza, coesividade e elasticidade, seus valores refletem a alta força intermolecular e a característica quebradiça do material. De acordo com Godschalk-Broers; Sala; Scholten, (2022), essa propriedade está diretamente relacionada ao esforço necessário para realizar a mastigação. Assim, os elevados resultados indicam que os produtos analisados neste estudo apresentam maior resistência à mastigação, exigindo mais esforço para serem consumidos em comparação aos produtos cárneos avaliados.

Os análogos obtidos por Chiang et al. (2019) usando proteína de soja e o glúten do trigo por extrusão de alta umidade apresentaram Dureza variando entre 45,40 N e 78,61 N, enquanto os resultados de mastigabilidade variaram entre 34,02 N e 45,32 N. Outro trabalho usando proteína de soja e proteína de arroz, usando extrusão de baixa umidade, apresentaram resultados de elasticidade entre 0,914 e 0,959, enquanto a coesividade resultou em valores entre 0,466 e 0,539 (Lee et al., 2022). Assim, a comparação entre os resultados obtidos neste estudo e os encontrados em pesquisas anteriores evidencia a proximidade entre as propriedades texturais entre os análogos desenvolvidos. Essa similaridade reforça a influência das condições de processamento e da composição na estrutura final dos produtos, demonstrando que as formulações aqui avaliadas apresentam características alinhadas com aquelas previamente investigadas na literatura.

Além disso, os resultados obtidos para textura representam oportunidades de melhoria na formulação e consequente estrutura formada. O aumento na proporção de AS:IP e o incremento de óleo à formulação podem ser estratégias tomadas para melhorar a textura do produto, aproximando dos resultados dos produtos cárneos. Segundo Nakagawa et al. (2024) aumentar a interação proteína-água e introduzir lipídeos podem ser estratégias para favorecer a formação da textura fibrosa e melhorar a aparência desses produtos, o que pode ser feito usando polissacarídeos vegetais, como açúcares, fibras e amido.

A análise colorimétrica foi realizada em escala CIE Lab e seus resultados, detalhados na Figura 7 e no Anexo 3, indicaram que médias dos tratamentos variaram entre 54,03 (A8) e 68,83 (A5) para luminosidade ( $L^*$ ), sendo consideradas amostras claras ( $L^*>50$ ) e indicando maior reflectância de luz. As amostras tiveram médias que variaram 4,37 (A3) e 5,84 (A4) para a coordenada  $a^*$  (tonalidades entre o vermelho e o verde) e 19,18 (A3) e 21,95 (A1) para a coordenada  $b^*$  (tonalidades entre o amarelo e o azul), indicando que suas cores estão entre amarelo e vermelho. Boonarsa et al., (2025) utilizaram a proteína da soja como parâmetro ao estudar a obtenção de géis proteicos usando congelamento, para a qual seus resultados foram de 74,64, 1,18 e 16,74 para  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$  respectivamente, indicando que as amostras também apresentavam cores claras, entre vermelho e amarelo. Os resultados obtidos para  $C^*$  variaram entre 19,72 (A3) e 22,61 (A1), enquanto o  $h^\circ$  variou entre  $74,51^\circ$  (A10) e  $76,34^\circ$  (A7), indicando uma coloração de baixa intensidade e mais próxima do amarelo (Pathare; Opara; Al-Said, 2013).

Figura 7. Parâmetros de Cor ( $L$ ,  $a$ ,  $b^*$ ,  $C^*$ ,  $h^\circ$ ) e ensaios (1 a 10) e Produtos Cárneos



FONTE: Elaborado pelo autor usando o software OriginPro (2025). As médias para cada tratamento e carne de referência são indicados pelos pontos no gráfico. Os ensaios foram numerados de 1 a 10, sendo que a combinação de fatores (Teor de sólidos ( $X_1$ ) em %; pH ( $X_2$ ); Temperatura de congelamento ( $X_3$ ) em  $^\circ\text{C}$ ) para cada um é a seguinte: A1 (5; 5,0; -15), A2 (13; 5,0; -15), A3 (5; 6,0; -15), A4 (13; 6,0; -15), A5 (5; 5,0; -5), A6 (13; 5,0; -5), A7 (5; 6,0; -5), A8 (13; 6,0; -5), A9 (9; 5,5; -10) e A10 (9; 5,5; -10).

Para avaliar a proximidade ou diferença entre as cores das amostras e dos produtos cárneos, foi calculado o  $\Delta E$  e indicado na Tabela 9. As diferenças de cor entre o contrafilé grelhado e os tratamentos eram evidentes, refletindo variações na composição da carne vermelha e o método de preparo. Como esperado, os valores de  $\Delta E$  foram elevados para o contrafilé, variando entre 21,31 (A8) e 35,57 (A5). O filé de peixe e o peito de frango

apresentaram menores valores de  $\Delta E$ , indicando maior similaridade com determinadas amostras. A amostra A6 foi a que apresentou menor variação ( $\Delta E = 6,12$ ) para o peixe, enquanto para o frango essa variação foi ainda menor para a amostra A5 ( $\Delta E = 3,86$ ). De acordo com Pathare, Opara e Al-Said (2013), o valor  $\Delta E$  é considerado muito perceptível para resultados superiores a 3, indicando que todos os géis apresentaram diferença de cor perceptíveis em relação às três carnes aqui estudadas.

Tabela 9. Resultados para a variação de cor entre as amostras e as carnes

| Ordem Padrão | $\Delta E$ – Peito de Frango | $\Delta E$ – Filé de Peixe | $\Delta E$ – Contrafilé bovino |
|--------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 1            | 4,59±0,21 <sup>EF</sup>      | 6,44±0,29 <sup>F</sup>     | 35,34±0,34 <sup>A</sup>        |
| 2            | 9,15±0,40 <sup>DE</sup>      | 7,79±0,33 <sup>E</sup>     | 29,88±0,43 <sup>C</sup>        |
| 3            | 11,19±1,47 <sup>C</sup>      | 11,27±0,58 <sup>C</sup>    | 27,56±1,48 <sup>D</sup>        |
| 4            | 15,41±1,22 <sup>B</sup>      | 13,56±0,90 <sup>B</sup>    | 23,39±1,19 <sup>E</sup>        |
| 5            | 3,86±0,42 <sup>F</sup>       | 8,14±0,34 <sup>E</sup>     | 35,57±0,56 <sup>A</sup>        |
| 6            | 7,69±0,69 <sup>E</sup>       | 6,12±0,23 <sup>F</sup>     | 31,84±0,73 <sup>B</sup>        |
| 7            | 10,02±0,28 <sup>CD</sup>     | 9,99±0,38 <sup>D</sup>     | 28,69±0,28 <sup>CD</sup>       |
| 8            | 17,61±0,58 <sup>A</sup>      | 15,18±0,41 <sup>A</sup>    | 21,31±0,52 <sup>F</sup>        |
| 9            | 13,72±0,77 <sup>B</sup>      | 11,26±0,47 <sup>C</sup>    | 25,20±0,61 <sup>E</sup>        |
| 10           | 13,73±0,70 <sup>B</sup>      | 11,12±0,48 <sup>CD</sup>   | 25,21±0,64 <sup>E</sup>        |

FONTE: Elaborado pelo autor (2025). Os resultados são apresentados como média  $\pm$  desvio padrão (DP), com base em quatro repetições. Médias seguidas por letras distintas indicam diferenças estatisticamente significativas ( $p < 0,05$ ) dentro da mesma coluna de cada parâmetro avaliado. Os ensaios foram numerados de 1 a 10, sendo que a combinação de fatores (Teor de sólidos ( $X_1$ ) em %; pH ( $X_2$ ); Temperatura de congelamento ( $X_3$ ) em °C) para cada um é a seguinte: A1 (5; 5,0; -15), A2 (13; 5,0; -15), A3 (5; 6,0; -15), A4 (13; 6,0; -15), A5 (5; 5,0; -5), A6 (13; 5,0; -5), A7 (5; 6,0; -5), A8 (13; 6,0; -5), A9 (9; 5,5; -10) e A10 (9; 5,5; -10).

A cor é um parâmetro essencial para a aceitação do produto e é diretamente influenciada pela sua composição. Estudos como os de Chiang et al. (2019) e Lee et al. (2022) demonstraram que análogos a carne obtidos à base de soja apresentaram variações de coloração ao serem combinados com outras fontes proteicas, como glúten de trigo e isolado proteico de arroz respectivamente. Além disso, como Chantanuson et al. (2022) utilizaram corantes, como vermelho 102, para conferir uma tonalidade avermelhada semelhante à carne crua. Assim, a soja enquanto matéria-prima permite uma gama de modificações intencionais, por apresentar coloração clara, entre vermelho e amarelo, aproximando a propriedade de cor dos produtos desejados. A composição diferente dos produtos cárneos e os análogos somam as diferenças encontradas nesse trabalho. Singh; Sit, (2025), ao estudarem a otimização do uso de isolado proteico de tamarindo de manila no preparo de análogos a carne, destacaram que a variação de cor em relação ao peito de frango se deve principalmente às diferenças na composição, uma vez que este último apresenta maior teor de gordura e menor quantidade de carboidratos.

### 5.5. PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DOS GÉIS PROTEICOS

A fim de caracterizar o produto obtido, foram realizadas análises de acidez, pH, atividade de água ( $a_w$ ), umidade e proteína, estando seus resultados disponíveis na Tabela 10.

