



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE  
ALIMENTOS

SIMONE DE SOUZA FERNANDES

**EFEITO DE DIFERENTES HIDROCOLÓIDES NA FORMULAÇÃO DE  
MASSAS ALIMENTÍCIAS SEM GLÚTEN TIPO *FUSILLI* UTILIZANDO  
FARINHA DE ARROZ JAPONÊS E DE GRÃO-DE-BICO**

SEROPÉDICA  
2026



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
DE ALIMENTOS**

**EFEITO DE DIFERENTES HIDROCOLÓIDES NA FORMULAÇÃO DE  
MASSAS ALIMENTÍCIAS SEM GLÚTEN TIPO *FUSILLI* UTILIZANDO  
FARINHA DE ARROZ JAPONÊS E DE GRÃO-DE-BICO**

**SIMONE DE SOUZA FERNANDES**

*Sob a Orientação do Professor*  
**José Luis Ramírez Ascheri**

*e Co-orientação do Professor*  
**Carlos Wanderlei Piler de Carvalho**

Tese submetida como requisito parcial  
para obtenção do grau de **Doutora em  
Ciência e Tecnologia de Alimentos**, no  
Programa de Pós-Graduação em Ciência  
e Tecnologia de Alimentos, Área de  
Concentração Tecnologia de Alimentos.

Universidade Federal Rural do Rio De Janeiro  
Biblioteca Central/Central de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada  
Com dados fornecidos pela autora

F363e FERNANDES, SIMONE DE SOUZA, 24/03/1973-  
EFEITO DE DIFERENTES HIDROCOLÓIDES NA FORMULAÇÃO DE  
MASSAS ALIMENTÍCIAS SEM GLÚTEN TIPO EFEITO DE  
DIFERENTES HIDROCOLÓIDES NA FORMULAÇÃO DE MASSAS  
ALIMENTÍCIAS SEM GLÚTEN TIPO FUSILLI UTILIZANDO  
FARINHA DE ARROZ JAPONÊS E DE GRÃO-DE-BICO TIPO  
FUSILLI UTILIZANDO FARINHA DE ARROZ JAPONÊS E DE GRÃO  
DE- BICO / SIMONE DE SOUZA FERNANDES. - NOVA IGUAÇU,  
2026.  
185 f.

Orientador: JOSÉ LUIS RAMIREZ ASCHERI.  
Coorientador: CARLOS WANDERLEI PILER CARVALHO.  
Tese(Doutorado). -- Universidade Federal Rural do  
Rio de Janeiro, PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
DE ALIMENTOS, 2026.

1. MASSAS SEM GLÚTEN. 2. EXTRUSÃO TERMOPLÁSTICA. 3.  
ARROZ JAPONÊS. 4. GRÃO-DE-BICO. 5. HIDROCOLÓIDES. I.  
ASCHERI, JOSÉ LUIS RAMIREZ, 26/06/1955-, orient. II.  
CARVALHO, CARLOS WANDERLEI PILER, 19/12/1967-,  
coorient. III Universidade Federal Rural do Rio de  
Janeiro. PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE  
ALIMENTOS. IV. Título.

É permitida a cópia parcial ou total da Tese, desde que seja citada a fonte

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de  
Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de  
Financiamento 001.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE  
ALIMENTOS



TERMO N° 96/2026 - PPGCTA (12.28.01.00.00.00.41)

N° do Protocolo: 23083.009150/2026-59

Seropédica-RJ, 02 de março de 2026.

**SIMONE DE SOUZA FERNANDES**

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de doutora em Ciência e Tecnologia de Alimentos, no Curso de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, área de Concentração em Ciência de Alimentos.

TESE APROVADA EM 25/02/2026

JOSÉ LUIS RAMIREZ ASCHERI, (Dr) EMBRAPA (orientador)

MARIANA TEIXEIRA DA COSTA MACHADO, (Dra) UFRRJ

MANUEL SALVADOR VICENTE PLATA OVIEDO, (Dr) UTFPR

MARILIA PENTEADO STEPHAN, (Dra) EMBRAPA

Monalisa Santana Coelho, (Dra) EMBRAPA

*(Assinado digitalmente em 02/03/2026 14:18)*  
MARIANA TEIXEIRA DA COSTA MACHADO  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
DTA (12.28.01.00.00.00.46)  
Matrícula: ###113#3

*(Assinado digitalmente em 03/03/2026 21:41)*  
MANUEL SALVADOR VICENTE PLATA OVIEDO  
ASSINANTE EXTERNO  
Passaporte: ###6919#5

*(Assinado digitalmente em 02/03/2026 14:14)*  
JOSE LUIS RAMIREZ ASCHERI  
ASSINANTE EXTERNO  
CPF: ###.###.788-##

*(Assinado digitalmente em 02/03/2026 14:12)*  
MARILIA PENTEADO STEPHAN  
ASSINANTE EXTERNO  
CPF: ###.###.137-##

*(Assinado digitalmente em 02/03/2026 14:32)*  
MONALISA SANTANA COELHO DE JESUS  
ASSINANTE EXTERNO  
CPF: ###.###.517-##

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrrj.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: 96, ano: 2026, tipo: TERMO, data de emissão: 02/03/2026 e o código de verificação: d32dd3a73a

O apoio familiar, o carinho e a confiança, somados à fé e à esperança, constituíram fundamentos essenciais ao longo de toda a trajetória acadêmica que culminou na realização deste trabalho. Diante dos inúmeros desafios enfrentados, a perseverança foi sustentada pelo apoio de pessoas fundamentais, cuja presença e incentivo foram decisivos para a continuidade e a conclusão desta pesquisa.

Dedico este trabalho ao meu orientador, Dr. José Luís Ramirez Ascheri, cuja excelência profissional sempre esteve acompanhada de notável sensibilidade. Sua bondade, paciência e resiliência manifestaram-se de forma constante ao longo de todo o percurso do doutorado, assim como seu profundo respeito e genuíno compromisso com o próximo. Seu exemplo reafirma que a verdadeira excelência acadêmica se constrói não apenas pelo conhecimento, mas pelo respeito, pela empatia e pelo amor ao próximo.

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, representado por seu coordenador, Prof. Dr. José Lucena Barbosa Junior, pela oportunidade de realização do curso de doutorado, pelo corpo docente altamente qualificado e pela estrutura acadêmica organizada, que proporcionaram um ambiente propício ao desenvolvimento científico e à formação profissional.

Ao Felipe, pelo profissionalismo demonstrado ao longo de todo o período, sempre solícito, paciente e esclarecedor nas atividades pertinentes ao Programa.

Aos colegas de turma e amigas, pela cumplicidade e amizade, com quem foram compartilhados momentos difíceis e, ao mesmo tempo, enriquecedores, promovendo crescimento pessoal e profissional.

Aos pesquisadores que participaram do estudo, auxiliando na execução das análises e na criação das condições necessárias para sua realização: Dr. José Luís Ramirez Ascheri, Dr. Carlos Wanderlei Piler de Carvalho, Dra. Marília Penteado Stephan e Dra. Jeane Santos da Rosa.

À professora Daniela de Grandi Castro Freitas de Sá, pela orientação e pelas contribuições fundamentais na condução das análises sensoriais.

À Dra. Flávia Fernandes Paulino, cuja colaboração foi determinante para a realização e a interpretação das análises de biodigestibilidade.

Às excelentes técnicas Mariana e Adriana, pelas valiosas contribuições na execução das análises de granulometria por difração a laser e de microscopia eletrônica de varredura (MEV), respectivamente, bem como pela amizade construída ao longo do curso.

Ao meu orientador, Dr. José Luís Ramirez Ascheri, pela postura humana, atenta e respeitosa, que ultrapassa o papel formal de orientador, revelando um profissional generoso, acessível e solidário, que soube orientar com firmeza, paciência e sensibilidade nos momentos mais desafiadores da trajetória acadêmica.

Por fim, agradece-se à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro concedido por meio da bolsa de estudos, essencial para o desenvolvimento desta pesquisa e para a realização do curso de doutorado.

## RESUMO

FERNANDES, Simone de Souza. **Efeito de diferentes hidrocolóides na formulação de massas alimentícias sem glúten tipo *fusilli* utilizando farinha de arroz japonês e de grão-de-bico**. 2026. 187 folhas. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos). Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2026.

A crescente demanda por alimentos isentos de glúten tem impulsionado o desenvolvimento de massas alimentícias que conciliem desempenho tecnológico, qualidade sensorial e adequado valor nutricional. Entretanto, a ausência da rede proteica do glúten impõe desafios estruturais relevantes, exigindo estratégias de formulação e processamento capazes de compensar essas limitações. Esta tese teve como objetivo desenvolver, caracterizar e otimizar massas alimentícias tipo fusilli sem glúten elaboradas com farinha de arroz japonês e farinha de grão-de-bico, cruas e pré-cozidas por extrusão termoplástica, avaliando o papel da extrusão, da adição de hidrocolóides e da incorporação de ovo em pó nas propriedades tecnológicas, físico-químicas, funcionais e sensoriais dos produtos. No Capítulo I, foi realizada uma revisão da literatura abordando os fundamentos tecnológicos e nutricionais das massas sem glúten, com ênfase no uso de farinhas extrudadas, hidrocolóides e proteínas alternativas, bem como nos efeitos do processamento sobre a estrutura do amido e das proteínas. O Capítulo II investigou o efeito da pré-cozção por extrusão da farinha de grão-de-bico em formulações de fusilli sem glúten, evidenciando melhorias na coesão da massa, na estabilidade durante o cozimento e no perfil nutricional. O Capítulo III avaliou, por meio de um delineamento fatorial completo ( $2^3$ ), os efeitos do tipo de hidrocolóide (gelana ou ágar) e da adição de ovo em pó sobre parâmetros de cozimento, textura, composição proximal, atividade antioxidante, digestibilidade proteica in vitro e aceitação sensorial. Os resultados obtidos provalvemente indicam uma associação positiva entre a combinação de farinha extrudada, gelana e ovo em pó e o desempenho tecnológico das formulações, refletida em menores perdas de sólidos, maior firmeza e maior aceitação sensorial. Dessa forma, a estratégia proposta pode ser considerada promissora para o desenvolvimento de massas tipo fusilli sem glúten, sugerindo potencial para melhoria da qualidade tecnológica e nutricional e viabilidade de aplicação industrial, condicionada a estudos adicionais.

Palavras-chave: massas sem glúten; extrusão termoplástica; arroz japonês; grão-de-bico; hidrocolóides.

## ABSTRACT

FERNANDES, Simone de Souza. **Effect of different hydrocolloids on the formulation of gluten-free fusilli pasta using Japanese rice flour and chickpea flour**. 2026. 187 folhas. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos). Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2026.

The growing demand for gluten-free foods has driven the development of pasta products that combine technological performance, sensory quality, and adequate nutritional value. However, the absence of the gluten protein network imposes significant structural challenges, requiring formulation and processing strategies capable of compensating for these limitations. This thesis aimed to develop, characterize, and optimize gluten-free fusilli pasta produced from Japanese rice flour and chickpea flour, used in raw and extrusion-pre-cooked forms, assessing the role of thermoplastic extrusion, hydrocolloid addition, and egg powder incorporation on the technological, physicochemical, functional, and sensory properties of the products. Chapter I presents a comprehensive literature review addressing the technological and nutritional fundamentals of gluten-free pasta, with emphasis on extruded flours, hydrocolloids, alternative protein sources, and the effects of processing on starch and protein structure. Chapter II investigated the impact of thermoplastic extrusion pre-cooking of chickpea flour on gluten-free fusilli formulations, demonstrating improvements in dough cohesion, cooking stability, and nutritional profile. Chapter III evaluated, using a full factorial experimental design ( $2^3$ ), the effects of hydrocolloid type (gellan or agar) and egg powder addition on cooking quality, texture, proximate composition, antioxidant activity, in vitro protein digestibility, and sensory acceptance. The results obtained probably indicate a positive association between the combination of extruded flour, gellan gum, and powdered egg and the technological performance of the formulations, as reflected by lower cooking losses, higher firmness, and greater sensory acceptance. Accordingly, the proposed strategy may be considered promising for the development of gluten-free fusilli-type pasta, suggesting potential improvements in technological and nutritional quality, as well as the feasibility of industrial application, subject to further studies.

Keywords: gluten-free pasta; thermoplastic extrusion; Japanese rice; chickpea; hydrocolloids.