Tabela 10. Resultados de Umidade,  $a_w$ , Acidez, pH e Proteína para os géis proteicos

| Amostra | Umidade<br>(%)            | $a_w$<br>-               | Acidez total<br>titulável<br>g de ác.<br>lático/100 g | pH<br>-                | Teor de<br>Proteínas<br>(%) |
|---------|---------------------------|--------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------|-----------------------------|
| 1       | 69,19±1,73 <sup>AB</sup>  | 0,994±0,00 <sup>AB</sup> | 0,16±0,00 <sup>A</sup>                                | 5,66±0,09 <sup>C</sup> | 25,28±0,02 <sup>E</sup>     |
| 2       | 65,61±2,86 <sup>BCD</sup> | 0,992±0,00 <sup>C</sup>  | 0,15±0,01 <sup>A</sup>                                | 5,55±0,01 <sup>D</sup> | 27,78±0,25 <sup>CD</sup>    |
| 3       | 69,53±0,73 <sup>AB</sup>  | 0,996±0,00 <sup>A</sup>  | 0,08±0,00 <sup>C</sup>                                | 6,54±0,02 <sup>A</sup> | 25,36±0,56 <sup>E</sup>     |
| 4       | 64,35±1,64 <sup>CD</sup>  | 0,993±0,00 <sup>BC</sup> | 0,10±0,00 <sup>C</sup>                                | 6,50±0,02 <sup>A</sup> | 29,49±0,02 <sup>B</sup>     |
| 5       | 66,79±1,64 <sup>ABC</sup> | 0,995±0,00 <sup>AB</sup> | 0,17±0,01 <sup>A</sup>                                | 5,67±0,07 <sup>C</sup> | 27,33±0,21 <sup>D</sup>     |
| 6       | 63,35±1,85 <sup>CD</sup>  | 0,995±0,00 <sup>AB</sup> | 0,16±0,01 <sup>A</sup>                                | 5,54±0,04 <sup>D</sup> | 30,09±0,19 <sup>B</sup>     |
| 7       | 70,74±1,63 <sup>A</sup>   | 0,996±0,00 <sup>A</sup>  | 0,08±0,01 <sup>C</sup>                                | 6,50±0,04 <sup>A</sup> | 23,78±0,02 <sup>F</sup>     |
| 8       | 61,45±2,46 <sup>D</sup>   | 0,996±0,00 <sup>A</sup>  | 0,09±0,00 <sup>C</sup>                                | 6,46±0,02 <sup>A</sup> | 32,92±0,12 <sup>A</sup>     |
| 9       | 65,88±1,81 <sup>BCD</sup> | 0,995±0,00 <sup>AB</sup> | 0,12±0,01 <sup>B</sup>                                | 6,32±0,02 <sup>B</sup> | 28,24±0,05 <sup>CD</sup>    |
| 10      | 65,71±1,49 <sup>BCD</sup> | 0,996±0,00 <sup>A</sup>  | 0,12±0,01 <sup>B</sup>                                | 6,33±0,03 <sup>B</sup> | 28,39±0,27 <sup>C</sup>     |

FONTE: Elaborado pelo autor (2025). Os resultados são expressos como média ± desvio padrão (DP), considerando duas repetições para o teor de proteínas, três para acidez e quatro para os demais parâmetros. Letras distintas indicam diferenças estatisticamente significativas ( $p < 0,05$ ) dentro da mesma coluna de cada parâmetro. Os ensaios foram numerados de 1 a 10, sendo que a combinação de fatores (Teor de sólidos ( $X_1$ ) em %; pH ( $X_2$ ); Temperatura de congelamento ( $X_3$ ) em °C) para cada um é a seguinte: A1 (5; 5,0; -15), A2 (13; 5,0; -15), A3 (5; 6,0; -15), A4 (13; 6,0; -15), A5 (5; 5,0; -5), A6 (13; 5,0; -5), A7 (5; 6,0; -5), A8 (13; 6,0; -5), A9 (9; 5,5; -10) e A10 (9; 5,5; -10).

Os géis proteicos apresentaram teores de proteína variando entre 23,78% (A7) e 32,92% (A8), com as formulações de menor teor de sólidos resultando em valores mais baixos de proteína. Esses resultados são comparáveis aos de produtos cárneos, que apresentam teores aproximados de 20,78% para carne bovina, 23,09% para frango e 17,81% para bacalhau, conforme dados compilados por Damodaran, Parkin e Fennema (2010). Embora os valores de produtos cárneos variem de acordo com a espécie, raça e corte, os géis proteicos demonstram um potencial promissor como análogos proteicos com alto teor nutricional. Além disso, a amostra A2 apresentou resultado estatisticamente equivalente ao do ponto central (A9 e A10), apesar de possuir o maior teor de sólidos entre elas. O pH não demonstrou influência significativa sobre a resposta obtida, ao contrário da temperatura, que impactou os teores de proteína nas formulações com maiores teores de sólidos (9% e 13%). Nessas condições, amostras submetidas a temperaturas de congelamento mais altas (-5 °C e -10 °C) apresentaram maior teor de proteína. Isso ocorre porque o congelamento mais rápido, promovido pelas temperaturas mais baixas, favorece a retenção de sólidos em suspensão. Como consequência, durante a etapa de estabilização, há uma maior perda de sólidos, o que afeta o teor final de proteína no material. As amostras apresentaram acidez titulável variando entre 0,079 e 0,167 g de ácido lático/100 g de amostra. Os resultados da aplicação da ANOVA indicaram a

existência de variação de acidez entre as amostras, distribuídos de acordo com o ajuste de pH realizado durante a formulação. Dessa forma, era esperado que os resultados fossem similares para as amostras ajustadas em pH 6,0 (A3, A4, A7 e A8), para aquelas ajustadas em pH 5,5 (A9 e A10) e para as que foram ajustadas em pH 5,0 (A5, A6, A1, A2), sendo as maiores médias para as amostras ajustadas à pH 5,0 em que se adicionou maior volume do ácido.

Todas as amostras apresentaram pH ácido, variando entre 5,54 (A6) e 6,54 (A3), um intervalo comparável ao de produtos cárneos como a carne vermelha e o frango, cujo pH varia de 5,5 a 5,9 (Damodaran; Parkin; Fennema, 2010). Amostras ajustadas para pH 6,0 resultaram em géis com pH mais elevado (6,46 - 6,54) e menor acidez (0,08 - 0,10 g de ácido láctico/100 g de amostra), enquanto aquelas ajustadas para pH 5,0 apresentaram pH final mais baixo (5,54 - 5,67) e maior acidez (0,15 - 0,17 g de ácido láctico/100 g). Sendo o pH o nível de acidez ou alcalinidade do meio baseado na concentração de íons de hidrogênio ( $H^+$ ), os resultados convergem àqueles encontrados para a acidez total titulável.

Em relação a  $a_w$ , os resultados obtidos no teste de comparação de médias indicaram diferença significativa entre as amostras, variando de 0,992 a 0,996. Essa propriedade é um importante parâmetro de qualidade para um alimento e está relacionada à sua estabilidade e segurança para consumo. A análise do grau de interação da água com os demais componentes da matriz alimentar, bem como sua disponibilidade para reações e para o crescimento microbiano, permite avaliar fatores que influenciam diretamente na sua deterioração (Ribeiro; Seravalli, 2007). Nesse sentido, alimentos com  $a_w$  inferior a 0,85 são considerados seguros, não favorecendo a atividade de microrganismos patogênicos e produção de micotoxinas por fungos (Beuchat et al., 2013; Taylor; Zhu, 2021).

A carne é um produto com alto teor de umidade, com valores relatados de 70,62% para carne bovina e 74,76% para frango (Damodaran; Parkin; Fennema, 2010). Alinhados a esses parâmetros, os valores de umidade nas amostras variaram entre 63,35% e 69,84% (A6 e A7, respectivamente), apresentando médias significativamente diferentes ao nível de 5% de significância. As amostras com menor teor de sólidos apresentaram maior umidade, possivelmente devido à menor aproximação entre as moléculas de proteína, o que favorece a formação de ligações proteína-água, mesmo diante da alta disponibilidade de água livre indicada pelos valores de  $a_w$ . Esses resultados também podem estar relacionados à adição de AS na formulação, uma vez que polímeros de carboidratos, como os alginatos derivados de algas marinhas, têm grande capacidade de retenção de água, promovendo sua incorporação e reduzindo a sinérese (Sha; Xiong, 2020). A proteína da soja foi utilizada em diferentes estudos como produto de referência. Boonarsa et al. (2025) usaram congelamento como tecnologia

estruturante para análogos cárneos a base de pupas de bicho seda, e para as amostras contendo apenas proteína de soja o teor de umidade foi de 69,59 %. Chiang et al. (2019), ao utilizarem extrusão de alta umidade na obtenção de produtos análogos obtiveram resultados inferiores, de 58,01%, que também foi menor que o do frango cozido (69,11%) usado como comparação no estudo.

Os resultados obtidos para acidez,  $a_w$  e umidade são característicos de produtos com alta perecibilidade, devendo ser cuidadosamente considerados na definição das embalagens e das condições de armazenamento. Nesse contexto, a escolha de embalagens apropriadas ou a aplicação de processos como a secagem dos géis proteicos configuram estratégias relevantes para viabilizar a posterior comercialização e garantir a segurança do alimento ao longo de sua vida útil. Apesar disso, é importante destacar que essas propriedades físico-químicas, o teor de proteínas e pH evidenciados, por serem semelhantes às de produtos cárneos, indicam um resultado positivo e alinhado com o objetivo de imitar esse tipo de alimento.

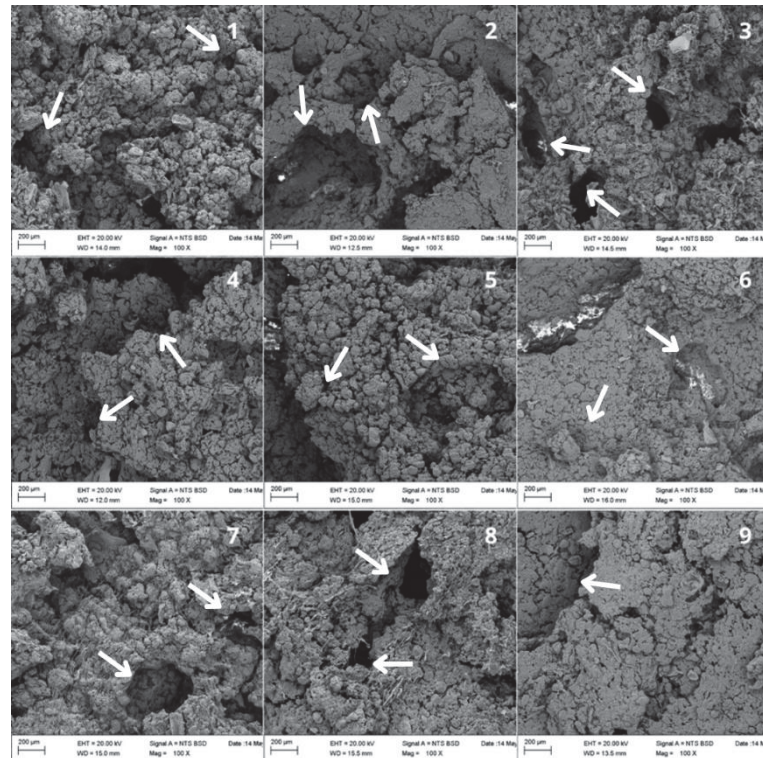
## 5.6. AVALIAÇÃO DA ESTRUTURA

Os géis proteicos tiveram sua estrutura avaliada por meio de imagens e Grau de Texturização, sendo seus resultados apresentados e discutidos a seguir.

### 5.6.1. MEV e aparência visível

A caracterização estrutural foi realizada com base em análises da amostra úmida, por meio de fotografias digitais, e da amostra liofilizada, utilizando lupa e microscopia eletrônica de varredura (MEV). A partir das imagens obtidas via MEV (Figura 8), foi possível examinar a microestrutura do material, revelando uma morfologia porosa em todas as amostras, resultado da formação de cristais de gelo durante o processo de congelamento. No entanto, a análise detalhada dessa microestrutura não evidenciou um padrão de porosidade que sugerisse um direcionamento específico na formação dos cristais ou diferenças significativas entre as amostras. As setas na Figura 8 indicam a estrutura analisada.

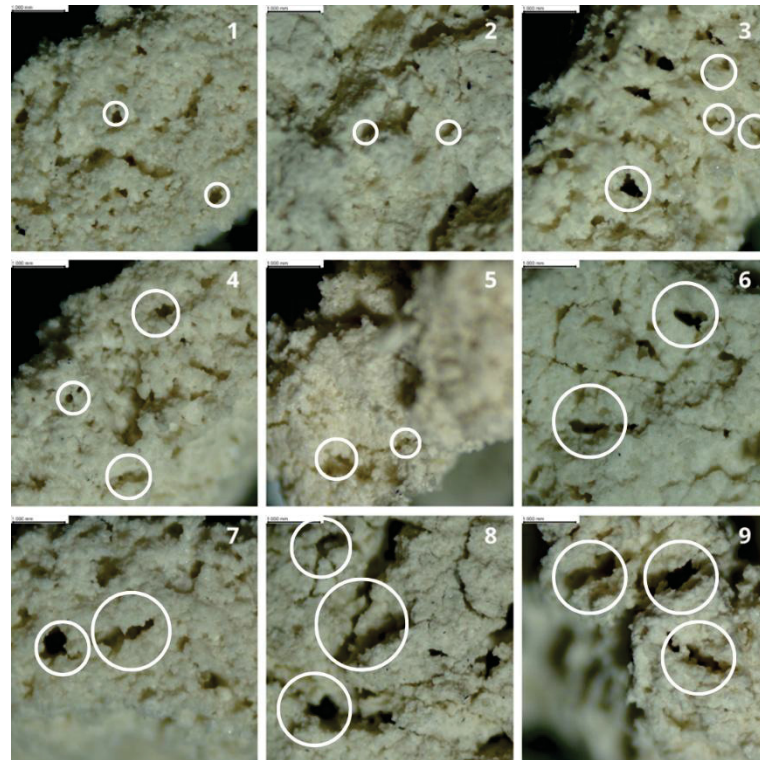
Figura 8. Imagens obtidas em MEV para os tratamentos codificados de 1 a 9



FONTE: Elaborado pelo autor (2025). Imagens obtidas no Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais na UTFPR. Os tratamentos foram numerados de 1 a 9, sendo que a combinação de fatores (Teor de sólidos ( $X_1$ ) em %; pH ( $X_2$ ); Temperatura de congelamento ( $X_3$ ) em °C) para cada um é a seguinte: A1 (5; 5,0; -15), A2 (13; 5,0; -15), A3 (5; 6,0; -15), A4 (13; 6,0; -15), A5 (5; 5,0; -5), A6 (13; 5,0; -5), A7 (5; 6,0; -5), A8 (13; 6,0; -5) e A9 (9; 5,5; -10).

Conforme evidenciado na Figura 9, as imagens obtidas por lupa mostraram diferenças entre as estruturas dos tratamentos. Em todas as amostras, foi possível observar as estruturas de aspecto poroso, que estão destacadas por círculos na imagem. Alguns tratamentos, como A1, A2, A3, A4 e A5 resultaram em aberturas menores, enquanto amostras como A6, A7, A8 e A9 essas aberturas foram ligeiramente maiores. A ausência de estruturas lamelares pode ser explicada pelo corte feito e aproximação utilizada, no entanto, observa-se a tendência de formação de aberturas maiores em tratamentos cuja temperatura de processo foram mais altas (-5 °C e -10°C).

Figura 9. Imagens obtidas em Lupa para os tratamentos codificados de 1 a 9



FONTE: Elaborado pelo autor (2025). Imagens obtidas no Laboratório de Anatomia da Madeira, no Departamento de Engenharia Florestal da UFPR. Os tratamentos foram numerados de 1 a 9, sendo que a combinação de fatores (Teor de sólidos ( $X_1$ ) em %; pH ( $X_2$ ); Temperatura de congelamento ( $X_3$ ) em °C) para cada um é a seguinte: A1 (5; 5,0; -15), A2 (13; 5,0; -15), A3 (5; 6,0; -15), A4 (13; 6,0; -15), A5 (5; 5,0; -5), A6 (13; 5,0; -5), A7 (5; 6,0; -5), A8 (13; 6,0; -5) e A9 (9; 5,5; -10).

Imagens dos análogos feitas a partir do corte longitudinal, permitiram a visualização da estrutura em escala macroscópica (Figura 10). Ao avaliar as imagens verifica-se que a estrutura formada foi diferente entre os tratamentos, variando entre lamelar (indicadas por setas) e porosa (destacadas por círculos). As amostras A1 e A3 apresentaram-se predominantemente porosas, resultado obtido pela formação de cristais de gelo menores devido à menor temperatura de processo (-15 °C) somados ao menor teor de sólidos (5%). As amostras A6, A8 e A9 apresentaram estrutura lamelar predominante, contrastando às amostras apresentadas anteriormente. As amostras A6 e A8 foram preparadas contendo 13% de sólidos à -5°C, enquanto a amostra A9 foi preparada sob as condições do ponto central (9% de sólidos e -10°C). A combinação desses parâmetros de processo se mostrou promissora para a formação da estrutura fibrilar desejada, sendo preferíveis em relação às demais.

Figura 10. Imagens obtidas em câmera digital para os tratamentos codificados de 1 a 9



FONTE: Elaborado pelo autor (2025). Os tratamentos foram numerados de 1 a 9, sendo que a combinação de fatores (Teor de sólidos ( $X_1$ ) em %; pH ( $X_2$ ); Temperatura de congelamento ( $X_3$ ) em °C) para cada um é a seguinte: A1 (5; 5,0; -15), A2 (13; 5,0; -15), A3 (5; 6,0; -15), A4 (13; 6,0; -15), A5 (5; 5,0; -5), A6 (13; 5,0; -5), A7 (5; 6,0; -5), A8 (13; 6,0; -5) e A9 (9; 5,5; -10).

As amostras A6, A8 e A9 apresentaram resultados mais interessantes para a proposta do estudo. Embora a estrutura macroscópica tenha evidenciado a formação de folhas nesses tratamentos, a avaliação das imagens não permitiu concluir a respeito da orientação unidirecional da formação dos cristais de gelo.

#### 5.6.2. Grau de Texturização

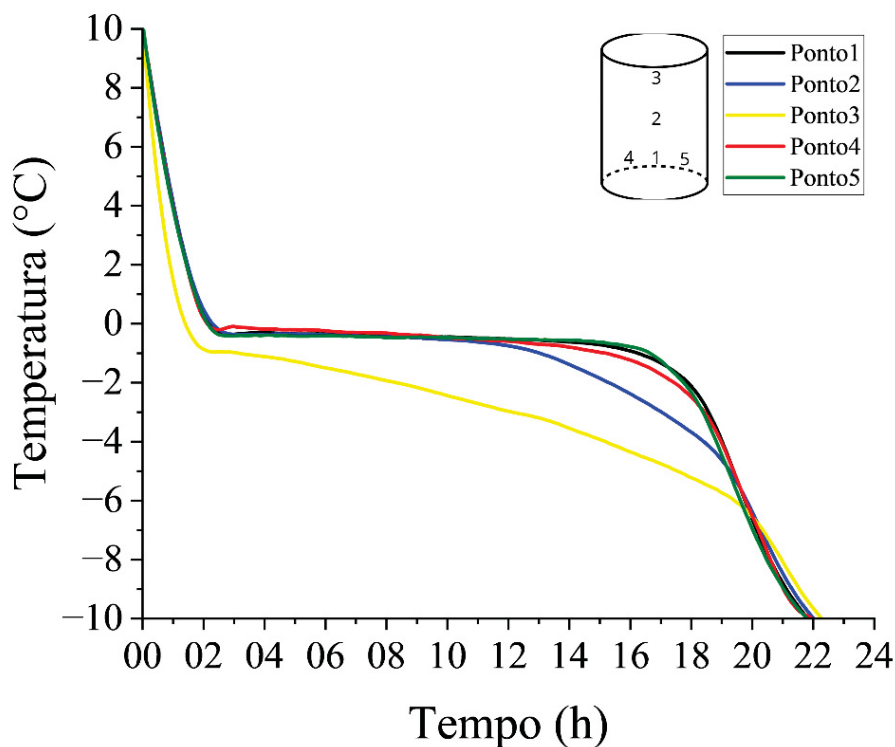
As amostras A6 (13; 5,0; -5), A8 (13; 6,0; -5) e A9 (9; 5,5; -10), indicados por tratamento (Teor de sólidos ( $X_1$ ) em %; pH ( $X_2$ ); Temperatura de congelamento ( $X_3$ ) em °C), foram avaliadas quanto à força de corte nas direções vertical ( $F_V$ ) e transversal ( $F_L$ ), em relação ao comprimento das fibras (Anexo 4). Os valores obtidos variaram entre as amostras. Para a direção vertical ( $F_V$ ), os intervalos foram: A6 (3,18 - 1,61 N), A8 (5,30 - 2,80 N) e A9 (5,71 - 2,12 N). Já para a direção transversal ( $F_L$ ), os resultados foram: A6 (2,26 - 0,94 N), A8 (4,69 - 1,65 N) e A9 (4,79 - 1,12 N). Esses dados indicam que a amostra A8 apresentou a maior resistência ao corte, o que está em consonância com os resultados de Dureza, nos quais A8 também se destacou com o maior valor entre as amostras avaliadas.