## LISTA DE FIGURAS

### 2 CAPÍTULO I

|            |                                                                                                       |    |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - | Esquema de um típico sistema de extrusão.....                                                         | 16 |
| Figura 2 - | Tamanho do mercado de alimentos e bebidas sem glúten no Brasil.....                                   | 24 |
| Figura 3 - | Representação das diferentes propriedades das farinhas de arroz com alto e baixo teor de amilose..... | 35 |
| Figura 4 - | Grão-de-bico do tipo Desi e Kabuli.....                                                               | 40 |

### 3 CAPÍTULO II

|             |                                                                                                                                                                                              |    |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura S1 - | Ilustração esquemática do processo.....                                                                                                                                                      | 76 |
| Figura 1 -  | Perfis de viscosidade RVA dos ingredientes <i>in natura</i> e das misturas de alimentação para extrusão, e variação dos parâmetros de pasta.....                                             | 81 |
| Figura 2 -  | Efeito da adição de farinha de grão-de-bico, da umidade da alimentação e da temperatura do canhão sobre a energia mecânica específica e a umidade dos extrudados antes e após a secagem..... | 84 |
| Figura 3 -  | Efeito da adição de farinha de grão-de-bico, da umidade da alimentação e da temperatura do canhão sobre o índice de solubilidade em água e o índice de absorção de água.....                 | 87 |
| Figura 4 -  | Imagens digitalizadas dos extrudados secos e dos respectivos macarrões moldados por extrusão a frio.....                                                                                     | 90 |
| Figura 5 -  | Efeito da adição de farinha de grão-de-bico, da umidade de alimentação e da temperatura do canhão sobre o tempo ótimo de cozimento, o incremento de massa e a perda de sólidos solúveis..... | 93 |
| Figura 6 -  | Análise de componentes principais (ACP) e gráfico radar baseados nos parâmetros de cocção e textura dos macarrões..                                                                          | 96 |

#### 4 CAPÍTULO III

|             |                                                                                                                                                                                                                                                |     |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 1 -  | Tratamentos em base às combinações dos fatores de estudo e seus níveis.....                                                                                                                                                                    | 115 |
| Figura 2 -  | Fluxograma metodológico.....                                                                                                                                                                                                                   | 122 |
| Figura 3 -  | Sistema de Cromatografia Líquida de Ultra Eficiência.....                                                                                                                                                                                      | 123 |
| Figura 4 -  | Efeitos lineares dos fatores sobre parâmetros de cozimento e textura dos noodles cozidos.....                                                                                                                                                  | 127 |
| Gráfico 1 - | Comparação tecnológica e nutricional dos macarrões.....                                                                                                                                                                                        | 134 |
| Figura 5 -  | Perfil granulométrico por difração a laser das diferentes formulações para macarrão tipo <i>fusilli</i> .....                                                                                                                                  | 138 |
| Figura 6 -  | Integração entre granulometria, propriedades de hidratação (IAA/ISA) e textura de fusilli sem glúten.....                                                                                                                                      | 145 |
| Figura 7 -  | Perfil de identidade eletroforético (10% acrilamida) das amostras de macarrão, sem glúten, submetidas a diferentes tratamentos em relação às proporções de arroz e grão de bico, após extração de suas proteínas hidrofóbicas com álcool 70%.. | 151 |
| Figura 8 -  | Padrão de identidade da amostra de macarrão com melhores parâmetros tecnológicos obtido por HPLC.....                                                                                                                                          | 151 |
| Figura 9 -  | Microscopia eletrônica de varredura dos macarrões.....                                                                                                                                                                                         | 158 |

## LISTA DE TABELAS E QUADRO

### 2 CAPÍTULO I

|            |                                                                                                                                      |    |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - | Parâmetros físico-químicos e funcionais característicos de amidos de arroz japonês ( <i>Oryza sativa</i> ssp. <i>japonica</i> )..... | 32 |
| Tabela 2 - | Comparativo das características médias das variedades de arroz japônica versus a variedade indica.....                               | 34 |
| Tabela 3 - | Goma gelana baixo acilo (LA-GG) versus alto acilo (HA-GG).....                                                                       | 49 |
| Tabela 4 - | Parâmetros físico-químicos e informações nutricionais do ovo integral desidratado, da gema desidratada e da clara desidratada.....   | 56 |

### 3 CAPÍTULO II

|            |                                                                                                                     |    |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - | Delineamento experimental e propriedades avaliadas nos processos de extrusão-secagem e nas farinhas extrudadas..... | 75 |
| Tabela 2 - | Médias dos testes de cocção e dos parâmetros de textura dos macarrões.....                                          | 91 |

### 4 CAPÍTULO III

|            |                                                                                                                                      |     |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 - | Qualidade proteica, distribuição das classes de proteínas e composição de aminoácidos indispensáveis do arroz e do grão-de-bico..... | 106 |
| Tabela 2 - | Ingredientes para elaborar macarrão de acordo com uma formulação padrão.....                                                         | 114 |
| Tabela 3 - | Fatores de estudo e seus níveis estabelecidos para produzir macarrões.....                                                           | 115 |
| Tabela 4 - | Delineamento experimental para obter macarrão com farinha extrudada e respostas avaliadas.....                                       | 124 |
| Quadro 1 - | Efeito dominante por variável (Tabela 4 e Figura 4A–4I).....                                                                         | 130 |
| Tabela 5 - | Resultados da análise sensorial dos macarrões selecionados....                                                                       | 133 |

|             |                                                                                                                                                                                                                               |     |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 6 -  | Composição química proximal de diferentes tratamentos de macarrão com farinha extrudada.....                                                                                                                                  | 133 |
| Tabela 7 -  | Correlações entre parâmetros granulométricos e propriedades funcionais (IAA/ISA) e viscoamilográficas (RVA).....                                                                                                              | 142 |
| Tabela 8 -  | Relações entre características granulométricas e atributos de textura de macarrão tipo fusilli sem glúten.....                                                                                                                | 144 |
| Tabela 9 -  | Resultados da atividade antioxidante.....                                                                                                                                                                                     | 146 |
| Tabela 10 - | Taxa de recuperação de nitrogênio e teor de proteína estimado das amostras.....                                                                                                                                               | 148 |
| Tabela 11 - | Correlação da intensidade de coloração das bandas obtidas na eletroforese SDS-PAGE com as melhores propriedades tecnológicas em diversos tratamentos de formulação de macarrão sem glúten feito com grão de bico e arroz..... | 152 |

## SUMÁRIO

|          |                                                                                                                                   |    |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1        | INTRODUÇÃO.....                                                                                                                   | 01 |
| 2        | CAPÍTULO I – Massas Alimentícias sem Glúten Utilizando Farinha de Arroz Japonês e de Grão-de-Bico: Uma Revisão de Literatura..... | 06 |
| 2.1      | Introdução.....                                                                                                                   | 08 |
| 2.2      | Metodologia.....                                                                                                                  | 09 |
| 2.3      | Revisão Bibliográfica.....                                                                                                        | 10 |
| 2.3.1    | Massas alimentícias.....                                                                                                          | 10 |
| 2.3.1.1  | Qualidade da massa tradicional e implicações do glúten.....                                                                       | 11 |
| 2.3.1.2  | Uso de farinhas não convencionais e enriquecimento nutricional.....                                                               | 12 |
| 2.3.1.3  | Impacto tecnológico e funcional.....                                                                                              | 12 |
| 2.3.1.4  | Enriquecimento nutricional e compostos bioativos.....                                                                             | 13 |
| 2.3.1.5  | Digestibilidade do amido.....                                                                                                     | 14 |
| 2.3.1.6  | Produção por extrusão e fatores de qualidade.....                                                                                 | 14 |
| 2.3.1.7  | Alterações físico-químicas no processo de extrusão termoplástica..                                                                | 16 |
| 2.3.1.8  | Tipos de extrusoras e suas aplicações.....                                                                                        | 17 |
| 2.3.1.9  | Parâmetros de extrusão e qualidade do produto.....                                                                                | 17 |
| 2.3.1.10 | Mecanismo de texturização em alta umidade (HME).....                                                                              | 18 |
| 2.3.2    | Massas alimentícias não convencionais.....                                                                                        | 19 |
| 2.3.2.1  | Composição, qualidade e desafios tecnológicos.....                                                                                | 19 |
| 2.3.2.2  | Fortificação e inovação com fontes não convencionais.....                                                                         | 21 |
| 2.3.3    | Processo de elaboração de macarrão sem glúten.....                                                                                | 23 |
| 2.3.3.1  | Matérias-primas, propriedades funcionais e formulação.....                                                                        | 25 |
| 2.3.3.2  | Parâmetros de processo e qualidade do extrudado.....                                                                              | 26 |
| 2.3.3.3  | Propriedades tecnológicas, microestrutura e secagem.....                                                                          | 26 |
| 2.3.3.4  | Análise sensorial, microbiológica e estatística.....                                                                              | 27 |
| 2.3.4    | Arroz japonês.....                                                                                                                | 28 |
| 2.3.4.1  | Produção e consumo.....                                                                                                           | 29 |
| 2.3.4.2  | Composição química.....                                                                                                           | 30 |
| 2.3.4.3  | Propriedades físico-químicas e térmicas.....                                                                                      | 31 |

|           |                                                                                                                                  |    |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.3.4.4   | Usos culinários do arroz japonês.....                                                                                            | 36 |
| 2.3.5     | O arroz como base para massas alimentícias sem glúten por extrusão.....                                                          | 38 |
| 2.3.5     | Grão-de-bico.....                                                                                                                | 39 |
| 2.3.5.1   | Produção e consumo.....                                                                                                          | 40 |
| 2.3.5.2   | Composição química, digestibilidade e propriedades nutracêuticas.....                                                            | 40 |
| 2.3.5.3   | Funcionalidade, encapsulação e aplicações tecnológicas.....                                                                      | 41 |
| 2.3.5.4   | Sistemas de entrega de nutrientes (encapsulação e aquafaba).....                                                                 | 42 |
| 2.3.5.5   | Embalagens ativas e impressão 3D de alimentos.....                                                                               | 42 |
| 2.3.6     | Hidrocolóides.....                                                                                                               | 43 |
| 2.3.6.1   | Ação dos hidrocolóides no amido e na textura do gel.....                                                                         | 44 |
| 2.3.6.2   | Produção e consumo: reologia e aplicações em produtos de massa.....                                                              | 45 |
| 2.3.6.3   | Hidrocolóides em massas alimentícias.....                                                                                        | 45 |
| 2.3.6.4   | Novas fronteiras: alimentos ricos em proteínas e emulsões-gel.....                                                               | 46 |
| 2.3.6.5   | Composição química e funcionalidade.....                                                                                         | 46 |
| 2.3.6.5.1 | Estrutura molecular.....                                                                                                         | 47 |
| 2.3.6.5.2 | Mecanismo de gelificação e reticulação iônica.....                                                                               | 48 |
| 2.3.6.5.3 | Propriedades físico-químicas e funcionais.....                                                                                   | 48 |
| 2.3.6.5.4 | Aplicações alimentares e exemplos práticos.....                                                                                  | 50 |
| 2.3.7     | Ovo desidratado.....                                                                                                             | 52 |
| 2.3.7.1   | Produção, consumo e aplicações tecnológicas.....                                                                                 | 53 |
| 2.3.7.2   | Aplicação em massas e produtos extrusados.....                                                                                   | 53 |
| 2.3.7.4   | Mecanismo de interação e estabilidade.....                                                                                       | 55 |
| 2.3.7.5   | Modulação da retrogradação do amido e digestibilidade.....                                                                       | 55 |
|           | Referências.....                                                                                                                 | 57 |
| 3         | CAPÍTULO II – Formulação Inovadora de Massa Fusilli sem Glúten Utilizando Farinhas de Arroz Japonês e Grão-de-Bico Extrusadas... | 69 |
| 3.1       | Introdução.....                                                                                                                  | 71 |
| 3.2       | Materiais e Métodos.....                                                                                                         | 73 |
| 3.2.1     | Produção das farinhas cruas.....                                                                                                 | 73 |
| 3.2.2     | Propriedades de pasta (RVA) .....                                                                                                | 74 |

|         |                                                                                                                                                          |     |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.2.3   | Produção das farinhas extrudadas.....                                                                                                                    | 75  |
| 3.2.4   | Caracterização física nos processos de extrusão e secagem.....                                                                                           | 77  |
| 3.2.5   | Caracterização física e química das farinhas extrudadas.....                                                                                             | 77  |
| 3.2.6   | Produção dos macarrões.....                                                                                                                              | 77  |
| 3.2.7   | Testes de cocção dos macarrões.....                                                                                                                      | 78  |
| 3.2.8   | Análise do perfil de textura dos macarrões.....                                                                                                          | 79  |
| 3.2.9   | Análise estatística.....                                                                                                                                 | 79  |
| 3.3     | Resultados e Discussão.....                                                                                                                              | 80  |
| 3.3.1   | Composição centesimal das misturas.....                                                                                                                  | 80  |
| 3.3.2   | Propriedades de pasta dos ingredientes <i>in natura</i> .....                                                                                            | 80  |
| 3.3.3   | Caracterização física nos processos de extrusão e secagem.....                                                                                           | 82  |
| 3.3.4   | Caracterização física das farinhas extrudadas.....                                                                                                       | 85  |
| 3.3.5   | Composição química das farinhas extrudadas.....                                                                                                          | 87  |
| 3.3.6   | Características visuais dos extrudados e dos macarrões produzidos.....                                                                                   | 89  |
| 3.3.7   | Caracterização dos macarrões.....                                                                                                                        | 91  |
| 3.3.7.1 | Ensaio de cocção.....                                                                                                                                    | 92  |
| 3.3.7.2 | Análise do perfil de textura.....                                                                                                                        | 94  |
| 3.5     | Conclusão.....                                                                                                                                           | 96  |
|         | Referências.....                                                                                                                                         | 98  |
| 4       | CAPÍTULO III – Efeito de Hidrocolóides e Adição de Ovo nas Características Físicas e Químicas de Macarrão Tipo Fusilli Elaborados com Arroz Japonês..... | 101 |
| 4.1     | Introdução.....                                                                                                                                          | 104 |
| 4.2     | Revisão da Literatura.....                                                                                                                               | 105 |
| 4.3     | Materiais e Métodos.....                                                                                                                                 | 112 |
| 4.3.1   | Produção de farinha crua de arroz japonês para macarrão.....                                                                                             | 112 |
| 4.3.2   | Produção de farinha extrudada para macarrão.....                                                                                                         | 112 |
| 4.3.3   | Formulação de macarrões.....                                                                                                                             | 113 |
| 4.3.4   | Delineamento experimental para obtenção dos macarrões.....                                                                                               | 114 |
| 4.3.5   | Análise estatística.....                                                                                                                                 | 115 |

|           |                                                                                                                                                         |     |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.3.6     | Testes de cozimento dos macarrões.....                                                                                                                  | 116 |
| 4.3.7     | Análise de perfil de textura dos macarrões.....                                                                                                         | 117 |
| 4.3.8     | Análise sensorial dos macarrões.....                                                                                                                    | 117 |
| 4.3.9     | Caracterização físico-química dos macarrões selecionados.....                                                                                           | 118 |
| 4.3.10    | Distribuição do tamanho de partículas.....                                                                                                              | 118 |
| 4.3.11    | Atividade antioxidante.....                                                                                                                             | 118 |
| 4.3.12    | Digestibilidade <i>in vitro</i> .....                                                                                                                   | 120 |
| 4.3.13    | Eletroforese em gel de poliacrilamida.....                                                                                                              | 121 |
| 4.3.14    | Microscopia eletrônica de varredura.....                                                                                                                | 124 |
| 4.4       | Resultados.....                                                                                                                                         | 124 |
| 4.4.1     | Testes de cozimento dos macarrões.....                                                                                                                  | 124 |
| 4.4.2     | Análise de perfil de textura dos macarrões.....                                                                                                         | 128 |
| 4.4.2.1   | Discussão integrada dos efeitos dos hidrocoloides e da adição de ovo sobre as propriedades de cozimento e textura do macarrão tipo <i>fusilli</i> ..... | 129 |
| 4.4.2.1.1 | Propriedades de cozimento (Figura 4A–4D).....                                                                                                           | 129 |
| 4.4.2.1.2 | Propriedades de textura (Figura 4E–4I).....                                                                                                             | 132 |
| 4.4.3     | Análise sensorial dos macarrões selecionados.....                                                                                                       | 132 |
| 4.4.4     | Caracterização físico-química dos macarrões selecionados e dos ingredientes utilizados.....                                                             | 133 |
| 4.4.5     | Análise de granulometria.....                                                                                                                           | 135 |
| 4.4.5.1   | Correlação entre granulometria, propriedades de hidratação (IAA/ISA), RVA e textura.....                                                                | 135 |
| 4.4.5.2   | Análise da correlação entre granulometria, hidratação, RVA e textura do <i>fusilli</i> .....                                                            | 139 |
| 4.4.6     | Atividade antioxidante.....                                                                                                                             | 146 |
| 4.4.7     | Digestibilidade <i>in vitro</i> .....                                                                                                                   | 148 |
| 4.4.8     | Eletroforese em gel de poliacrilamida e cromatografia líquida em coluna de fase reversa.....                                                            | 150 |
| 4.4.9     | Microscopia eletrônica de varredura.....                                                                                                                | 156 |
| 4.5       | Conclusão.....                                                                                                                                          | 160 |
|           | Referências.....                                                                                                                                        | 163 |
|           | CONCLUSÃO GERAL.....                                                                                                                                    | 169 |