A relação entre as forças de corte das amostras nas duas direções foi de  $1,65 \pm 0,42$  (A6),  $1,67 \pm 0,32$  (A8) e  $1,45 \pm 0,29$  (A9), onde os valores são apresentados como média  $\pm$  desvio padrão. Segundo Chen et al., (2010), essa razão pode ser utilizada como indicador do grau de texturização do material, sendo desejável que seja superior a 1 para evidenciar a formação de estruturas fibrosas. Isso ocorre porque a resistência ao corte é maior quando as fibras estão organizadas paralelamente entre si, em comparação à orientação vertical. Assim, os excelentes resultados obtidos indicam que os géis proteicos analisados apresentam formação fibrosa e comportamento anisotrópico. Estudos semelhantes conduzidos por (Chiang et al., 2019; Singh; Sit, 2025) tiveram resultados iguais variando entre 1,2 e 1,74, compatíveis com os observados neste trabalho.

### 5.7. CURVA DE CONGELAMENTO

As amostras foram congeladas em moldes de isopor, de formato cilíndrico, isolados na base e lateralmente. Cinco pontos diferentes tiveram sua temperatura monitorada durante o congelamento para as amostras do ponto central (9% de sólidos; pH 5,5; temperatura de congelamento de  $-10^{\circ}\text{C}$ ). As curvas estão apresentadas na Figura 11, na qual também foram identificados os respectivos pontos no cilindro.

Figura 11. Perfil de Temperatura em Diferentes Pontos da Amostra Durante o Processo de Congelamento



FONTE: Elaborado pelo autor usando software OriginPro (2025).

O comportamento observado nas curvas de congelamento difere entre o Ponto 3 e os demais pontos avaliados. Isso ocorre porque, durante o congelamento, o material permanece em repouso, o que leva à separação entre as fases dispersa e contínua. A fase dispersa se deposita no fundo do cilindro, alcançando o Ponto 2, enquanto a fase contínua compreende apenas o Ponto 3. Nessa posição, torna-se evidente a redução do ponto de congelamento (Tabela 11) e a maior extensão da faixa de crescimento dos cristais de gelo, que variou entre  $-0,8^{\circ}\text{C}$  e  $-6,7^{\circ}\text{C}$ , indicando a solubilização de substâncias na água como consequência das propriedades coligativas das soluções (Jie; Lite; Yang, 2003; Oliveira, 2020).

Tabela 11. Ponto de congelamento e tempo de congelamento observados para os cinco pontos estudados

|                | <b>Tempo de congelamento (h)</b> | <b>Ponto de Congelamento (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</b> |
|----------------|----------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| <b>Ponto 1</b> | 21:53                            | -0,3                                                         |
| <b>Ponto 2</b> | 22:06                            | 0,0                                                          |
| <b>Ponto 3</b> | 22:17                            | -0,8                                                         |
| <b>Ponto 4</b> | 21:55                            | -0,1                                                         |
| <b>Ponto 5</b> | 21:51                            | -0,3                                                         |

FONTE: Elaborado pelo autor (2025).

Os Pontos 1, 2, 4 e 5 apresentaram comportamento similar entre si, descrevendo o congelamento para a região inferior da amostra, na qual o material sólido disperso se deposita. A separação entre a água e o soluto provoca a nucleação e formação de cristais de gelo em ponto de congelamento e região de platô próximos aos da água pura, entre  $0^{\circ}\text{C}$  e  $-2^{\circ}\text{C}$  (Chantanuson et al., 2022; Damodaran; Parkin; Fennema, 2010; Oliveira, 2020).

O tempo de congelamento foi maior para o Ponto 3, seguindo a ordem decrescente para os Pontos 2, 4, 1 e 5, conforme indicado na Tabela 11. Além disso, os resultados foram mais homogêneos entre os pontos alinhados na horizontal (4, 1 e 5), indicando que a perda de calor ocorreu no sentido vertical da amostra. Mesmo diante da interferência da camada superior de água, que atuou como isolante, esse padrão de congelamento foi mantido, evidenciando que o congelamento foi unidirecional, corroborando para a obtenção de anisotropias nos géis proteicos.

## 6. CONCLUSÃO

A partir do DFC evidencia-se que a resposta *Dureza* ( $Y_1$ ) é influenciada positivamente pelo *Teor de sólidos* ( $X_1$ ), embora também tenha sofrido, em menor grau, a influência do *pH* ( $X_2$ ), da *Temperatura de Congelamento* ( $X_3$ ) e das interações  $X_1 \cdot X_2$  e  $X_1 \cdot X_3$ . Já a resposta *Coesividade* ( $Y_2$ ) apresentou como fator de maior impacto a variável *pH* ( $X_2$ ), que influencia positivamente  $Y_2$ , seguido pelo *Teor de sólidos* ( $X_1$ ) e pelas interações  $X_1 \cdot X_2$  e  $X_2 \cdot X_3$ .

Há potencial evidente no material para replicar características de cor e textura de produtos cárneos. Tratamentos ( $X_1$  em %;  $X_2$ ;  $X_3$  em °C) como A5 (5; 5,0; -5), A2 (13; 5,0; -15), A1 (5; 5,0; -15), A3 (5; 6,0; -15) e A7 (5%; 6,0; -5) demonstraram texturas comparáveis às de análogos de carne na literatura e às carnes convencionais estudadas. Em relação à cor, A5 (5; 5,0; -5) e A6 (13; 5,0; -5) apresentaram as menores variações em comparação com filé de peixe e peito de frango, respectivamente. Contudo, ainda é possível buscar melhorias para reduzir a mastigabilidade e direcionar a cor para replicar um tipo de produto cárneo específico.

O pH e os teores de umidade e proteína tiveram respostas similares aos descritos para produtos cárneos na literatura. A frente de congelamento sugere crescimento unidirecional de cristais. Estrutura em folhas planas foram observadas predominantemente nos tratamentos A6 (13; 5,0; -5), A8 (13; 6,0; -5) e A9 (9; 5,5; -10), para as quais o grau de texturização foram maiores que 1 e similares aos encontrados na literatura para análogos a carne, apontando comportamento anisotrópico nas amostras.

Entre os tratamentos avaliados, os parâmetros do ponto central (9; 5,5; -10) apresentaram os melhores resultados, considerando a estrutura formada e a textura obtida, o que indica que a metodologia proposta é promissora para a obtenção de géis com propriedades semelhantes às da carne.

### 6.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este estudo preliminar revelou uma promissora oportunidade na metodologia proposta para o desenvolvimento de produtos análogos à carne usando congelamento. Dessa forma, para dar continuidade ao estudo, sugere-se:

- Aprimorar propriedades sensoriais: foco em modificações na formulação para melhorar a cor e textura do produto.
- Estudo sensorial: realização de testes sensoriais para avaliar a percepção do consumidor e a aceitação do produto.
- Avaliação nutricional: caracterização do perfil de aminoácidos e sua digestibilidade.

- Estudo da vida de prateleira: pesquisa sobre o uso de embalagens adequadas, adição de conservantes e/ou processos de desidratação para aumentar a durabilidade.
- Viabilidade técnica: análise financeira e econômica do processo produtivo.

## REFERÊNCIAS

- ADIO, Salawu Omobayo *et al.* Arsenic and selenium removal from water using biosynthesized nanoscale zero-valent iron: A factorial design analysis. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 107, p. 518–527, abr. 2017.
- ALIZADEH, E. *et al.* Effect of different freezing processes on the microstructure of Atlantic salmon (*Salmo salar*) fillets. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 8, n. 4, p. 493–499, dez. 2007.
- ALTAYB, Hisham N. *et al.* Mathematical modeling and optimization by the application of full factorial design and response surface methodology approach for decolourization of dyes by a newly isolated *Photobacterium ganghwense*. **Journal of Water Process Engineering**, v. 44, p. 102429, dez. 2021.
- ANDRADE, Leonardo R. *et al.* Ultrastructure of acidic polysaccharides from the cell walls of brown algae. **Journal of Structural Biology**, v. 145, n. 3, p. 216–225, mar. 2004.
- ARÊAS, José A. G. Extrusion of food proteins. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 32, n. 4, p. 365–392, jan. 1992.
- ARGHIROIU, Georgiana Armenița; CRISTEA, Stelica; ALECU, Ioan Niculae. TENDENCIES REGARDING TRADE WITH OLEAGINOUS SEEDS OF ROMANIA. **Scientific Papers Series Management, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development**, v. 15, 2015.
- ASSEGEHEGN, Getachew *et al.* The Importance of Understanding the Freezing Step and Its Impact on Freeze-Drying Process Performance. **Journal of Pharmaceutical Sciences**, v. 108, n. 4, p. 1378–1395, abr. 2019.
- BALBINOT JUNIOR, A. A. *et al.* **Análise da produção, área cultivada, produtividade e estabilidade produtiva da soja nos estados brasileiros em 25 safras (1996/1997 a 2020/2021)**. Londrina: [S.n.].
- BANERJEE, Soumya; BHATTACHARYA, Suwendu. Food Gels: Gelling Process and New Applications. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 52, n. 4, p. 334–346, abr. 2012.
- BAUNE, Marie-Christin *et al.* Textured vegetable proteins (TVP): Future foods standing on their merits as meat alternatives. **Future Foods**, v. 6, p. 100181, dez. 2022.
- BENJAMINSON, M. A.; GILCHRIEST, J. A.; LORENZ, M. In vitro edible muscle protein production system (mpps): stage 1, fish. **Acta Astronautica**, v. 51, n. 12, p. 879–889, dez. 2002.
- BEUCHAT, LARRY R. *et al.* Low--Water Activity Foods: Increased Concern as Vehicles of Foodborne Pathogens. **Journal of Food Protection**, v. 76, n. 1, p. 150–172, jan. 2013.