## 1 INTRODUÇÃO

As massas alimentícias são um componente central da dieta cotidiana em muitos países, valorizadas por sua versatilidade gastronômica, valor nutritivo, conveniência e economicidade (ABIMAPI, 2022). No entanto, o cenário alimentar tem se transformado, impulsionado pelo crescimento considerável do setor de alimentos sem glúten. Esse aumento na demanda está diretamente ligado ao número crescente de pessoas que sofrem de distúrbios imunomediados induzidos pelo glúten, como a doença celíaca, dermatite herpetiforme, ataxia de glúten, alergia ao trigo e sensibilidade não celíaca ao glúten (Aljada *et al.*, 2021).

No entanto, a dieta traz algumas desvantagens, como custos elevados, deficiências nutricionais e barreiras sociais e psicológicas. Em virtude disso, a indústria de alimentos tem investido em pesquisa e no desenvolvimento da formulação de massas sem glúten de melhor qualidade nutricional e características desejáveis, para atender às necessidades dos consumidores com intolerância ou sensibilidade ao glúten (Wang *et al.*, 2023).

A inclusão de hidrocolóides nas formulações de massas alimentícias sem glúten tem sido bastante explorada devido às suas propriedades funcionais, que podem melhorar a consistência, a textura, a fibra alimentar e a qualidade das massas sem glúten (Sanguinetti *et al.*, 2015).

A perda por cozimento é um dos parâmetros medidos com mais frequência, como uma estimativa da resistência da massa alimentícia sem glúten à desintegração da sua estrutura após fervura prolongada. O método de cozimento por extrusão é uma tecnologia alternativa para a fabricação de produtos sem glúten, envolvendo a unificação das etapas de pré-gelatinização e formação de redes de proteínas (Pandey, *et al.*, 2021).

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo a elaboração e caracterização de diferentes formulações de massas alimentícias, utilizando misturas de farinhas de arroz japonês e de grão-de-bico, pré-cozidas ou não e por extrusão.

Neste estudo foram utilizados os hidrocolóides ágar e gelana. Além disso, o ovo desidratado pode ser incluído como coadjuvante tecnológico para contribuir na estruturação do produto final. Seis formulações diferentes foram testadas, variando-se os hidrocolóides adicionados, presença ou ausência de ovo, farinhas pré-cozidas ou não por extrusão. Para verificar as diferenças entre as formulações, as massas

resultantes foram caracterizadas quanto a propriedades reológicas, textura, cor, tempo de cozimento, sólidos solúveis, umidade, cinzas, proteínas, lipídios e valor energético total.

Para o delineamento experimental, foi adotado um desenho inteiramente casualizado, com três repetições avaliadas em duplicata para as análises físico-químicas. Os resultados obtidos foram avaliados em relação ao efeito dos hidrocolóides utilizados e sua relação com as propriedades das massas elaboradas.

### **Justificativa**

As massas alimentícias são tipicamente produzidas a partir de uma combinação de farinha, água, sal e, em muitos casos, ovos. A farinha fornece a estrutura e a textura para a massa; a água hidrata as proteínas da farinha e ajuda a formar o glúten; o sal realça o sabor da massa, além de ajudar a fortalecer o glúten e contribuir para a textura e a elasticidade da massa; e o ovo proporciona liga, aumenta a maciez, além de conferir coagulabilidade por ação do calor, capacidade formadora de espuma, cor e aroma específicos.

Em vista da praticidade e da diversidade de formatos e combinações de molhos, os brasileiros consomem cerca de 5 kg de massa alimentícia por ano em seus lares. No entanto, quando uma pessoa com doença celíaca consome uma massa alimentícia com glúten, seu sistema imunológico reage, atacando as células do intestino delgado, levando a danos na mucosa intestinal e prejudicando a absorção de nutrientes.

A doença celíaca, também conhecida como intolerância ao glúten, é uma doença autoimune crônica que afeta o intestino delgado e é causada pelo consumo de glúten, uma proteína encontrada no trigo, cevada, centeio e produtos derivados. Os principais sintomas desta doença incluem diarreia crônica, perda de peso, fadiga, distensão abdominal, dor abdominal, náuseas e vômitos. Contudo é importante ressaltar que a doença celíaca é diferente da sensibilidade ao glúten de não celíacos, não envolvendo uma resposta imunológica, mas podendo causar sintomas semelhantes ao consumir glúten.

Desta forma, o estudo da formulação de uma massa alimentícia sem glúten, com características tecnológicas semelhantes a massa com glúten, preservando aspectos nutricionais, sensoriais, textura, promoverá a oportunidade aos

consumidores celíacos ou alérgicos ao glúten, desfrutarem de um produto que mantém características similares ao original e assim ampliar produtos disponíveis nas prateleiras de mercados.

## **Objetivos**

### **Objetivo geral**

Este estudo tem como objetivo desenvolver, otimizar e avaliar massas alimentícias sem glúten elaboradas com farinhas de arroz e de grão-de-bico, pré-cozidas por extrusão termoplástica na presença de hidrocolóides, visando à obtenção de produtos com desempenho tecnológico, nutricional, funcional e aceitação sensorial adequados.

### **Objetivos específicos**

- Determinar os parâmetros de processamento do pré-cozimento por extrusão termoplástica das farinhas de arroz e de grão-de-bico na presença de hidrocolóides;
- Avaliar o efeito da proporção entre farinhas de arroz e de grão-de-bico e do tipo de hidrocolóide sobre as propriedades tecnológicas e o potencial nutricional de massas alimentícias sem glúten;
- Determinar as propriedades tecnológicas, nutricionais e funcionais das misturas selecionadas, incluindo índice de absorção de água e índice de solubilidade em água;
- Otimizar as formulações das pré-misturas destinadas à produção de massas alimentícias sem glúten, com base em critérios tecnológicos, nutricionais e funcionais;
- Avaliar a aceitação sensorial, a preferência e a intenção de compra das massas alimentícias elaboradas com farinhas de arroz e de grão-de-bico contendo hidrocolóides.

## Estrutura da tese

Para facilitar a apresentação e publicação dos resultados obtidos de acordo com os diferentes temas abordados, a tese é dividida em capítulos, apresentados na forma de artigos.

O primeiro capítulo aborda uma revisão da literatura sobre massa alimentícia sem glúten e uso de hidrocolóides e suas propriedades de interações com a massa alimentícia, bem como o beneficiamento, os processos e os parâmetros da massa pré-cozidas ou não por extrusão. O objetivo deste estudo é obter um referencial teórico de metodologias, análises e práticas comerciais para elucidar questões envolvidas durante o desenvolvimento do produto.

O segundo capítulo investiga as características do efeito do grau de pré-cozção, por extrusão termoplástica nas variáveis de temperatura, umidades e proporção entre as farinhas de arroz japonês e grão-de-bico no uso de formulações de massa tipo *fusilli*. A finalidade deste estudo é adquirir parâmetros de caracterização de massas alimentícias pré-cozidas ou não por extrusão através de um desenho experimental considerando essas análises preliminares.

O terceiro capítulo apresenta o efeito do grau da adição de farinha pré-cozida de arroz japonês e pré-cozção ou não, no uso de formulações de massa tipo *fusilli* utilizando hidrocolóides. O objetivo deste é avaliar as propriedades físicas e químicas das massas por meio da determinação avaliação proteico-molecular e digestibilidade dos compostos formados após extrusão ou não.

## **CAPÍTULO I**

### **MASSAS ALIMENTÍCIAS SEM GLÚTEN UTILIZANDO FARINHA DE ARROZ JAPONÊS E DE GRÃO-DE-BICO: UMA REVISÃO DE LITERATURA**

## **2 CAPÍTULO I: Massas Alimentícias sem Glúten Utilizando Farinha de Arroz Japonês e de Grão-De-Bico: Uma Revisão de Literatura**

### **RESUMO**

O aumento da demanda por alimentos sem glúten, impulsionado pelo crescente número de pessoas com distúrbios relacionados ao glúten, como doença celíaca e sensibilidade não celíaca ao glúten, tem levado a um investimento significativo da indústria alimentícia em pesquisa e desenvolvimento de massas sem glúten de alta qualidade. Diante disso, o presente estudo propõe-se a investigar na literatura, evidências científicas sobre o processo de elaboração de massas alimentícias sem glúten com farinha de arroz e de grão-de-bico. O estudo compreende uma revisão de literatura. Os resultados evidenciam várias abordagens para aprimorar a qualidade nutricional, funcional e sensorial de produtos alimentícios sem glúten, envolvendo ajustes nos parâmetros de processamento, técnicas de pré-tratamento de ingredientes e avaliação sensorial. Conclui-se que a pesquisa contínua sobre alimentos sem glúten, desde a otimização dos processos de produção até o aprimoramento de ingredientes específicos, é essencial para atender às demandas dos consumidores por produtos mais saudáveis, nutritivos e acessíveis.

Palavras-chave: Massa sem glúten. Arroz japonês. Grão-de-bico. Cozimento por extrusão. Processo otimizado.

## **ABSTRACT**

Increased demand for gluten-free foods, driven by the growing number of people with gluten-related disorders such as celiac disease and non-celiac gluten sensitivity, has led to significant investment by the food industry in research and development of high-quality gluten-free pasta. In view of this, this article aims to investigate scientific evidence in the literature on the process of preparing gluten-free pasta with rice and chickpea flour. The study comprises a literature review. The study comprises a literature review. The results highlight several approaches to improve the nutritional, functional, and sensory quality of gluten-free food products, including adjustments in processing parameters, ingredient pre-treatment techniques, and sensory evaluation. It is concluded that continuous research on gluten-free foods, from the optimization of production processes to the improvement of specific ingredients, is essential to meet consumer demands for healthier, more nutritious, and more accessible products.

Key-words: Gluten-free pasta. Japanese rice. Chickpea. Extrusion-cooking. Process optimization.

## 2.1 Introdução

O setor de alimentos sem glúten tem crescido consideravelmente, uma vez que se observa um número crescente de pessoas que sofrem de distúrbios imunomediados induzidos pelo glúten, como a doença celíaca, dermatite herpetiforme, ataxia de glúten, alergia ao trigo e sensibilidade não celíaca ao glúten (Aljada *et al.*, 2021).

Atualmente, o único tratamento eficaz para prevenir esta doença é uma dieta rigorosa sem glúten para toda a vida, que envolve a eliminação de todos os alimentos que contenham glúten, entre eles, trigo, cevada e centeio. No entanto, a dieta traz algumas desvantagens, como custos elevados, deficiências nutricionais e barreiras sociais e psicológicas (Bouasla e Wójtowicz, 2021).

Em virtude disso, a indústria de alimentos tem investido em pesquisa e no desenvolvimento da formulação de massas sem glúten de melhor qualidade nutricional e características desejáveis, para atender às necessidades dos consumidores com intolerância ou sensibilidade ao glúten (Wang *et al.*, 2023).

As massas alimentícias fazem parte da dieta cotidiana de muitos países, devido a sua versatilidade gastronômica e valor nutritivo aliado à conveniência e economicidade (Romano *et al.*, 2021).

A sêmola de trigo duro é o principal substrato utilizado na fabricação de massas alimentícias. No entanto, substituir a sêmola de trigo é um desafio tecnológico, pois o glúten contribui para o desenvolvimento da massa e evita sua desintegração durante o cozimento. Entretanto, há diversos procedimentos fabris que utilizam ingredientes livres de glúten na produção de massas, bem como estudos de pesquisa que incorporaram matérias primas enriquecidas com nutrientes, tais como proteínas, vitaminas, minerais e fibras alimentares, durante o processo de produção de massas. Grande parte desses produtos sem glúten para massas são elaborados utilizando farinhas de arroz e milho (Delgado-Murillo *et al.*, 2024).

O arroz (*Oryza sativa* L.) é um cereal que pode ser utilizado no lugar do trigo no preparo de alimentos sem glúten devido às suas características de sabor suave, tonalidade clara, excelente digestibilidade e propriedades hipoalergênicas. Porém, apresenta baixo teor de proteínas, sendo necessária a adição de aminoácidos essenciais para melhorar a sua qualidade nutricional (Qin *et al.*, 2021).

As massas à base de arroz com adição de leguminosas, são ingredientes alimentares úteis para diversos usos finais devido ao seu alto valor nutritivo. O grão-de-bico é uma leguminosa com excelente fonte de proteínas, altos níveis de carboidratos complexos e ácidos graxos insaturados, amido resistente, fibra alimentar, vitaminas, minerais e compostos bioativos, como ácidos fenólicos, saponinas e flavonoides (Kore *et al.*, 2022).

Entre as tecnologias mais utilizadas para a produção de massas alimentícias está a extrusão. O cozimento por extrusão apresenta alta produtividade, favorece significativa retenção de nutrientes e possui tempo de processamento mínimo comparado ao cozimento convencional (Ascheri, 2022).

As elevadas temperaturas e tensões de cisalhamento durante a etapa de extrusão podem resultar em danos a macromoléculas como amido, proteínas, fibras alimentares, compostos fenólicos e outros compostos funcionais, impactando a qualidade da massa. Portanto, é desejável buscar condições ótimas de processamento por meio da otimização (Jalgaonkar *et al.*, 2019).

Diante do exposto, o objetivo desta revisão foi investigar na literatura, evidências científicas sobre o processo de elaboração de massas alimentícias sem glúten com farinha de arroz e de grão-de-bico.

## 2.2 Metodologia

A metodologia adotada para este estudo foi a revisão de literatura, a qual seguiu as seguintes etapas sequenciais: definição do tema e formulação da questão norteadora; estabelecimento dos critérios de inclusão e exclusão; busca e seleção rigorosa dos estudos; categorização do material selecionado; análise e interpretação crítica dos resultados; e, por fim, a síntese do conhecimento adquirido.

Para a condução dessa análise, foi realizada uma busca de materiais nas bases de dados PubMed (National Library of Medicine), SciELO (Scientific Electronic Library Online) e Google Scholar. Com o propósito de desenvolver a estratégia de pesquisa, foram selecionados os seguintes descritores em português: “*massa alimentícia sem glúten*”, “*arroz japonês*”, “*grão-de-bico*”, “*extrusão-cozimento*” e “*otimização do processo*”; e em inglês: “*gluten-free pasta*”, “*Japanese rice*”, “*chickpea*”, “*extrusion-cooking*” e “*process optimization*”, realizando-se o cruzamento dos termos por meio

do operador booleano AND. Os artigos selecionados abrangeram o período de 2000 a 2025.

Como critérios de inclusão, foram considerados o conteúdo intrínseco de cada trabalho, a análise dos títulos e resumos, o ano de publicação e o tipo de estudo. Foram incluídos artigos originais, artigos experimentais e artigos de revisão. Os estudos selecionados foram submetidos à avaliação quanto ao conteúdo apresentado e à sua pertinência direta à temática abordada. Com base nesses critérios, foram escolhidos os artigos que apresentaram informações mais relevantes para o tema, visando contribuir para a identificação e a análise dos fatores discutidos. Dessa forma, buscou-se assegurar a integridade da análise e a apresentação de informações confiáveis e pertinentes ao objeto de estudo.

## **2.3 Revisão Bibliográfica**

### **2.3.1 Massas alimentícias**

De acordo com a Resolução RDC nº 263/2005, massas alimentícias (ou macarrão) referem-se a produtos derivados de farinha de trigo (*Triticum aestivum* L. ou outras espécies do gênero *Triticum*), trigo durum (*Triticum durum* L.) ou outros cereais, leguminosas, raízes ou tubérculos, obtidos por meio do processo de empasto e amassamento mecânico, sem fermentação. Tais produtos podem ser enriquecidos com ingredientes adicionais, acompanhamentos isolados ou incorporados à massa, desde que não alterem suas características essenciais. Podem ser comercializados em estado seco, fresco, pré-cozido, instantâneo ou pronto para o consumo, apresentando uma variedade de formatos e recheios (Brasil, 2005).

A massa alimentícia é um alimento básico amplamente consumido em todo o mundo, popular entre os consumidores por sua facilidade de transporte, manuseio e cozimento, bem como por suas propriedades de armazenamento. O macarrão é uma fonte significativa de carboidratos, integrante do grupo de alimentos energéticos que compõem a base da pirâmide alimentar. Apesar de deficiente em certos nutrientes essenciais, essa lacuna pode ser suprida pela inclusão de outros ingredientes nas massas alimentícias, o que, aliado ao seu custo acessível, pode conferir-lhes um papel relevante na dieta alimentar (Estanech *et al.*, 2024).

A busca por matérias-primas alternativas ao trigo, como cereais e pseudocereais, tem sido impulsionada pela necessidade de diversificar o mercado e agregar compostos bioativos e nutrientes aos produtos, oferecendo funcionalidade e composição química diferenciadas. Azeredo (2022) ressalta que essas matérias-primas buscam alcançar os efeitos obtidos pela farinha de trigo tradicional, agregando valor nutricional.

No Brasil, o consumo médio anual é de aproximadamente 5 kg de massa alimentícia por pessoa no ambiente doméstico, impulsionado pela conveniência na preparação e diversidade de formas e combinações. Em 2021, o setor de massas alimentícias movimentou R\$ 12,6 bilhões (ABIMAPI, 2022).

### **2.3.1.1 Qualidade da massa tradicional e implicações do glúten**

A qualidade da massa alimentícia tradicional, especialmente a base de trigo durum, está intrinsecamente ligada às modificações complexas que ocorrem durante o cozimento. O aquecimento e a absorção de água induzem a gelatinização do amido, o desaparecimento parcial das zonas cristalinas da amilopectina, a lixiviação da amilose e outras substâncias solúveis na água de cozimento, e a coagulação da rede de glúten. O fator chave para a qualidade final da massa de trigo durum é o rápido enrijecimento da rede de glúten, que é capaz de aprisionar os grânulos de amido intumescidos, minimizando a perda de sólidos por cozimento e garantindo a firmeza ideal, que são os principais critérios de qualidade para a massa tradicional (Grumi *et al.*, 2021).

O glúten é um complexo de proteína-lipídio-carboidrato, sendo cerca de 75% proteínas, e é fundamental para a funcionalidade, elasticidade e resistência das massas. O glúten é importante na promoção da estrutura, elasticidade e palatabilidade da massa, e o processo de sovamento resulta no aprisionamento do gás carbônico através das redes formadas pelas proteínas gliadinas e gluteninas que interagem com a água. Por sua vez, a massa elaborada sem glúten apresenta, geralmente, qualidade inferior em comparação com a massa produzida com sêmola (Nunes, 2020).

Contudo, a predominância do trigo nas formulações de massas e seus derivados impõe um desafio crescente, relacionado a distúrbios de saúde associados ao glúten, como a doença celíaca e a sensibilidade ao glúten não-celíaca (NCGS). A

doença celíaca e a alergia ao trigo são reações de sensibilidade alimentar, cujo único tratamento eficaz é a adesão a uma dieta estritamente sem glúten (Azeredo, 2022).

A NCGS, por exemplo, representa uma nova fronteira no estudo dos distúrbios relacionados ao glúten, impulsionando a pesquisa por alternativas de cereais e pseudocereais que permitam a formulação de produtos de panificação e massas com qualidade comparável e isentos de glúten (Catassi *et al.*, 2013).

Para fins regulatórios, o *Codex Alimentarius* estabelece que produtos considerados "sem glúten" devem conter no máximo 20 mg de glúten por quilograma de alimento (20 ppm), conforme vendido ao consumidor (Nunes, 2020).

### **2.3.1.2 Uso de farinhas não-convencionais e enriquecimento nutricional**

A busca por enriquecimento nutricional e por alternativas ao glúten levou à crescente utilização de farinhas de leguminosas e outros cereais na formulação de massas alimentícias. A substituição parcial ou total do trigo por farinhas não-convencionais, como as de arroz, sorgo, milho e leguminosas (grão-de-bico, feijão, lentilha, ervilha, fava), permite o desenvolvimento de massas sem glúten (Bouasla *et al.*, 2017; Romero *et al.*, 2017; Nunes, 2020; Estanech *et al.*, 2024).

Além dos cereais (milho e arroz) e leguminosas (feijão, soja e grão-de-bico), as farinhas derivadas de pseudocereais, como a quinoa, o amaranto e o trigo sarraceno, e até mesmo de resíduos de frutas e hortaliças, são consideradas fontes valiosas para o desenvolvimento de novos produtos isentos de glúten (Azeredo, 2022).

### **2.3.1.3 Impacto tecnológico e funcional**

A adição de farinhas de leguminosas, como a farinha hidrolisada de fava (*Vicia faba*. L), por exemplo, pode impactar positivamente as propriedades funcionais das massas. O trabalho de Angeles Gremasqui *et al.* (2025) observou que a adição de 20% de farinha de fava hidrolisada diminuiu a capacidade de retenção de água, mas aumentou a capacidade de retenção de óleo, a capacidade e estabilidade de formação de espuma, além de afetar as propriedades de pasta e reológicas do composto de farinha.

Para compensar a ausência da rede de glúten, que proporciona as propriedades viscoelásticas à massa, o desenvolvimento de massas sem glúten exige

o uso de estratégias tecnológicas. Farinhas alternativas, como as de leguminosas, podem apresentar alta capacidade de retenção de água, o que afeta a qualidade do produto final. Por isso, o uso de aditivos como emulsificantes, amido pré-gelatinizado e hidrocoloides (como a goma guar) é amplamente adotado para melhorar a coesão, afetar as propriedades reológicas e garantir as condições adequadas de hidratação, viscosidade e gelatinização do amido. No estudo de Nunes (2020), a goma guar foi o emulsificante que mais contribuiu para as características tecnológicas e de qualidade da massa de arroz e feijão, como o índice de absorção, tempo ótimo de cozimento, aumento de peso, índice de solubilidade e textura.

Para massas sem glúten à base de milho e hidrocoloides, a adição desses aditivos visa melhorar a coesão da massa, afetando as propriedades reológicas para compensar a ausência da rede de glúten (Romero *et al.*, 2017). A qualidade de cozimento do macarrão de arroz também pode ser melhorada através de tratamentos térmicos da farinha, como a pré-gelatinização e a parboilização, que alteram a estrutura do amido, resultando em massas com melhor resistência e menor perda de sólidos. Adicionalmente, o uso de enzimas como a *transglutaminase* (TG) foi avaliado para massas de fava sem glúten, onde a TG demonstrou ser capaz de capturar o amido nas redes proteicas, diminuindo a adesividade da massa para níveis próximos aos da massa de sêmola (Martí *et al.*, 2013).

#### **2.3.1.4 Enriquecimento nutricional e compostos bioativos**

Além do aprimoramento tecnológico, o enriquecimento visa a melhoria do perfil nutricional e funcional. Em massas não-tradicionais, a incorporação de farinhas de leguminosas como grão-de-bico, lentilha e ervilha pode não apenas melhorar as propriedades de cozimento, mas também elevar o teor de compostos bioativos. Azeredo (2022) ressalta que as farinhas alternativas agregam nutrientes e compostos bioativos aos produtos. O processamento pode afetar significativamente esses compostos; a extrusão-cozimento, por exemplo, demonstrou reduzir o teor de ácidos fenólicos solúveis e flavonoides (-41% a -45%), mas, por outro lado, aumentou os ácidos fenólicos ligados à parede celular e a atividade antioxidante do produto (Blandino *et al.*, 2023).

A substituição da farinha de trigo por farinhas de leguminosas é uma estratégia eficaz para aumentar o teor proteico e mineral. Por exemplo, a farinha de feijão

apresenta um teor proteico três vezes maior do que a farinha de arroz. Ao elaborar massas com farinha de arroz polido e farinha de feijão fradinho, Nunes (2020) obteve produtos com um excelente perfil nutricional, destacando-se o alto teor de proteínas e minerais como ferro, zinco, fósforo e magnésio, em comparação com massas controle. Outra estratégia promissora para a fortificação nutricional de massas é a aplicação de farinhas fermentadas, que pode ser utilizada para otimizar o perfil nutricional e funcional dos alimentos (Estanech *et al.*, 2023).

#### **2.3.1.5 Digestibilidade do amido**

A incorporação de proteínas de leguminosas tem sido estudada pela sua capacidade de interferir na digestibilidade do amido. As frações de proteínas de reserva em sementes, como as do grão-de-bico, desempenham um papel crucial no retardamento da digestão do amido na massa, o que tem implicações importantes para a redução do índice glicêmico dos produtos finais (Tan *et al.*, 2022).

O uso de farinhas de leguminosas como ervilha amarela e grão-de-bico em macarrão de arroz pré-cozido e sem glúten também foi avaliado, confirmando que a inclusão dessas farinhas impacta as propriedades físicas, de textura e sensoriais do produto final (Bouasla *et al.*, 2017).

Em particular, a massa de lentilha vermelha, quando comparada à de grão-de-bico e ervilha, resultou em produtos extrusados (*snacks* e massas) com baixa perda por cozimento e alta firmeza, provavelmente indicando sua adequação para a produção de massas não-convencionais de alta qualidade (Blandino *et al.*, 2023).

A combinação de arroz polido e feijão preto (sem tegumento) para a produção de massas pré-cozidas sem glúten é uma alternativa nutricionalmente relevante, devido à complementação mútua de aminoácidos (Nunes, 2020). O desenvolvimento de massas, como o espagete de farinha de arroz e feijão fradinho testado por Nunes (2020), apresentou bom potencial nutritivo e de aceitabilidade para o consumo.

#### **2.3.1.6 Produção por extrusão e fatores de qualidade**

Massas alimentícias normalmente são elaboradas utilizando extrusoras não termoplásticas (extrusão a frio), que formatam a massa com teores de água adequados (geralmente entre 28% e 35% de umidade), e a temperaturas abaixo da

temperatura de gelatinização do amido, sem adição de calor significativo, seguida por um cuidadoso sistema de secagem e embalagem. Nestes casos, o produto final requer cozimento por cerca de 12 a 15 minutos para sua utilização (Guna *et al.*, 2023).