BHATNAGAR, Bakul S.; BOGNER, Robin H.; PIKAL, Michael J. Protein stability during freezing: Separation of stresses and mechanisms of protein stabilization. **Pharmaceutical Development and Technology**, set. 2007.

BOISON, GLADYS; TARANTO, MICHAEL V.; CHERYAN, MUNIR. Extrusion of defatted soy flour-hydrocolloid mixtures. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 18, n. 6, p. 719–730, 28 dez. 1983.

BOONARSA, Parinya *et al.* Enhancement of nutritional and textural properties of meat analogues using silkworm pupae powder via freeze alignment technique. **Food Chemistry: X**, v. 27, p. 102370, abr. 2025.

BOYE, Joyce; ZARE, Fatemeh; PLETCH, Alison. Pulse proteins: Processing, characterization, functional properties and applications in food and feed. **Food Research International**, v. 43, n. 2, p. 414–431, mar. 2010.

BRASIL. **RDC No 268, DE 22 DE SETEMBRO DE 2005**. Ministério da Saúde - MS. Agência Nacional de Vigilância Sanitária – ANVISA. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília - DF, 22 set. 2005.

CAMPOS, Margarida de Cássia. Expansão da soja no território nacional: o papel da demanda internacional e da demanda interna. **Geografares**, v. 8, 1 dez. 2010.

CĂPRIȚĂ, Rodica; CĂPRIȚĂ, Adrian; CREȚESCU, Iuliana. Protein Solubility as Quality Index for Processed Soybean . **Animal Science and Biotechnologies**, v. 45, p. 375–378, 2010.

CASTRO-GIRÁLDEZ, M. *et al.* Thermodynamic approach of meat freezing process. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 23, p. 138–145, 2014.

CHANTANUSON, Ratchanon *et al.* Preparation of soy protein-based food gels and control of fibrous structure and rheological property by freezing. **Food Structure**, v. 32, 1 abr. 2022.

CHANTANUSON, Ratchanon *et al.* Effect of dry heat treatment of soy protein powder on aligned structure formation in soy protein-based food gels during freezing. **Journal of Food Engineering**, v. 363, 1 fev. 2024.

CHATTERJEE, Cynthia; GLEDDIE, Stephen; XIAO, Chao-Wu. Soybean Bioactive Peptides and Their Functional Properties. **Nutrients**, v. 10, n. 9, p. 1211, 1 set. 2018.

CHEFTEL, J. C.; KITAGAWA, M.; QUÉGUINER, C. New protein texturization processes by extrusion cooking at high moisture levels. **Food Reviews International**, v. 8, n. 2, p. 235–275, jan. 1992.

CHEN, Feng Liang *et al.* System parameters and product properties response of soybean protein extruded at wide moisture range. **Journal of Food Engineering**, v. 96, n. 2, p. 208–213, jan. 2010.

CHIANG, Jie Hong *et al.* Effects of soy protein to wheat gluten ratio on the physicochemical properties of extruded meat analogues. **Food Structure**, v. 19, p. 100102, jan. 2019.

CLARK, Beth *et al.* Citizens, consumers and farm animal welfare: A meta-analysis of willingness-to-pay studies. **Food Policy**, v. 68, p. 112–127, abr. 2017.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Produtos 360 – Portal de Informações da Conab**. Disponível em: <<https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/produtos-360.html>>. Acesso em: 18 jun. 2025.

CUIBUS, L. *et al.* Application of infrared thermography and dielectric spectroscopy for controlling freezing process of raw potato. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 24, p. 80–87, ago. 2014.

DABBOUR, Mokhtar *et al.* Localized enzymolysis and sonochemically modified sunflower protein: Physical, functional and structure attributes. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 63, maio 2020.

DABLIU, R. J. **Mill sentidos da vida: um café com futuros economistas**. 1. ed. Rio de Janeiro: Alta Books, 2024.

DALVI-ISFAHAN, Mohsen *et al.* Review on identification, underlying mechanisms and evaluation of freezing damage. **Journal of Food Engineering**, v. 255, p. 50–60, ago. 2019.

DAMODARAN, Srinivasan; PARKIN, Kirk L. **Química de alimentos de Fennema**. 5. ed. [S.l.]: ARTMED EDITORA LTDA, 2019.

DAMODARAN, Srinivasan.; PARKIN, Kirk L.; FENNEMA, Owen R. **Química de alimentos de Fennema**. [S.l.]: Artmed, 2010.

DAY, Li. Proteins from land plants – Potential resources for human nutrition and food security. **Trends in Food Science & Technology**, v. 32, n. 1, p. 25–42, jul. 2013.

DAY, Li; CAKEBREAD, Julie A.; LOVEDAY, Simon M. Food proteins from animals and plants: Differences in the nutritional and functional properties. **Trends in Food Science & Technology**, v. 119, p. 428–442, jan. 2022a.

DAY, Li; CAKEBREAD, Julie A.; LOVEDAY, Simon M. Food proteins from animals and plants: Differences in the nutritional and functional properties. **Trends in Food Science & Technology**, v. 119, p. 428–442, jan. 2022b.

DEKKERS, Birgit L. *et al.* A combined rheology and time domain NMR approach for determining water distributions in protein blends. **Food Hydrocolloids**, v. 60, p. 525–532, out. 2016.

DEKKERS, Birgit L.; BOOM, Remko M.; VAN DER GOOT, Atze Jan. Structuring processes for meat analogues. **Trends in Food Science and Technology Elsevier Ltd**, 1 nov. 2018.

EDELMAN, P. D. *et al.* Commentary: *In Vitro* -Cultured Meat Production. **Tissue Engineering**, v. 11, n. 5–6, p. 659–662, maio 2005.

EKEZIE, Flora-Glad Chizoba; SUN, Da-Wen; CHENG, Jun-Hu. Acceleration of microwave-assisted extraction processes of food components by integrating technologies and applying

emerging solvents: A review of latest developments. **Trends in Food Science & Technology**, v. 67, p. 160–172, set. 2017.

EMBRAPA. **EMBRAPA soja: inovação, tecnologia, resultados**. Londrina: [S.n.]. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1092757>>. Acesso em: 19 jun. 2025.

EMBRAPA. **Soja em números (safra 2024/25)**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>>. Acesso em: 18 jun. 2025a.

EMBRAPA. **Soja no Brasil**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/en/soybean>>. Acesso em: 21 jul. 2025b.

FAN, Xin *et al.* Current research status on the structure, physicochemical properties, bioactivities, and mechanism of soybean-derived bioactive peptide lunasin. **Food Chemistry**, v. 479, p. 143836, jul. 2025a.

FAN, Yue *et al.* Enhancement of the texture and microstructure of faba bean-based meat analogues with brewers' spent grain through enzymatic treatments. **Sustainable Food Technology**, v. 2, n. 3, p. 826–836, 2024.

FAN, Yue *et al.* Characteristics of faba bean protein-based high-moisture meat analogues incorporating brewers' spent grain through extrusion. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 100, p. 103919, mar. 2025b.

FREITAS, Mirian Luisa Faria; ALBANO, Kivia Mislaine; TELIS, Vânia Regina Nicoletti. Characterization of biopolymers and soy protein isolate-high-methoxyl pectin complex. **Polímeros**, v. 27, n. 1, p. 62–67, mar. 2017.

GALDEANO, Melicia Cintia. **Tecnologias de Texturização de Proteínas Vegetais**. Folhetos—Rio de Janeiro - RJ: Embrapa Agroindústria de Alimentos, 14 abr. 2022.

GALLANT, D. J. *et al.* Ultrastructural Aspects of Spun Pea and Fababean Proteins. *In: Food Structure*. 2. ed. [S.l.]: AMF O'Hare, 1984. v. 3.

GAONKAR, Anilkumar G.; MCPHERSON, Andrew. **INGREDIENT INTERACTIONS Effects on Food Quality**. 2. ed. Boca Raton - FL: Taylor & Francis, 2006.

GLOBENEWSWIRE. **Demand for Global Soy Protein Ingredients Market Size & Share Worth USD 19.5 Billion by 2028, Exhibit a CAGR of 7.2% | Soy Protein Ingredients Industry Trends**, Manufacturers, Growth, Analysis & Forecast Report by Facts & Factors. Disponível em: <<https://www.globenewswire.com/en/news-release/2022/05/19/2447219/0/en/Demand-for-Global-Soy-Protein-Ingredients-Market-Size-Share-Worth-USD-19-5-Billion-by-2028-Exhibit-a-CAGR-of-7-2-Soy-Protein-Ingredients-Industry-Trends-Manufacturers-Growth-Analysis.html>>. Acesso em: 25 jun. 2025.

GODSCHALK-BROERS, Layla; SALA, Guido; SCHOLTEN, Elke. Meat Analogues: Relating Structure to Texture and Sensory Perception. **Foods**, v. 11, n. 15, p. 2227, 26 jul. 2022.