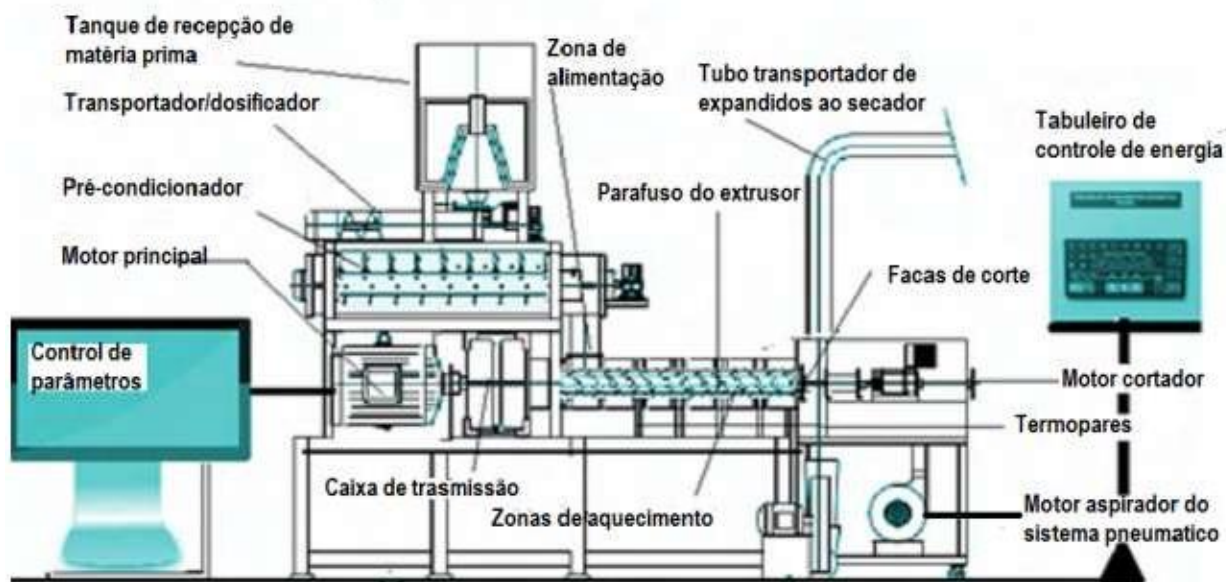
A sêmola de trigo *durum* (com alto teor de proteína e glúten) é reconhecida como a matéria-prima ideal para a produção desta massa seca convencional devido à sua capacidade de formar uma matriz proteica forte, essencial para a qualidade de cozimento (Bresciani; Pagani; Marti, 2022; Kumar *et al.*, 2021). A qualidade da massa a frio é avaliada, em grande parte, pela sua firmeza após o cozimento, a mínima perda de sólidos e a cor (Bresciani; Pagani; Marti, 2022).

Por outro lado, o procedimento de fabricação de macarrões pré-cozidos e instantâneos utiliza a extrusão termoplástica (extrusão a quente). A extrusão é uma técnica fundamental na fabricação de massas, sendo um processo tecnológico amplamente utilizado na indústria de alimentos para pré-cozinhar ou cozinhar uma variedade de matérias-primas (cereais, grãos, leguminosas, amidos). Esse processo envolve o uso de alta temperatura e curto tempo (*high temperature short time – HTST*) para processar a matéria-prima de forma contínua e simultânea (Ascheri, 2024). A extrusão a quente é caracterizada pela combinação simultânea de mistura, cisalhamento, aquecimento e conformação (Shelar e Gaikwad, 2019).

Na extrusão a quente, emprega-se calor para atingir temperaturas apropriadas no canhão, sendo o tempo de residência do material no canhão relativamente curto para evitar alterações indesejáveis, como perda de vitaminas, aminoácidos essenciais ou sabores e cores estranhos (Baah; Duodu; Emmambux, 2022; Teba, 2009). No caso das massas, mesmo na extrusão a frio, o aumento da rotação da rosca (e do cisalhamento) tem sido associado à degradação molecular do amido, resultando em menor viscosidade de pasta e afetando as propriedades de cozimento, o que evidencia o impacto da energia mecânica específica (*EME*) mesmo em temperaturas baixas (Jia *et al.*, 2023).

Na Figura 1 é apresentado um esquema que ilustra um sistema de extrusão mostrando as suas principais partes.

Figura 1 - Esquema de um típico sistema de extrusão



Fonte: Ascheri, 2022

### 2.3.1.7 Alterações físico-químicas no processo de extrusão termoplástica

Durante o processo de extrusão termoplástica, várias mudanças ocorrem na matéria-prima. O amido e as proteínas são hidratados e o material é submetido a cisalhamento, o que contribui para a gelatinização completa ou parcial do amido e a desnaturação das proteínas (Marques *et al.*, 2018). O alto cisalhamento, especialmente em extrusoras de rosca dupla, é responsável pela aplicação de EME (Energia Mecânica Específica) significativa, que pode levar à deformação e degradação estrutural dos grânulos de amido, reduzindo a cristalinidade e causando a quebra da amilopectina (Jia *et al.*, 2023).

O material também é exposto a diferentes zonas de aquecimento, onde o calor e o cisalhamento promovem alterações físicas e químicas, fundindo os componentes termoplásticos (amidos e gorduras), e resultando em transformações nas características organolépticas (Ascheri, 2022).

O processo de cozimento por extrusão é um método termomecânico que combina transferência de calor, de massa, pressão e cisalhamento para produzir uma série de efeitos benéficos, como cozimento, esterilização, texturização e retenção de nutrientes. A interação entre os nutrientes, especialmente os carboidratos e as proteínas, desempenha um papel importante no desenvolvimento da textura (Chen *et al.*, 2023).

A desnaturação proteica e a gelatinização do amido são cruciais para a expansão do produto na saída da matriz. A vaporização instantânea da água superaquecida aprisionada dentro da matriz polimérica (amido/proteína) é a força motriz da expansão (Shelar e Gaikwad, 2019). A modificação na microestrutura do amido também pode impactar a digestibilidade, com a degradação molecular resultando em um aumento da hidrólise *in vitro* (Jia *et al.*, 2023).

#### **2.3.1.8 Tipos de extrusoras e suas aplicações**

A escolha do equipamento é fundamental, e o mercado oferece dois tipos básicos de extrusoras: as de rosca dupla (*twin screw*) e as de rosca simples (*single screw*). As Extrusoras de Rosca Dupla (*Twin Screw*) caracterizam-se por seus dois parafusos que podem operar em co-rotação ou contra-rotação. Sua principal vantagem reside na elevada capacidade de mistura e bombeamento, possibilitando um controle mais preciso da EME e do tempo de residência (Shelar e Gaikwad, 2019). Sua alta flexibilidade e a capacidade de processar uma ampla gama de ingredientes e formulações mais complexas. São ideais para misturas com teores mais elevados, como gordura de até 20%, umidade de 65% e açúcares de 40% (Pandey *et al.*, 2021).

Essa versatilidade as torna adequadas para produtos de alto valor agregado, como alimentos para bebês, rações especiais e *snacks* fortificados. Por outro lado, as Extrusoras de Rosca Simples (*Single Screw*) possuem uma estrutura mais simples e são mais econômicas e fáceis de operar. No entanto, são mais adequadas para formulações ricas em carboidratos e com baixo teor de gordura. São amplamente utilizadas na produção de *snacks* que requerem uma alta flexibilidade de expansão, como flocos de milho e petiscos simples, devido ao menor cisalhamento e maior ênfase na expansão do material na saída da matriz (Pandey *et al.*, 2021). A escolha entre os tipos de extrusora é ditada pela reologia da massa e pelas características de qualidade desejadas no produto final.

#### **2.3.1.9 Parâmetros de extrusão e qualidade do produto**

A qualidade do produto extrusado é avaliada por parâmetros como a densidade e o índice de absorção de água (*IAA*) e o índice de solubilidade em água (*ISA*), que são provalmente indicadores diretos do grau de cozimento alcançado. Uma densidade

elevada, por exemplo, é um sinal de baixa expansão e uma textura compacta, o que frequentemente está associado a uma gelatinização do amido inadequada (De Souza *et al.*, 2020).

O ajuste preciso dos parâmetros de extrusão é, portanto, essencial para desenvolver produtos específicos com as características desejadas, como *snacks* e massas instantâneas (Altaf *et al.*, 2021; Bouasla e Wójtowicz, 2021).

A umidade da alimentação é um fator fundamental: um alto teor de água pode levar à formação de uma estrutura compacta, enquanto níveis de umidade mais baixos tendem a aumentar o atrito/cisalhamento, resultando em produtos de maior solubilidade e afetando diretamente a estrutura celular e a fragilidade dos alimentos expandidos (De Souza *et al.*, 2020).

Uma revisão da literatura indica que os parâmetros de extrusão, como taxa de alimentação, teor de umidade, velocidade do parafuso e temperatura do barril, juntamente com os parâmetros do sistema, a exemplo da energia mecânica específica e do tempo de residência, exercem influência direta e determinante sobre a razão de expansão, a densidade aparente, a textura e a cor do produto (Cotovanu *et al.*, 2023).

O estudo de Altaf *et al.* (2021) em *snacks* de arroz e grão-de-bico confirmou que essas variáveis impactam significativamente o índice de absorção de água, o índice de solubilidade em água, a densidade aparente e a razão de expansão.

Dessa forma, a otimização desses fatores é imperativa para controlar as características finais de qualidade do alimento. Da mesma forma, os parâmetros de extrusão-cozimento exercem influência direta nos atributos de qualidade e na microestrutura de massas instantâneas de arroz sem glúten (Bouasla e Wójtowicz, 2021).

Por fim, é relevante notar que a densidade pode ser aumentada e a expansão diminuída sob certas condições de processamento. Especificamente, a reação de *Maillard* é intensificada quando a umidade diminui e a temperatura aumenta, sendo um fator determinante que afeta diretamente a cor final do extrusado (Cotovanu *et al.*, 2023).

A variação do controle da velocidade da rosca afeta diretamente o grau de cisalhamento e, conseqüentemente, a energia mecânica específica e a degradação molecular do material (Jia *et al.*, 2023).

#### **2.3.1.10 Mecanismo de texturização em alta umidade (HME)**

Para a produção de substitutos de carne à base de plantas (*análogos de carne*) via extrusão de alta umidade (HME), o mecanismo de formação da estrutura fibrosa é de particular interesse. O estudo das interações moleculares entre a proteína de ervilha, a amilopectina e o ácido esteárico revelaram que a amilopectina e o ácido esteárico contribuem sinergicamente para melhorar as estruturas fibrosas do extrusado (como a dureza e o grau fibroso) por meio de interações intermoleculares durante o processamento no barril da extrusora (Chen *et al.*, 2023). Este mecanismo aprofunda a compreensão de como a extrusão é utilizada para conferir texturas específicas em produtos com alto teor proteico, o que é relevante para o desenvolvimento de massas ricas em proteína.

Este processo difere significativamente da extrusão a baixa umidade, pois a alta umidade (acima de 40%) favorece a formação de uma textura fibrosa e elástica pela orientação das proteínas no bico de resfriamento, sendo um fator chave para o desenvolvimento da próxima geração de massas fortificadas com alto teor proteico.

### **2.3.2 Massas alimentícias não-convencionais**

O desenvolvimento de massas alimentícias não convencionais representa uma importante vertente na indústria de alimentos, impulsionada pela busca por produtos mais nutritivos, funcionais e que atendam a restrições dietéticas, como a doença celíaca. A inovação na produção de massas é promovida pela crescente demanda dos consumidores por alimentos com perfil nutricional equilibrado e propriedades funcionais. Neste contexto, a massa pode ser considerada um veículo para a entrega de fibra alimentar, proteínas vegetais, vitaminas, minerais e compostos funcionais (Montemurro *et al.*, 2019).

Conforme estipulado pela Resolução RDC 263/2005, é permitido adicionar outros ingredientes às massas alimentícias, tanto como acompanhamentos isolados quanto misturados à massa, desde que não alterem significativamente as características do produto. No caso da substituição parcial da farinha de trigo, a massa alimentícia deve ser rotulada como 'mista', de acordo com as diretrizes estabelecidas pelo órgão regulador (Brasil, 2005).

#### **2.3.2.1 Composição, qualidade e desafios tecnológicos**

Os ingredientes comuns nas massas alimentícias sem glúten são a farinha e/ou amido de milho, arroz, batata ou outros tubérculos, com adição de proteínas, gomas e emulsificantes que podem atuar parcialmente como substitutos do glúten. Essas farinhas são comumente utilizadas devido à sua abundância, baixo custo e alta capacidade de expansão, além de serem adequadas para celíacos. Farinhas como as de trigo sarraceno (*buckwheat*) e de soja também são escolhidas como matérias-primas não convencionais. A busca pela simulação das propriedades do glúten do trigo nas formulações sem glúten passa pela identificação de agentes formadores de estrutura e plastificantes ideais. A ampla variedade de ingredientes substitutos do trigo tem sido tema central em revisões integrativas sobre massas sem glúten (Nunes, 2020).

A alta qualidade de uma massa alimentícia advém da boa resistência ao cozimento e firmeza, baixa viscosidade e liberação limitada de materiais orgânicos na água de cozimento. Em termos nutricionais, a massa é um alimento rico em carboidratos que possui um baixo Índice Glicêmico (IG) e é uma das principais fontes de Amido de Digestão Lenta (ADS) (Dodi *et al.*, 2021). Estas características de qualidade são primordiais não só para a massa alimentícia tradicional de trigo duro, mas também para as sem glúten (Grumi *et al.*, 2021).

A ausência da rede viscoelástica do glúten, somada ao aquecimento intensivo aplicado durante as etapas tecnológicas de produção, resulta em modificações importantes na organização do amido, levando à criação de uma nova estrutura formada por amido retrogradado ou parcialmente gelatinizado e retrogradado. Durante o cozimento, o amido sofre gelatinização, que é o processo de absorção de água e aumento do seu grau, tornando a massa macia e firme. A estrutura do alimento, resultante das alterações no amido e nas proteínas durante o processamento, é um fator determinante da qualidade nutricional, pois influencia o aumento da fração de ADS no produto final (Dodi *et al.*, 2021)

No entanto, quando a massa esfria, parte desse amido gelatinizado retrocede e forma a estrutura de amido retrogradado. Isso resulta em um endurecimento da massa e em uma textura menos desejável (Pandey *et al.*, 2021). A presença de maior teor de fibra alimentar em massas ricas em fibras, obtidas a partir de farinhas não convencionais, pode interferir na formação da rede de glúten e na acessibilidade dos grânulos de amido, impactando a digestibilidade.

Para mitigar a retrogradação e otimizar a qualidade, o processo de extrusão termoplástica é frequentemente empregado. Além disso, novos protocolos biotecnológicos, como a fermentação com *sourdough* (massa madre), têm sido propostos, visando aprimorar as propriedades nutricionais, funcionais e os perfis sensoriais da massa. A fermentação com *sourdough* é uma ferramenta eficaz para reduzir a digestibilidade do amido e, conseqüentemente, reduzir o Índice Glicêmico (IG) do produto (Montemurro *et al.*, 2019).

A extrusão é uma tecnologia versátil usada na indústria alimentícia para desenvolver produtos com melhores características nutricionais, funcionais e sensoriais, especialmente em produtos à base de arroz, como massas e *noodles*. Os parâmetros de extrusão, como a umidade da massa, a temperatura do cilindro e a velocidade do parafuso, afetam significativamente as propriedades físico-químicas e as características de cozimento do produto (Dalbhagat e Mishra, 2019). Outras estratégias inovadoras incluem o *debranning* (descascamento e pelagem de grãos) para obter frações de farelo selecionadas e grãos descascados.

Por exemplo, a avaliação da qualidade de macarrão sem glúten preparado com mistura de arroz integral e fubá via extrusão termoplástica demonstrou que o aumento da umidade e da temperatura de extrusão pode ter um efeito negativo sobre a viscosidade de *setback*, um indicador da tendência à retrogradação. A adição de emulsificantes, por sua vez, pode retardar o endurecimento do produto (Da Silva, Ascheri e Ascheri, 2016).

Além disso, a extrusão é uma ferramenta relevante para a fortificação de massas, como no caso dos Grãos de Arroz Fortificados (FRK), que utilizam extrusoras de rosca dupla para incorporar micronutrientes essenciais, como ferro, ácido fólico e vitamina B12 (Dalbhagat e Mishra, 2019).

### **2.3.2.2 Fortificação e inovação com fontes não-convencionais**

Alguns estudos têm sido conduzidos para investigar alimentos que possam substituir total ou parcialmente a farinha de trigo na produção de massas alimentícias, com o objetivo de desenvolver produtos alternativos, nutritivos e economicamente viáveis. A massa tradicional, feita com sêmola de trigo duro, embora seja uma boa fonte de proteína (12%-14%), é deficitária nos aminoácidos essenciais lisina e treonina. A incorporação de leguminosas à massa de trigo, além dos benefícios

tecnológicos que pode oferecer, conduz a uma melhoria na qualidade proteica, por meio da complementação recíproca de aminoácidos e do aumento do teor de proteínas totais (Estanech *et al.*, 2023). Neste sentido, a utilização de matérias-primas não convencionais, como farinhas de leguminosas (grão-de-bico, farinha de ervilha) e farinha de quinoa, tem sido empregada para aumentar o valor nutricional da massa.

Dessa forma, visando aprimorar a qualidade nutricional de massas alimentícias à base de trigo, diversos estudos têm sido conduzidos empregando leguminosas como o grão-de-bico, o feijão, a ervilha e a soja, entre outras (Garcia-Valle; Bello-Perez e Tovar, 2021).

Nesse contexto, Shiozawa *et al.* (2020) avaliaram quatro formulações de massas alimentícias frescas por meio do teste de cozimento, utilizando diferentes proporções das farinhas de feijão e de arroz em substituição à semolina de trigo *durum*. A formulação com 50% de semolina de trigo *durum* + 12,5% de farinha de arroz + 37,5% de farinha de feijão destacou-se como uma alternativa tecnologicamente promissora para massas alimentícias com maior teor de proteínas e fibras. A pesquisa com farinhas de leguminosas demonstra resultados promissores, como o caso do Grão-de-Bico (*Cicer arietinum*), que é uma rica fonte de carboidratos, proteínas e fibra dietética.

A suplementação de farinha de grão-de-bico em massas (10% a 40%) demonstrou um aumento significativo no teor de proteína (de 11,13% para 15,77%) e de fibra (de 1,97% para 3,19%). Essa fortificação também contribuiu para melhorar a textura e aumentar o teor de fenólicos totais e flavonoides, provavelmente indicando maior atividade antioxidante no produto final (Singh *et al.*, 2024).

A biodisponibilidade da proteína de grão-de-bico é reconhecidamente elevada em comparação com outras leguminosas (Kaur e Prasad, 2021), e seus peptídeos demonstraram propriedades bioativas, como atividades antioxidantes, anti-inflamatórias e anti-hipertensivas.

No entanto, o grão-de-bico contém fatores antinutricionais (FANs), e o uso de pré-tratamentos sustentáveis (físicos, térmicos e bioquímicos) tem se mostrado eficaz para reduzir estes FANs, o que melhora as propriedades funcionais de suas proteínas, como solubilidade e capacidade emulsificante, facilitando sua aplicação em novos produtos (Patil *et al.*, 2024). A fermentação com *sourdough* também tem sido aplicada com sucesso em farinhas não convencionais, incluindo leguminosas, resultando em uma diminuição significativa dos fatores antinutricionais (FANs). Essa biotecnologia,

conduzida por Bactérias do Ácido Lático (BAL), atua como um processo de pré-digestão que resulta em maior digestibilidade da fração proteica (Montemurro *et al.*, 2019).

A complementação da farinha de trigo com farinha de Feijão-Guandu (*Cajanus cajan*) nas proporções de 5, 10 e 15% para a produção de macarrão também demonstrou melhoria na qualidade proteica das misturas, conforme avaliação por ensaios biológicos. Outra investigação envolve a Proteína de Arroz, onde a substituição parcial da farinha de arroz por concentrado de proteína de arroz, uma proteína hipoalergênica, foi estudada na produção de espaguete de arroz sem glúten processado por extrusora de rosca simples. Esta substituição demonstrou a capacidade de melhorar a qualidade do cozimento, as propriedades físico-químicas e os atributos sensoriais da massa (Detchewa *et al.*, 2022).

O uso de cevada sem casca (*hullless barley*) tem despertado interesse devido ao seu bom teor de compostos fenólicos e quantidade significativa de fibra solúvel, como  $\beta$ -glucana, sendo uma alternativa para produção de alimentos processados de maior valor nutricional (Singh *et al.*, 2024). Adicionalmente, a mandioca fermentada tem sido proposta como farinha alternativa para macarrão instantâneo (Purwadi; Teguh e Mazaya, 2021).

Finalmente, em massas sem glúten, a extrusão de farinha de arroz quebrado combinada com Nopal (*Opuntia ficus-indica*) demonstrou afetar as propriedades fitoquímicas, antioxidantes e de cozimento do produto, sinalizando um caminho para o desenvolvimento de massas com funcionalidade aprimorada (Castro-Montoya *et al.*, 2024).

### **2.3.3 Processo de elaboração de macarrão sem glúten**

A relevância do macarrão sem glúten transcende a simples substituição do ingrediente, sendo impulsionada pelo aumento de diagnósticos de Doença Celíaca e, em particular, pela Sensibilidade ao Glúten Não-Celíaca.

O macarrão sem glúten tradicionalmente formulado com milho e arroz é, por vezes, caracterizado por baixa qualidade nutricional, principalmente devido ao elevado teor de amido rapidamente digerível (RDS), e propriedades tecnológicas pobres. Portanto, a incorporação de leguminosas, como grão-de-bico e lentilha, representa uma tendência importante para melhorar o perfil nutricional (proteínas e



O processo de elaboração de massas sem glúten emprega fundamentalmente a extrusão, uma tecnologia de alta temperatura e curto tempo (HTST) que permite a gelatinização controlada do amido e a texturização dos componentes proteicos, compensando a falta de estrutura do glúten (Cotovanu *et al.*, 2023; Pismag *et al.*, 2024).

### 2.3.3.1 Matérias-primas, propriedades funcionais e formulação

A escolha de matérias-primas alternativas é a etapa inicial e mais crítica no desenvolvimento de extrudados. Fontes como arroz, milho e farinhas de leguminosas (incluindo grão-de-bico, lentilha e ervilha) são amplamente utilizadas, visando o enriquecimento nutricional dos produtos (Blandino *et al.*, 2023; Tan *et al.*, 2022).

Fatores como o manejo agrônômico do grão-de-bico, onde estresses como a seca (*drought priming*) podem induzir tolerância ao frio na planta, podem ser relevantes por afetarem indiretamente a qualidade da semente para o processamento (Saini *et al.*, 2022).

Novas fontes, como a Quinoa (*Chenopodium quinoa Willd.*), são destacadas por sua completa composição nutricional e por serem uma atrativa fonte de proteínas vegetais (Itusaca-Maldonado *et al.*, 2024). Farinhas de aveia (OAF) e lentilha (LF) também são incorporadas para elevar o perfil nutricional (aumento de proteína e cinzas) e oferecer uma alternativa sustentável (Mostafa *et al.*, 2025). Além disso, a batata é incluída em algumas formulações para melhorar o valor nutricional, embora possa apresentar problemas tecnológicos como perda nutricional séria e fraco desempenho de processamento (Zhao *et al.*, 2024).

As propriedades funcionais das farinhas são determinantes para a *performance* da massa. O Comportamento Reológico e de propriedades de pasta é essencial, pois o uso de farinhas modificadas, como a farinha de fava hidrolisada, impacta as propriedades reológicas, alterando a capacidade de retenção de água e o comportamento de *pasting*. Isso ocorre devido à influência da hidrólise enzimática de proteínas na interação com a matriz de amido (Angeles Gremasqui *et al.*, 2025).

A formação da estrutura do extrudado depende da complexa rede de Interações Intermoleculares e Estrutura entre proteínas, amido e lipídios. As frações de proteína de leguminosas, como as do grão-de-bico, são notáveis pelo seu papel na digestão lenta do amido *in vitro*, conferindo um benefício funcional ao macarrão (Tan *et al.*,

2022). Além disso, em condições de extrusão de alta umidade, o amilopectina e o ácido esteárico atuam sinergicamente, sendo fundamentais para melhorar a dureza e o grau de fibrosidade dos extrudados proteicos (Chen *et al.*, 2023).

No que diz respeito à formulação, o Uso de Aditivos (Transglutaminase - TG) é essencial, especialmente em formulações sem glúten, para mimetizar a função do glúten. A TG catalisa a formação de ligações cruzadas entre proteínas, promovendo uma matriz proteica mais robusta. A otimização da concentração de TG e do tempo de amassamento (*kneading time*) melhora as propriedades reológicas da massa e, consequentemente, a qualidade textural e a redução da perda de sólidos durante o cozimento (Ramos *et al.*, 2023).

### **2.3.3.2 Parâmetros de processo e qualidade do extrudado**

A otimização dos parâmetros de extrusão é fundamental, uma vez que eles determinam a transformação física e química da matéria-prima (Pismag *et al.*, 2024).

Os parâmetros primários incluem a velocidade da rosca, a temperatura do barril e a umidade da alimentação (Altaf *et al.*, 2021; Bouasla e Wójtowicz, 2021; Cotovanu *et al.*, 2023). A manipulação dessas variáveis modula a Energia Mecânica Específica, afetando diretamente as características físicas do extrudado, como índice de absorção de água, índice de solubilidade em água, densidade aparente e relação de expansão (Altaf *et al.*, 2021). A alteração desses parâmetros pode, por exemplo, diminuir a relação de expansão e aumentar a densidade do produto (Cotovanu *et al.*, 2023).

O processo de extrusão, dependendo de suas condições, pode ter um impacto significativo nos compostos bioativos. A extrusão pode aumentar a biodisponibilidade de certos compostos e, em geral, afeta o perfil fenólico e de flavonoides, podendo reduzir alguns compostos solúveis, mas aumentando aqueles ligados à parede celular, como observado em massas com lentilha (Blandino *et al.*, 2023). Estudos específicos em macarrão de arroz quebrado e grão-de-bico confirmam que a extrusão influencia positivamente a retenção de compostos fitoquímicos (Delgado-Murillo *et al.*, 2024). Além disso, a extrusão pode reduzir fatores antinutricionais (Pismag *et al.*, 2024).

### **2.3.3.3 Propriedades tecnológicas, microestrutura e secagem**

Os indicadores mais importantes de qualidade tecnológica são a perda de sólidos durante o cozimento (*cooking loss*) e a firmeza (*hardness*) do macarrão cozido. Massas com lentilha vermelha apresentaram baixa perda por cozimento e alta firmeza (Blandino *et al.*, 2023). A otimização do amassamento e o uso de TG reduzem o *cooking loss*, melhorando a integridade estrutural após o cozimento (Ramos *et al.*, 2023).

A microestrutura (porosidade e tamanho dos poros) da massa extrudada (Bouasla e Wójtowicz, 2021) é determinante para a textura. A retrogradação do amido, que ocorre durante o resfriamento e armazenamento, é um fenômeno chave para o endurecimento e a aceitabilidade do produto. As interações proteína-amido são cruciais, pois as proteínas podem tanto inibir quanto promover a retrogradação, dependendo dos resíduos expostos, afetando assim a textura e a vida útil do produto (Scott e Awika, 2023).