GONÇALVES, Letícia Dias dos Anjos; MAGALHÃES, Gabriella Leite. Hambúrguer bovino com substituição da gordura por farinha da casca de maracujá. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 13, n. 4, p. 489, 1 out. 2018.

GRABOWSKA, Katarzyna J. *et al.* Shear structuring as a new method to make anisotropic structures from soy–gluten blends. **Food Research International**, v. 64, p. 743–751, out. 2014.

GRABOWSKA, Katarzyna J. *et al.* Shear-induced structuring as a tool to make anisotropic materials using soy protein concentrate. **Journal of Food Engineering**, v. 188, p. 77–86, nov. 2016.

GUAN, Juan *et al.* Morphology and mechanical properties of soy protein scaffolds made by directional freezing. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 118, n. 3, p. 1658–1665, 5 nov. 2010.

GÜLTEKIN SUBAŞI, Büşra *et al.* A review on protein extracts from sunflower cake: techno-functional properties and promising modification methods. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 62, n. 24, p. 6682–6697, 29 ago. 2021.

GUYONY, Valérie; FAYOLLE, Francine; JURY, Vanessa. High moisture extrusion of vegetable proteins for making fibrous meat analogs: A review. **Food Reviews International**, v. 39, n. 7, p. 4262–4287, 25 ago. 2023.

HAMDAMI, Nasser; MONTEAU, Jean-Yves; LE BAIL, Alain. Transport properties of a high porosity model food at above and sub-freezing temperatures. Part 1: Thermophysical properties and water activity. **Journal of Food Engineering**, v. 62, n. 4, p. 373–383, maio 2004.

HEINRICH BÖLL FOUNDATION, Elke Paul. **MEAT ATLAS Facts and figures about the animals we eat**. Berlim - DEU: [S.n.]. Disponível em: <<https://friendsoftheearth.eu/publication/meat-atlas-facts-and-figures-about-the-animals-we-eat/>>. Acesso em: 2 jun. 2024.

HUA, Yufei *et al.* Properties of soy protein isolate prepared from aqueous alcohol washed soy flakes. **Food Research International**, v. 38, n. 3, p. 273–279, abr. 2005.

HUANG, Ning *et al.* A critical review on research status and future prospects of fermented soybean products in China. **Journal of Future Foods**, v. 6, n. 1, p. 11–25, jan. 2026.

IAL, Instituto Adolfo Lutz. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 4a (1a Ed. Digital) ed. São Paulo: [S.n.].

JEBITTA, S. Reginold *et al.* A Comprehensive Review on Protein Isolates from Legumes. **The International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)**, v. 9, n. 6, p. 215–222, 30 mar. 2021.

JHA, Piyush Kumar *et al.* A review on effect of DC voltage on crystallization process in food systems. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 42, p. 204–219, ago. 2017.

JIA, Wanqing *et al.* Effect of aqueous ethanol washing on functional properties of sunflower materials for meat analogue application. **Food Structure**, v. 33, p. 100274, jul. 2022.

JIE, Wang; LITE, Li; YANG, Dan. The correlation between freezing point and soluble solids of fruits. **Journal of Food Engineering**, v. 60, n. 4, p. 481–484, dez. 2003.

KAALE, Lilian Daniel *et al.* The effect of cooling rates on the ice crystal growth in air-packed salmon fillets during superchilling and superchilled storage. **International Journal of Refrigeration**, v. 36, n. 1, p. 110–119, jan. 2013.

KARAZHIYAN, Hojjat; RAZAVI, Seyed M. A.; PHILLIPS, Glyn O. Extraction optimization of a hydrocolloid extract from cress seed (*Lepidium sativum*) using response surface methodology. **Food Hydrocolloids**, v. 25, n. 5, p. 915–920, jul. 2011.

KAUR, Raman Preet; GHOSHAL, Gargi. Sunflower protein isolates-composition, extraction and functional properties. **Advances in Colloid and Interface Science** Chandigarh 160014, IndiaElsevier B.V., , 1 ago. 2022.

KINNEY, MJ; WESTON, Zak; BAUMAN, JD. **Overview of Plant-Based Meat Manufacturing: Plant-Based Meat Manufacturing by Extrusion**. The Good Food Institute, 2019.

KRINTIRAS, Georgios A. *et al.* On characterization of anisotropic plant protein structures. **Food Funct.**, v. 5, n. 12, p. 3233–3240, 2014.

KRINTIRAS, Georgios A. *et al.* Production of structured soy-based meat analogues using simple shear and heat in a Couette Cell. **Journal of Food Engineering**, v. 160, p. 34–41, set. 2015.

KUMAR, Pavitra Krishna *et al.* State/Phase Transitions, Ice Recrystallization, and Quality Changes in Frozen Foods Subjected to Temperature Fluctuations. **Food Engineering Reviews**, v. 12, n. 4, p. 421–451, 21 dez. 2020.

LARSEN, Bjorn *et al.* Characterization of the alginates from algae harvested at the Egyptian Red Sea coast. **Carbohydrate Research**, v. 338, n. 22, p. 2325–2336, out. 2003.

LEBAIL, A. *et al.* Phase transition in foods: effect of pressure and methods to assess or control phase transition. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 4, n. 1, p. 15–24, mar. 2003.

LEE, Jung-Soo *et al.* Physico-chemical characteristics of rice protein-based novel textured vegetable proteins as meat analogues produced by low-moisture extrusion cooking technology. **LWT**, v. 157, p. 113056, mar. 2022.

LIBRÁN, C. M.; CASTRO, S.; LAGARON, J. M. Encapsulation by electrospray coating atomization of probiotic strains. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 39, p. 216–222, fev. 2017.

LIN, Duanquan; KELLY, Alan L.; MIAO, Song. The role of mixing sequence in structuring O/W emulsions and emulsion gels produced by electrostatic protein-polysaccharide interactions between soy protein isolate-coated droplets and alginate molecules. **Food Hydrocolloids**, v. 113, p. 106537, abr. 2021.

LÓPEZ, Gabriela *et al.* Development of a liquid nutritional supplement using a *Sesamum indicum* L. protein isolate. **LWT - Food Science and Technology**, v. 36, n. 1, p. 67–74, fev. 2003.

MACEDO, Paula Daiany G.; MATOS, Simone Pires de. Proteínas. *In: Bioquímica dos Alimentos - Composição, Reações e Práticas de Conservação*. [S.l.]: SRV Editora LTDA, 2015.

MASSON, Maria Lucia; FUGMANN, Hilmar Adelbert. **Criotexturização de proteínas de soja**. B. CEPPA, v. 16, p. 189–202, 1998.

MCAFEE, Alison J. *et al.* Red meat consumption: An overview of the risks and benefits. **Meat Science**, v. 84, n. 1, p. 1–13, jan. 2010.

MICHA, Renata; WALLACE, Sarah K.; MOZAFFARIAN, Dariush. Red and Processed Meat Consumption and Risk of Incident Coronary Heart Disease, Stroke, and Diabetes Mellitus. **Circulation**, v. 121, n. 21, p. 2271–2283, jun. 2010.

MIDDENDORF, John Edward; WAGGLE, Doyle Hans; CORNELL, Alan. **Protein food product**. 14 nov. 1973.

MITCHELL, D. G. *et al.* Benign adrenocortical masses: diagnosis with chemical shift MR imaging. **Radiology**, v. 185, n. 2, p. 345–351, nov. 1992.

MIYAWAKI, Osato; YANO, Toshimasa; ABE, Toru. Freezing and Ice Structure Formed in Protein Gels. **Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry**, v. 56, n. 6, p. 953–957, 1992.

MIYOSHI, Takanori; TOYOHARA, Kiyotsuna; MINEMATSU, Hiroyoshi. Preparation of ultrafine fibrous zein membranes via electrospinning. **Polymer International**, v. 54, n. 8, p. 1187–1190, 28 ago. 2005.

MOHD SHARIF, Nurul Shareena Aqmar; JAMALUDDIN, Mohd Faizan; ZAINOL, Norazwina. Factorial analysis of ferulic acid production from biowaste. **Materials Today: Proceedings**, v. 46, p. 1763–1769, 2021.

MORR, C. V. *et al.* A Collaborative Study to Develop a Standardized Food Protein Solubility Procedure. **Journal of Food Science**, v. 50, n. 6, p. 1715–1718, 25 nov. 1985.

MOURE, Andrés *et al.* Functionality of oilseed protein products: A review. **Food Research International**, v. 39, n. 9, p. 945–963, nov. 2006.

MOURE, Andrés; DOMÍNGUEZ, Herminia; PARAJO, Juan Carlos. Fractionation and Enzymatic Hydrolysis of Soluble Protein Present in Waste Liquors from Soy Processing. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 53, n. 19, p. 7600–7608, 1 set. 2005.

NAKAGAWA, Kyuya *et al.* Meat analogue preparation from cricket and rice powder mixtures with controlled textural and nutritional quality by freeze alignment technique. **Food Chemistry: X**, v. 22, p. 101402, jun. 2024.

NIEUWLAND, M. *et al.* Reprint of “Food-grade electrospinning of proteins”. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 24, p. 138–144, ago. 2014.

NISHINARI, K. *et al.* Soy proteins: A review on composition, aggregation and emulsification. **Food Hydrocolloids**, v. 39, p. 301–318, ago. 2014.

NOWALID, Wan Fatimah Wan Mohd; HAMID, Hazrulrizawati Abd; GIWA, Shehu Hadiza. Development of citrus peel by-product as a slice jam by using two-level factorial design. **Food Chemistry: Molecular Sciences**, v. 8, p. 100196, jul. 2024.

OLIVEIRA, Alessandra Lopes de. **Refrigeração e cadeia do frio para alimentos**. Pirassununga: Universidade de São Paulo. Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, 2020.

ORDOÑEZ PEREDA, Juan A. **Tecnología de Alimentos - componentes dos alimentos e processos**. Porto Alegre: ARTMED, 2005. v. 1

ORIGINPRO. OriginLab Corporation. Northampton, MA, USA, 2025.

OZTURK, Oguz K.; HAMAKER, Bruce R. Texturization of plant protein-based meat alternatives: Processing, base proteins, and other constructional ingredients. **Future Foods**, v. 8, 1 dez. 2023.

PACHECO, Maria Teresa Bertoldo; SADAHIRA, Mitie Sônia. **Série Tecnológica das Proteínas Alternativas - Proteínas Vegetais (Plant-Based)**. São Paulo: Tiki Books: The Good Food Institute Brasil, 2022.

PALANISAMY, Megala *et al.* Influence of iota carrageenan addition on the properties of soya protein meat analogues. **LWT**, v. 87, p. 546–552, jan. 2018.

PATHARE, Pankaj B.; OPARA, Umezuruike Linus; AL-SAID, Fahad Al-Julanda. Colour Measurement and Analysis in Fresh and Processed Foods: A Review. **Food and Bioprocess Technology**, v. 6, n. 1, p. 36–60, 11 jan. 2013.

PENG, Yu *et al.* The Interactions of Soy Protein and Wheat Gluten for the Development of Meat-like Fibrous Structure. **Molecules**, v. 28, n. 21, p. 7431, 4 nov. 2023.

PIMENTEL, Fernando Campos *et al.* Propriedades funcionais do isolado proteico da soja (Glycine max (L) Merrill). **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, v. 22, n. 6, p. e5298, 17 jun. 2024.

POST, Mark J. Cultured meat from stem cells: Challenges and prospects. **Meat Science**, v. 92, n. 3, p. 297–301, nov. 2012.

POWELL-PALM, Matthew J. Calculation of a temperature-volume phase diagram of water to inform the study of isochoric freezing down to cryogenic temperatures. **RSC Advances**, v. 12, n. 32, p. 20603–20609, 17 jul. 2022.

PROVESI, João Gustavo; AMANTE, Edna Regina. Revisão: Proteínas anticongelantes - Uma tecnologia emergente para o congelamento de alimentos. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 18, n. 1, p. 2–13, 1 jan. 2015.

QIN, Pingxu; WANG, Taoran; LUO, Yangchao. A review on plant-based proteins from soybean: Health benefits and soy product development. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 7, 1 mar. 2022.

QIU, Liqing *et al.* Application of power ultrasound in freezing and thawing Processes: Effect on process efficiency and product quality. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 68, p. 105230, nov. 2020.

RAHMAN, Mohammad Shafiur. State diagram of foods: Its potential use in food processing and product stability. **Trends in Food Science & Technology**, v. 17, n. 3, p. 129–141, mar. 2006.

RAHMANI, Rahim; FIROUZI, Ramin. Gateway controller with deep sensing: learning to be autonomic in intelligent internet of things. **International Journal of Communication Networks and Distributed Systems**, v. 26, n. 1, p. 1, 2021.

RAMPON, V. *et al.* Protein Structure and Network Orientation in Edible Films Prepared by Spinning Process. **Journal of Food Science**, v. 64, n. 2, p. 313–316, 20 mar. 1999.

RIBEIRO, Eliana Paula; SERAVALLI, Elisena A. G. Proteínas. *In: Química de alimentos*. 2. ed. [S.l.]: Editora Blucher, 2007. p. 96–121.

SAMARD, Sasimaporn; GU, Bon-Yeob; RYU, Gi-Hyung. Effects of extrusion types, screw speed and addition of wheat gluten on physicochemical characteristics and cooking stability of meat analogues. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 99, n. 11, p. 4922–4931, 30 ago. 2019.

SCHREUDERS, Floor K. G. *et al.* Comparing structuring potential of pea and soy protein with gluten for meat analogue preparation. **Journal of Food Engineering**, v. 261, p. 32–39, nov. 2019.

SELLIMI, Sabrina *et al.* Structural, physicochemical and antioxidant properties of sodium alginate isolated from a Tunisian brown seaweed. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 72, p. 1358–1367, jan. 2015.

SHA, Lei; XIONG, Youling L. Plant protein-based alternatives of reconstructed meat: Science, technology, and challenges. **Trends in Food Science & Technology**, v. 102, p. 51–61, ago. 2020.

SHARMA, Manmohan; GUPTA, S. K.; MONDAL, A. K. Production and Trade of Major World Oil Crops. *In: Technological Innovations in Major World Oil Crops*, Volume 1. New York, NY: Springer New York, 2012. v. 1 p. 1–15.

SHEVKANI, Khetan *et al.* Structural and functional characterization of kidney bean and field pea protein isolates: A comparative study. **Food Hydrocolloids**, v. 43, p. 679–689, jan. 2015.

SILVEIRA, Miriam Fontes Araujo *et al.* Composição centesimal e propriedades funcionais de isolado proteico de soja comercial. **Tecnia**, v. 5, p. 191–206, 2020.

SINGH, Awanish; SIT, Nandan. Optimization of ingredient composition for meat analogue prepared from Manila tamarind protein isolate by freeze texturization. **International Journal of Gastronomy and Food Science**, v. 39, p. 101095, mar. 2025.

SINGH, P.; KRISHNASWAMY, K. Sustainable zero-waste processing system for soybeans and soy by-product valorization. **Trends in Food Science & Technology**, v. 128, p. 331–344, out. 2022.

SOARE, Elena; CHIURCIU, Irina-Adriana. CONSIDERATIONS CONCERNING WORLDWIDE PRODUCTION AND MARKETING OF SUNFLOWER SEEDS. Scientific Papers Series Management, **Economic Engineering in Agriculture and Rural Development**, v. 18, 2018.

SOLÓRZANO LEMOS, Judith Liliana; COSTA DE MELLO, Marise; CHAVES CABRAL, Lair. Estudo da solubilidade das proteínas de extratos hidrossolúveis de soja em pó. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 17, n. 3, p. 337–340, dez. 1997.

SOLTANI FIROUZ, Mahmoud; FARAHMANDI, Ali; HOSSEINPOUR, Soleiman. Recent advances in ultrasound application as a novel technique in analysis, processing and quality control of fruits, juices and dairy products industries: A review. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 57, p. 73–88, out. 2019.

SOYER, Ayla *et al.* Effects of freezing temperature and duration of frozen storage on lipid and protein oxidation in chicken meat. **Food Chemistry**, v. 120, n. 4, p. 1025–1030, jun. 2010.

SUI, Xiaonan; ZHANG, Tianyi; JIANG, Lianzhou. Soy Protein: Molecular Structure Revisited and Recent Advances in Processing Technologies. **Annual Review of Food Science and Technology**, v. 12, n. 1, p. 119–147, 25 mar. 2021.

SZEKALSKA, Marta *et al.* Alginate: Current Use and Future Perspectives in Pharmaceutical and Biomedical Applications. **International Journal of Polymer Science**, v. 2016, p. 1–17, 2016.

SZE-TAO, K. W. C.; SATHE, S. K. Functional properties and in vitro digestibility of almond (*Prunus dulcis* L.) protein isolate. **Food Chemistry**, v. 69, n. 2, p. 153–160, maio 2000.

TAGHIAN DINANI, Somayeh *et al.* Investigation potential of hydrocolloids in meat analogue preparation. **Food Hydrocolloids**, v. 135, p. 108199, fev. 2023.

TAN, Mingtang; MEI, Jun; XIE, Jing. The Formation and Control of Ice Crystal and Its Impact on the Quality of Frozen Aquatic Products: A Review. **Crystals**, v. 11, n. 1, p. 68, 15 jan. 2021.

TAYLOR, Michael H.; ZHU, Mei-Jun. Control of *Listeria monocytogenes* in low-moisture foods. **Trends in Food Science & Technology**, v. 116, p. 802–814, out. 2021.

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

TORRES-GINER, S.; GIMENEZ, E.; LAGARON, J. M. Characterization of the morphology and thermal properties of Zein Prolamine nanostructures obtained by electrospinning. **Food Hydrocolloids**, v. 22, n. 4, p. 601–614, jun. 2008.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). **Production, Supply and Distribution (PSD) Online – Soybeans**. Disponível em: <UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Production, Supply and Distribution (PSD) Online – Soybeans. 2025. Disponível em: <https://www.fas.usda.gov/data/production/commodity/2222000>. Acesso em: 19 jun. 2025.>. Acesso em: 18 jun. 2025a.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). **World Agricultural Production - June 2025**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<https://www.fas.usda.gov/data/world-agricultural-production-06122025>>. Acesso em: 25 jun. 2025b.

VAN DER SMAN, R. G. M. *et al.* Ice crystal interspacing in frozen foods. **Journal of Food Engineering**, v. 116, n. 2, p. 622–626, maio 2013.

WAGNER, Caleb E. *et al.* The impact of temperature gradient, apparent shear rate, and inferred phase transition timing on extruded high moisture meat analog quality. **Food Research International**, v. 192, p. 114760, set. 2024.

WEN, Yaxin *et al.* Potato starch altered the rheological, printing, and melting properties of 3D-printable fat analogs based on inulin emulsion-filled gels. **Carbohydrate Polymers**, v. 269, p. 118285, out. 2021.

WIEBE, M. Myco-protein from *Fusarium venenatum* : a well-established product for human consumption. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 58, n. 4, p. 421–427, 1 mar. 2002.

WIEBE, MARILYN G. Quorn™ Myco-protein - Overview of a successful fungal product. **Mycologist**, v. 18, n. 1, p. 17–20, fev. 2004.

YAN, Peiling; LAN, Weiqing; XIE, Jing. Modification on sodium alginate for food preservation: A review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 143, p. 104217, jan. 2024.

YANG, Fang *et al.* Effect of immersion freezing with edible solution on freezing efficiency and physical properties of obscure pufferfish (*Takifugu Obscurus*) fillets. **LWT**, v. 118, p. 108762, jan. 2020.