A secagem é a etapa pós-extrusão mais importante para conferir a textura final e a estabilidade do produto. O emprego de condições de secagem de alta temperatura e alta umidade relativa (HTHD), por exemplo, em macarrão extrudado de trigo sarraceno, é fundamental para modular a distribuição de umidade, o grau de gelatinização e a microestrutura do amido, o que afeta diretamente a perda de sólidos e a textura após o cozimento (Meng *et al.*, 2024). O controle da cinética de secagem é essencial para evitar defeitos estruturais como fissuras.

#### **2.3.3.4 Análise sensorial, microbiológica e estatística**

A avaliação final da qualidade e aceitação de um produto extrudado é multifacetada, englobando aspectos sensoriais, de segurança e de modelagem do processo. A Análise Sensorial representa a medida final da aceitabilidade pelo consumidor. Embora a adição de farinhas de leguminosas, como parte da reformulação nutricional, possa introduzir alterações no sabor e na cor do produto, a otimização cuidadosa da formulação é capaz de manter ou até mesmo melhorar a aceitabilidade geral em comparação com massas de referência, como o macarrão de arroz puro (Bouasla e Wójtowicz, 2021).

No que diz respeito à segurança, a Análise Microbiológica é essencial para garantir a estabilidade e a validade do produto. O próprio processo de extrusão atua como um tratamento sanitizante devido às altas temperaturas e pressões (Pismag *et*

*al.*, 2024). No entanto, a segurança e o *shelf-life* subsequentes são ditados por fatores cruciais, como a composição da formulação (por exemplo, a presença de trigo sarraceno e grão-de-bico), a umidade final do produto e o rigoroso controle das condições de armazenamento e embalagem (Nayyar e Mondal, 2024).

Para validar e otimizar todo o processo, a análise estatística desempenha um papel fundamental. A metodologia de superfície de resposta (MSR), frequentemente empregada com delineamentos como o *Central Composite Rotatable Design* (CCRD), é amplamente utilizada para modelar o efeito interativo dos parâmetros operacionais de extrusão (velocidade da rosca, temperatura e umidade) (Altaf *et al.*, 2021). Além disso, a MSR é aplicada para analisar a influência de componentes da formulação, como a transglutaminase (TG) e o tempo de amassamento, sobre as respostas de qualidade (Ramos *et al.*, 2023). Essa análise estatística rigorosa permite validar a significância dos fatores de processo sobre parâmetros físico-químicos e atributos de qualidade, tais como expansão, densidade e retenção de compostos bioativos (Blandino *et al.*, 2023; Delgado-Murillo *et al.*, 2024; Ramos *et al.*, 2023).

Observou-se ainda que a farinha de lentilha (LF) contribuiu para a melhoria da cor, do sabor e da aceitabilidade global do macarrão em comparação ao macarrão elaborado exclusivamente com arroz, embora o macarrão de arroz (RF) tenha apresentado as maiores pontuações nos atributos de sabor e textura. O macarrão feito exclusivamente de farinha de aveia (OAF) recebeu as notas mais baixas para todos os atributos sensoriais, especialmente a cor (Mostafa *et al.*, 2025).

#### **2.3.4 Arroz japonês**

O arroz tem sua origem na região da Ásia, mais precisamente nos territórios da China e da Índia. O cereal é considerado um alimento fundamental em mais de 100 países, sendo regularmente consumido em quantidades significativas para atender às necessidades dietéticas, energéticas e nutricionais. No contexto brasileiro, o arroz assume a posição de destaque como o alimento mais consumido diariamente pela população (Coêlho, 2021).

O arroz glutinoso (*Oryza sativa*, L), também chamado de arroz japonês, pegajoso ou arroz ceroso, é uma planta herbácea anual de natureza semiaquática pertencente à família *Poaceae*, classificada dentro da classe *Monocotyledonae* das angiospermas. O gênero *Oryza* também abriga outra espécie domesticada, conhecida

como *Oryza glaberrima Steud.*, além de aproximadamente 20 espécies selvagens. As distintas espécies pertencentes ao gênero *Oryza* foram classificadas em três seções taxonômicas: *Oryza*, *Ridleyanae* e *Granulata*. Dentro do gênero *Oryza*, destacam-se: *Oryza sativa* e *Oryza officinalis*. Na região asiática, *O. sativa* é subdividida em três subespécies distintas, denominadas *indica*, *japonica* e *javanica*, com base em suas respectivas distribuições geográficas. O arroz é uma cultura de reprodução bissexual e autopolinizada, cujo ciclo de crescimento varia de 3 a 6 meses. A altura das plantas pode variar significativamente, de 0,4 a mais de 5 metros, especialmente no caso do arroz flutuante (Mohapatra e Sahu, 2022). O interesse em variedades de arroz não tradicionais, como os arrozes vermelhos (*Oryza glaberrima Steud.* e *Oryza sativa L.*), tem crescido no contexto nutricional, pois estas variedades são exploradas por apresentarem, geralmente, maior teor de fibras e compostos bioativos em comparação com o arroz polido.

#### **2.3.4.1 Produção e consumo**

A média global de consumo aparente é de 54kg por pessoa por ano, sendo que o Brasil se destaca com um consumo de 32 kg por pessoa por ano. O Brasil ocupa a décima posição entre os maiores produtores de arroz, não apresentando grandes excedentes exportáveis, ao contrário de outros grãos. A região Sul destaca-se como a principal área produtora, alcançando 8,93 milhões de toneladas, além de registrar a maior produtividade, atingindo 7.835 kg por hectare (Coêlho, 2021).

O arroz ocupa uma posição de destaque como o segundo cereal mais cultivado globalmente, desempenhando um papel fundamental como principal fonte alimentar para mais da metade da população mundial. No ano-safra 2022/2023, o consumo mundial de arroz atingiu aproximadamente 520,4 milhões de toneladas métricas. Em 2021, a China ascendeu como a maior produtora de arroz em casca do mundo, com uma produção estimada em cerca de 213 milhões de toneladas métricas. Na mesma época, a Índia registrou a maior área colhida de arroz, que foi 47,8 milhões de hectares enquanto a China colheu 29,5 milhões de hectares do grão. Além disso na campanha de comercialização de 2023/2024, a Índia se consolidou como maior exportador de arroz, exportando cerca de 16,5 milhões de toneladas métricas do cereal. A produção do arroz é influenciada por diversos fatores, incluindo precipitação pluvial, temperatura do ar, radiação solar e fotoperíodo, bem como por outros condicionantes edafo-

climáticos, que exercem distintos níveis de influência sobre o desempenho da cultura (USDA, 2020).

#### **2.3.4.2 Composição química**

Em aspectos nutricionais o arroz japonês, possui o amido em maior quantidade, cerca de 90%, que tem origem do endosperma. O amido é um polissacarídeo composto por duas formas poliméricas, a amilose e a amilopectina. A amilose consiste em unidades de glicose ligadas por ligações glicosídicas, resultando em uma cadeia linear, enquanto a amilopectina é constituída por unidades de glicose unidas por ligações  $\alpha$  e, formando uma estrutura ramificada. Ambas as moléculas estão organizadas em uma estrutura radialmente anisotrópica, semicristalina, dentro do grânulo de amido. O amido contendo ligações-glicosídicas é suscetível à digestão pelas enzimas amilolíticas liberadas no trato digestivo. Em condições de alta atividade da  $\alpha$ -amilase pancreática, o amido é completamente hidrolisado e absorvido no intestino delgado na forma de glicose (Okpala *et al.*, 2022).

A relação entre a quantidade de amilose e amilopectina é um fator determinação da qualidade do cozimento do arroz. Elevados teores de amilopectina aumentam a capacidade de retenção de água do grânulo de amido, resultando na redução da temperatura de gelatinização. Isso, por sua vez, faz com que os produtos cozidos se tornem mais úmidos, macios e pegajosos (Estanech *et al.*, 2024).

Embora o arroz seja uma boa fonte de vitaminas B, tiamina, riboflavina e niacina, ele contém pouca ou nenhuma vitamina C, D ou A. A moagem do arroz para produzir arroz branco remove cerca de 80% da tiamina junto com outros nutrientes do farelo, como niacina, ferro e riboflavina. A quantidade de lipídios é maior no arroz integral, que pode ser reduzido com o processo de branqueamento, comumente observam-se concentrações inferiores a 1% no arroz polido (Vicente, 2022).

O arroz japonês contém uma pequena quantidade de carboidratos livres, localizados principalmente em camadas externas do grão, podendo sua concentração ser modificada pela variedade, grau de polimento (branco, marrom, etc.) e o tipo de processamento. O arroz branco japonês, que é polido para remover as camadas externas do grão, pode ter uma concentração um pouco menor de carboidratos do que o arroz integral japonês. Os açúcares predominantes no arroz são sacarose, que apresenta em média 90%, glucose e frutose. A proteína do arroz é constituída por

diferentes frações protéicas - albumina, globulina, prolamina e glutelina, sendo esta última a fração predominante no grão, representando de 70% a 80% da proteína total. A glutelina exibe uma boa digestibilidade e baixo potencial alergênico. Após o polimento, há perdas de 29% de proteína, 79% de gordura e 67% de ferro. É relatado que quando o arroz é lavado antes de cozinhar, cerca de 2–7% de proteína, 20–41% de potássio, 22–59% de tiamina, 11–26% de riboflavina e 20–60% de niacina podem ser perdidos (Oliveira, 2016).

O arroz japonês, geralmente de grão curto a médio e com maior tendência à pegajosidade, é referência para aplicações culinárias como sushi, *onigiri* e *mochi*. Suas propriedades resultam da composição do amido (relação amilose/amilopctina), da distribuição de comprimentos de cadeias da amilopectina, do teor proteico, dos lipídios e minerais, além de fatores de cultivo e armazenamento que modulam a qualidade de cozimento e a textura. Revisões recentes e estudos experimentais detalham como essas variáveis determinam viscosidade, temperatura de gelatinização, retrogradação e digestibilidade. O teor de amilose (TA), em variedades japônicas, varia de 0–20%, abrangendo variedades glutinosas ( $\approx$ 0–2%) até normais de baixo a médio TA; semiglutinosas ficam  $\sim$ 8–14%. Em geral, possui TA mais alto que japônica (Luo *et al.*, 2021).

Quanto da arquitetura da amilopectina, nas variedades japônicas (especialmente cerosas) tendem a apresentar maior proporção de cadeias longas (fração F1), o que influencia a cristalinidade e a temperatura de gelatinização; diferenças de distribuição de cadeias entre indica e japônica impactam textura e comportamento térmico. Estrutura multi-escala e cerosa (waxy), em arrozes cerosos (amilose traço), a abundância de cadeias A curtas e a organização lamelar modulam cristalinidade, inchamento e viscosidade (Shoukat *et al.*, 2025).

#### **2.3.4.3 Propriedades físico-químicas e térmicas**

Nas Tabela 1 e 2. são apresentados de forma resumida os parâmetros físico-químicos e funcionais característicos de amidos de arroz japonês (*Oryza sativa* ssp. japônica).

Tabela 1. Parâmetros físico-químicos e funcionais característicos de amidos de arroz japonês (*Oryza sativa* ssp. japônica)

| Propriedade / Ensaio                         | Descrição / Importância                                                                                                         | Faixa típica no arroz japônica                             | Tendência em relação ao arroz indica                                           | Autor(es)                                               |
|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Índice de Absorção de Água (IAA)             | Mede a capacidade do amido de absorver água durante a gelatinização e a extrusão; indica o grau de intumescimento dos grânulos. | 5,0–6,5 g/g (baixa a média); até 7,5 g/g em amidos cerosos | Geralmente maior no japônica devido ao maior teor de amilopectina              | Luo <i>et al.</i> (2021); Iaccheri <i>et al.</i> (2023) |
| Índice de Solubilidade em Água (ISA)         | Representa a quantidade de sólidos solúveis liberados; relaciona-se com a degradação do amido e a facilidade de dispersão.      | 6–12% (dependente do processo de extrusão e moagem)        | Japônica tende a apresentar valores mais altos, devido à estrutura menos densa | Shoukat <i>et al.</i> (2025)                            |
| Viscosidade de Pico                          | Indica o ponto máximo de viscosidade durante o aquecimento; reflete a facilidade de gelatinização.                              | 2200–3600 cP                                               | Maior no japônica, associado ao menor teor de amilose                          | Pang <i>et al.</i> (2016)                               |
| Queda de Viscosidade ( <i>Breakdown</i> )    | Diferença entre a viscosidade de pico e o valor mínimo; indica estabilidade do gel ao cisalhamento e ao calor.                  | 400–800 cP                                                 | Geralmente maior no japônica (gel menos estável)                               | Luo <i>et al.</i> (2021)                                |
| Tendência à Retrogradação ( <i>Setback</i> ) | Aumento de viscosidade durante o resfriamento; indica propensão à retrogradação do amido.                                       | 300–600 cP                                                 | Menor no japônica; maior no indica devido ao maior teor de amilose             | Wonbebo <i>et al.</i> (2025)                            |

Tabela 1. Continuação.

|                                                         |                                                                                                                  |                                                |                                                                  |                                                              |
|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Temperatura de Gelatinização (início e pico)            | Temperaturas em que o amido inicia e atinge o ponto máximo de gelatinização; dependem da organização cristalina. | Início: 65–70 °C;<br>Pico: 72–77 °C            | Japônica apresenta temperaturas cerca de 8 °C menores que indica | Hirose; Takano e Terao, 2002;<br>Mazhar <i>et al.</i> (2024) |
| Entalpia de Gelatinização ( $\Delta H$ )                | Energia necessária para romper a estrutura cristalina do amido durante a gelatinização.                          | 9–12 J/g                                       | Ligeiramente menor no japônica                                   | Zhang <i>et al.</i> (2024)                                   |
| Retrogradação ( $\Delta H$ de recristalização)          | Energia associada à recristalização do amido após a gelatinização (geralmente medida após 7 dias).               | 1,0–2,5 J/g                                    | Maior no indica                                                  | Spörl; Speer e Jira, 2021                                    |
| Amido Resistente (percentual de resistência à digestão) | Fração de amido que não é digerida no intestino delgado; aumenta com maior teor de amilose e com o resfriamento. | 1–3% em amido fresco; até 8% após resfriamento | Menor no japônica                                                | Gu <i>et al.</i> (2024)                                      |