YU, Shifeng *et al.* Impacts of Low and Ultra-Low Temperature Freezing on Retrogradation Properties of Rice Amylopectin During Storage. **Food and Bioprocess Technology**, v. 5, n. 1, p. 391–400, 17 jan. 2012.

YULIARTI, Oni *et al.* Influence of combination carboxymethylcellulose and pectin on the stability of acidified milk drinks. **Food Hydrocolloids**, v. 89, p. 216–223, abr. 2019.

YULIARTI, Oni *et al.* Structural properties of meat analogue with added konjac gels. **Food Hydrocolloids**, v. 142, p. 108716, set. 2023.

YULIARTI, Oni; KIAT KOVIS, Tay Jun; YI, Ng Jun. Structuring the meat analogue by using plant-based derived composites. **Journal of Food Engineering**, v. 288, p. 110138, jan. 2021.

ZHANG, Tianyi *et al.* The development history and recent updates on soy protein-based meat alternatives. **Trends in Food Science & Technology**, v. 109, p. 702–710, mar. 2021.

### ANEXO 1 – Anova obtida para *Dureza* ( $Y_1$ )

|             | Grau de Liberdade | Soma de Quadrados | Média dos Quadrados | Valor F   | Prob>F   |
|-------------|-------------------|-------------------|---------------------|-----------|----------|
| $X_1$       | 1                 | 4200,014          | 4200,014            | 147,08765 | 2,65E-04 |
| $X_2$       | 1                 | 255,49301         | 255,49301           | 8,94756   | 0,04029  |
| $X_3$       | 1                 | 421,7092          | 421,7092            | 14,76857  | 0,01841  |
| $X_1 * X_2$ | 1                 | 762,25601         | 762,25601           | 26,69478  | 0,00667  |
| $X_1 * X_3$ | 1                 | 854,15333         | 854,15333           | 29,91309  | 0,00544  |
| Error       | 4                 | 114,21799         | 28,5545             |           |          |
| Total       | 9                 | 6607,84356        |                     |           |          |

FONTE: Elaborado pelo autor usando software OriginPro (2025).

### ANEXO 2 – Anova obtida para *Coesividade* ( $Y_2$ )

|             | Grau de Liberdade | Soma de Quadrados | Média dos Quadrados | Valor F  | Prob>F  |
|-------------|-------------------|-------------------|---------------------|----------|---------|
| $X_1$       | 1                 | 0,00162           | 0,00162             | 20,12495 | 0,02066 |
| $X_2$       | 1                 | 0,00516           | 0,00516             | 63,90752 | 0,00409 |
| $X_3$       | 1                 | 2,33E-06          | 2,33E-06            | 0,02889  | 0,87585 |
| $X_1 * X_2$ | 1                 | 0,00112           | 0,00112             | 13,87972 | 0,03368 |
| $X_1 * X_3$ | 1                 | 3,87E-04          | 3,87E-04            | 4,79628  | 0,11625 |
| $X_2 * X_3$ | 1                 | 9,07E-04          | 9,07E-04            | 11,23778 | 0,04398 |
| Error       | 3                 | 2,42E-04          | 8,07E-05            |          |         |
| Total       | 9                 | 0,00944           |                     |          |         |

FONTE: Elaborado pelo autor usando software OriginPro (2025).

### ANEXO 3 – Resultados da análise de cor ( $L^*$ , $a^*$ , $b^*$ , $C^*$ e $h^\circ$ ) para diferentes amostras e carnes de referência

| Amostra           | $L^*$                    | $a^*$                     | $b^*$                      | $C^*$                       | $h^\circ$                  |
|-------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 1                 | 68,43±0,33 <sup>B</sup>  | 5,42±0,02 <sup>DE</sup>   | 21,95±0,31 <sup>BC</sup>   | 22,61±0,31 <sup>BC</sup>    | 76,13±0,15 <sup>BCDE</sup> |
| 2                 | 62,95±0,44 <sup>DE</sup> | 5,74±0,56 <sup>BCD</sup>  | 21,27±0,25 <sup>BCD</sup>  | 22,03±0,25 <sup>BCD</sup>   | 74,88±0,13 <sup>DE</sup>   |
| 3                 | 60,52±1,53 <sup>EF</sup> | 4,37±0,23 <sup>F</sup>    | 19,18±0,89 <sup>F</sup>    | 19,72±0,98 <sup>G</sup>     | 74,92±0,63 <sup>BC</sup>   |
| 4                 | 56,26±1,23 <sup>GH</sup> | 5,12±0,15 <sup>CDEF</sup> | 19,53±0,17 <sup>EF</sup>   | 20,18±0,16 <sup>EF</sup>    | 75,39±0,46 <sup>CDE</sup>  |
| 5                 | 68,83±0,58 <sup>AB</sup> | 4,98±0,11 <sup>DEF</sup>  | 20,34±0,21 <sup>CDEF</sup> | 20,95±0,22 <sup>CDE</sup>   | 76,17±0,16 <sup>BCDE</sup> |
| 6                 | 64,83±0,75 <sup>CD</sup> | 5,84±0,16 <sup>BC</sup>   | 22,30±0,13 <sup>B</sup>    | 23,06±0,15 <sup>B</sup>     | 75,24±0,32 <sup>CDE</sup>  |
| 7                 | 61,73±0,27 <sup>E</sup>  | 4,72±0,14 <sup>EF</sup>   | 19,55±0,44 <sup>EG</sup>   | 20,12±0,45 <sup>FG</sup>    | 76,34±0,28 <sup>BCDE</sup> |
| 8                 | 54,03±0,59 <sup>H</sup>  | 5,21±0,18 <sup>CDE</sup>  | 19,78±0,55 <sup>DEF</sup>  | 20,46±0,57 <sup>DEFG</sup>  | 75,17±0,35 <sup>CDE</sup>  |
| 9                 | 58,12±0,70 <sup>FG</sup> | 5,69±0,30 <sup>BCD</sup>  | 20,84±0,90 <sup>BCDE</sup> | 21,62±0,95 <sup>BCDEF</sup> | 74,60±0,20 <sup>DE</sup>   |
| 10                | 58,12±0,67 <sup>FG</sup> | 5,83±0,18 <sup>BC</sup>   | 21,03±0,53 <sup>BCDE</sup> | 21,82±0,54 <sup>BCDE</sup>  | 74,51±0,37 <sup>E</sup>    |
| Peito de frango   | 71,33±0,46 <sup>A</sup>  | 2,12±0,27 <sup>G</sup>    | 20,66±0,70 <sup>CDEF</sup> | 20,76±0,72 <sup>DEFG</sup>  | 84,17±0,54 <sup>A</sup>    |
| Filé de peixe     | 66,69±1,03 <sup>BC</sup> | 6,35±0,54 <sup>B</sup>    | 28,07±0,79 <sup>A</sup>    | 28,78±0,72 <sup>A</sup>     | 77,23±1,19 <sup>B</sup>    |
| Contrafilé bovino | 34,29±2,56 <sup>I</sup>  | 12,30±0,81 <sup>A</sup>   | 15,98±1,32 <sup>G</sup>    | 20,17±1,41 <sup>EF</sup>    | 52,39±1,88 <sup>F</sup>    |

FONTE: elaborado pelo autor (2025). Os resultados são apresentados como a média ± desvio padrão (DP) de quatro repetições. Médias dentro da mesma coluna para cada parâmetro avaliado seguidas por letras diferentes indicam diferenças estatisticamente significativas ( $p < 0,05$ ). Os ensaios foram numerados de 1 a 10, sendo que a combinação de fatores (Teor de sólidos ( $X_1$ ) em %; pH ( $X_2$ ); Temperatura de congelamento ( $X_3$ ) em °C) para cada um é a seguinte: A1 (5; 5,0; -15), A2 (13; 5,0; -15), A3 (5; 6,0; -15), A4 (13; 6,0; -15), A5 (5; 5,0; -5), A6 (13; 5,0; -5), A7 (5; 6,0; -5), A8 (13; 6,0; -5), A9 (9; 5,5; -10) e A10 (9; 5,5; -10).

**ANEXO 4 – Resultados dos Cortes Vertical ( $F_V$ ) e Transversal ( $F_L$ ) em Relação ao Crescimento das Fibras para as Amostras 6, 8 e 9**

| Replicata | Direção do Corte | A6   | A8   | A9   |
|-----------|------------------|------|------|------|
| 1         | $F_L$            | 3,18 | 3,77 | 5,43 |
|           | $F_V$            | 1,33 | 1,82 | 4,49 |
| 2         | $F_L$            | 2,69 | 2,96 | 4,41 |
|           | $F_V$            | 2,18 | 1,84 | 2,86 |
| 3         | $F_L$            | 2,33 | 3,39 | 5,71 |
|           | $F_V$            | 1,57 | 2,02 | 4,10 |
| 4         | $F_L$            | 1,61 | 4,63 | 5,67 |
|           | $F_V$            | 0,94 | 2,41 | 4,79 |
| 5         | $F_L$            | 3,28 | 4,30 | 3,77 |
|           | $F_V$            | 2,26 | 2,39 | 3,00 |
| 6         | $F_L$            | 2,55 | 3,08 | 3,79 |
|           | $F_V$            | 1,86 | 1,65 | 2,71 |
| 7         | $F_L$            | 2,69 | 2,80 | 2,37 |
|           | $F_V$            | 2,08 | 2,53 | 1,90 |
| 8         | $F_L$            | 1,86 | 5,30 | 2,12 |
|           | $F_V$            | 0,82 | 4,69 | 1,12 |
| 9         | $F_L$            | 2,24 | 3,45 | 2,57 |
|           | $F_V$            | 1,12 | 2,00 | 1,26 |
| 10        | $F_L$            | 2,02 | 3,53 | 2,92 |
|           | $F_V$            | 1,51 | 1,94 | 2,12 |

FONTE: Elaborado pelo autor (2025). Os resultados de corte são fornecidos em Newtons (N) para as 10 repetições realizadas.