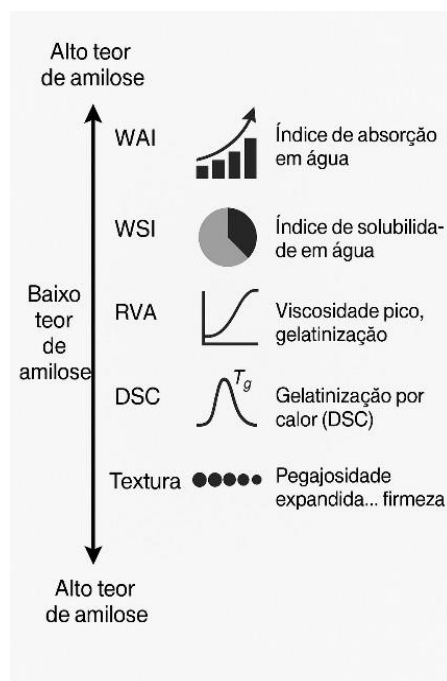
Tabela 2. Comparativo das características médias das variedades de arroz japônica vs. a variedade índica.

| Parâmetro                               | Japônica                                        | Variedade Índica                                 | Interpretação funcional                                                    |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Forma do grão                           | Curto/médio, arredondado                        | Longo e fino                                     | O japônica torna-se mais pegajoso e translúcido após o cozimento           |
| Teor de amilose (%)                     | 0–20% (média 12–15%)                            | 20–30% (média 25%)                               | Maior teor de amilose resulta em grãos mais firmes e soltos                |
| Proporção amilopectina:amilose          | Alta ( $\approx 4:1$ )                          | Moderada ( $\approx 2:1$ )                       | Determina a pegajosidade e a coesão do grão                                |
| Temperatura de gelatinização (°C)       | 65–75                                           | 73–83                                            | O japônica gelatiniza mais cedo, favorecendo maior maciez                  |
| Viscosidade RVA (pico)                  | Alta (2500–4000 cP)                             | Média (1500–2500 cP)                             | O japônica forma uma pasta mais viscosa                                    |
| Setback (retrogradação)                 | Baixo ( $\leq 600$ cP)                          | Alto ( $\geq 800$ cP)                            | Maior setback indica firmeza mais elevada após o resfriamento              |
| Cristalinidade (XRD, %)                 | 20–25% (padrão A predominante)                  | 25–30% (padrão A mais compacto)                  | Estrutura mais densa no arroz índica                                       |
| Cor e brilho após o cozimento           | Brilhante e translúcido                         | Opaco e fosco                                    | Associado à maior proporção de amilopectina curta e lipídios de superfície |
| Usos típicos                            | Sushi, onigiri, mochi, doces, snacks extrudados | Arroz de mesa, pilaf, risotos, farinhas de arroz | Demonstra diferentes aplicações culinárias                                 |
| Digestibilidade e índice glicêmico (IG) | Digestão rápida, IG mais alto                   | Digestão moderada, IG mais baixo                 | Amilose elevada aumenta o amido resistente e reduz a absorção de glicose   |
| Retrogradação e vida de prateleira      | Lenta                                           | Rápida                                           | O japônica mantém sua textura por mais tempo                               |

Fonte: Wonbebo *et al.* (2025); Xu *et al.* (2024); Zhang *et al.* (2024); Gu *et al.* (2024); Faisal *et al.* (2023); Luo *et al.* (2021); Verma e Srivastav (2020); Ali *et al.* (2016); Gani *et al.* (2013); Putseys, Lamberts e Delcour (2010); Qi *et al.* (2003).

Na figura 3, representa-se as diferentes variações referente às propriedades de alta amilose e baixo teor de amilose nas determinações físicas.

Figura 3 - Representação das diferentes propriedades das farinhas de arroz com alto e baixo teor de amilose



Fonte: Elaborada pela própria autora

A proporção entre amilose e amilopectina influencia fortemente a funcionalidade do amido, determinando diferenças na hidratação, pasta, gelatinização e comportamento textural. Como mostrado na Figura 1, amidos com baixo teor de amilose (tipos cerosos) apresentam maiores índices de absorção de água e solubilidade (IAA e ISA), viscosidade máxima durante o aquecimento (RVA) elevada e temperaturas de gelatinização mais baixas (DSC). Em contraste, amidos com maiores teores de amilose exibem maior firmeza, viscosidade de retrogradação e tendência à retrogradação, contribuindo para a formação de amido resistente e matrizes de gel mais firmes (Shoukat *et al.*, 2025).

Referente à gelatinização e características no teste de RVA, a qualidade sensorial de cozimento (ECQ) não é explicada apenas pelo TA; perfis RVA (pico, breakdown, setback) são preditivos e refletem a transição de pasta durante o cozimento. Quanto à temperatura de gelatinização (TG), variedades japônicas tendem a TG  $\approx 8$  °C menor que as variedades indicas, devido à distribuição de cadeias da amilopectina (SSIIa). Faixas típicas reportadas para grãos de arroz situam-se  $\sim 65$ – $80$  °C, variando com genótipo e histórico térmico. Referente às propriedades de retrogradação e firmeza, o teor de proteína e umidade modulam

retrogradação. Por outro lado, a adição de proteína de arroz pode retardar a retrogradação de géis de amido, com impacto em maciez e envelhecimento do arroz cozido. Os efeitos do armazenamento e temperatura de cultivo influenciam nas propriedades, sendo que o armazenamento prolongado degrada estruturas do amido e piora textura; já considerando as condições edafo-climáticas, temperaturas altas/baixas em fases críticas do cultivo alteram a cristalinidade, TG e composição (Luo *et al.*, 2021).

Quanto da relação amilose/amilopctina e funcionalidade, baixo TA (*waxy*/baixo-amilose), poderá se observar maior inchamento, viscosidade de pico elevada, pegajosidade e expansão-ideal para mochi, bolos de arroz e snacks expandidos. TA médio (8–14%), “semiglutinoso”, poderá se comportar em equilíbrio entre coesão e definição do grão, útil para sushi moderno e onigiri com boa aderência sem colapso do grão. TA mais alto ( $\approx$ 15–20% em japônica), poderão ser grãos mais firmes e menos pegajosos, maior tendência à retrogradação (*setback*), maior RS após resfriamento, aplicações em preparos que pedem grão solto ou maior estrutura (Shoukat *et al.*, 2025).

Ao se considerar os aspectos de digestibilidade e saúde, a maior proporção de amilose e o resfriamento pós-cozimento tendem a aumentar o amido resistente (RS), reduzindo o índice glicêmico; por outro lado, cerosos são mais rapidamente digeríveis. A reordenação helicoidal sob calor/armazenamento explica parte dessas diferenças (Luo *et al.*, 2021).

#### **2.3.4.4 Usos culinários do arroz japonês**

Dentre os principais usos destes tipos de arrozes, temos o sushi e onigiri, que exigem adesividade e coesão controladas; o TA e o perfil RVA, somados a lavagem/remoção de sólidos superficiais, hidratação e acidificação com vinagre, determinam textura, brilho e corte limpo. Estudos recentes com cultivares de sushi detalham preparo e comportamento reológico. Mochi entre outros utilizados em confeitaria preferem cerosos (TA  $\sim$ 0–2%) com TG e perfil de retrogradação que mantenham maciez e elasticidade. Quando utilizado na elaboração de snacks extrudados/flocos, baixo-TA favorece expansão; controle de umidade e energia específica do processo ajusta crocância e densidade.

Vale ressaltar que variações na composição do arroz são frequentemente observadas, sendo influenciadas tanto pelo genótipo quanto pelo processamento, o que afeta diretamente suas características nutricionais. Devido aos seus constituintes, o arroz apresenta um efeito positivo na prevenção de diversas doenças crônicas. A farinha de arroz é um componente atraente para o processo de extrusão devido à sua suavidade de sabor, tonalidade clara, propriedades hipoalergênicas e excelente digestibilidade. Porém, apresenta baixo teor de proteínas, sendo necessária a adição de aminoácidos essenciais para melhorar a sua qualidade nutricional (Bazanella *et al.* 2019).

Durante o processo de extrusão, o amido presente no arroz sofre gelatinização em função das elevadas temperaturas e pressões aplicadas. Esse fenômeno promove a ruptura das estruturas organizadas de amilose e amilopectina, resultando na formação de uma massa com características viscosas e gelatinosas. A gelatinização desempenha papel fundamental na expansão do produto extrudado. Além disso, o aumento da temperatura de extrusão está associado à redução do torque e da pressão ao longo do processo, independentemente do teor de amilose. Temperaturas elevadas e baixos teores de amilose resultam em uma maior expansão dos extrudados, bem como em uma diminuição de sua rigidez (Bazanella *et al.* 2019).

Montiel (2020), avaliou o efeito do tratamento térmico convencional (cozimento em água) e do processo de extrusão sobre a qualidade nutricional de arroz e feijão. Foram considerados neste estudo três subgrupos de arroz (polido, parboilizado e integral parboilizado) e dois grupos de feijão (gênero *Phaseolus* e gênero *Vigna*). Foram determinadas a composição proximal das amostras em cru, as propriedades térmicas e viscoamilográficas dos amidos. Na composição proximal, destaca-se o arroz integral parboilizado pela sua porcentagem de fibra alimentar (15%). Os teores de amido foram maiores no arroz (até 90%). Nas propriedades viscoamilográficas (RVA) o arroz polido mostrou maior pico de viscosidade e maior tendência a retrogradar, e também maior variação de entalpia durante a gelatinização. Observou-se que o arroz depois do cozimento em água, congelado-reaquecido, e extrudado apresentou amido disponível à digestão entre 80% e 100%. Apenas o arroz parboilizado apresentou 2,5% de amido resistente (RS). Nesse sentido, verifica-se que os diferentes processos de beneficiamento e de cocção podem influenciar na qualidade nutricional e na recomendação de consumo de acordo com o que o consumidor precisa.

Bouasla e Wójtowicz (2021), aplicaram o cozimento por extrusão em farinha de arroz polido para preparar macarrão sem glúten. Os resultados mostraram que a umidade afetou significativamente todos os atributos de qualidade testados da massa de arroz. Além de aumentar a umidade, aumentou o tempo de cozimento, a absorção de água, a perda por cozimento, a dureza e a pegajosidade. A massa de arroz preparada com 30% de umidade e a 80 rpm apresentou qualidade adequada, confirmada pela textura firme e baixa perda por cocção e pegajosidade. A análise da microestrutura mostrou uma estrutura interna compacta e densa da massa seca, e a superfície era lisa e uniforme quando pelo menos 30% de umidade foi aplicada na velocidade de rosca de 80 rpm durante o processamento. Estas condições permitiram a obtenção de alimentos sem glúten com cozimento adequado e características de textura, aceitável consumo de energia durante o processamento e estrutura interna compacta.

### **2.3.5 O arroz como base para massas alimentícias sem glúten por extrusão**

A farinha de arroz, especialmente a polida, é amplamente utilizada como base na formulação de massas alimentícias isentos de glúten, mas a ausência do glúten gera desafios na qualidade do cozimento e textura (Bouasla e Wójtowicz, 2021).

Para contornar a baixa qualidade nutricional e a deficiência estrutural da farinha de arroz, a extrusão termoplástica tem sido empregada com sucesso na elaboração de farinhas mistas. A estratégia de combinar a farinha de arroz com farinhas de maior valor biológico ou com compostos que conferem estrutura é um tema central nas pesquisas sobre extrusão de massas sem glúten.

A pesquisa foca na complementação nutricional com leguminosas e pseudocereais. Por exemplo, Teba (2009) utilizou a extrusão termoplástica para elaborar massas pré-cozidas à base de farinha mista de arroz polido e feijão preto sem casca, destacando que a inclusão de leguminosas é essencial para elevar o teor proteico e de aminoácidos limitantes na farinha de arroz.

O uso de outros amidos e fibras também é investigado. Silva *et al.* (2008) estudaram o efeito dos parâmetros de extrusão na produção de macarrão pré-cozido de farinha mista de arroz integral e milho. As variáveis de extrusão (umidade, temperatura e porcentagem de farinha de milho) tiveram um efeito negativo na

viscosidade máxima e final da pasta, provavelmente indicando a complexidade do controle do processo para obter um produto final resistente.

No que tange ao melhoramento tecnológico e estrutural, a pré-gelatinização da farinha de arroz é uma técnica utilizada para melhorar as propriedades de liga e coesividade. Moura (2011) utilizou farinha pré-gelatinizada de arroz (FPG) em combinação com farinha de linhaça (*Linum usitatissimum* L.) para formulações de macarrão, avaliando o impacto nas características de cozimento (tempo ótimo de cozimento, aumento de massa, perda de sólidos) e textura (firmeza, pegajosidade). Além disso, para mimetizar as propriedades do glúten na farinha de arroz, aditivos como hidrocoloides são frequentemente necessários.

Diniz *et al.* (2023) revisaram o uso de goma xantana como uma alternativa eficaz para conferir a estrutura e melhorar as características sensoriais em produtos de panificação e confeitaria isentos de glúten.

### 2.3.5 Grão-de-bico

O grão-de-bico (*Cicer arietinum*, L.) é originário de regiões da Síria e da Turquia. Embora seja considerado uma planta de clima seco e frio, se adapta bem a regiões de clima tropical (Queiroga; Girão e Albuquerque, 2021).

O grão-de-bico é uma leguminosa herbácea de ciclo anual e autógama. A polinização ocorre antes da abertura dos botões florais (*cleistogamia*), o que permite a autopolinização. O tamanho da planta normalmente alcança até 1 metro de altura, podendo ocasionalmente atingir 1,50 metros, dependendo das condições de cultivo (De Carvalho *et al.*, 2021).

Existem dois tipos fenotipicamente diferentes de grão-de-bico: o Desi e Kabuli (Figura 4).

As plantas do tipo "Desi" são pequenas, prostradas e a maioria delas contem antocianina, flores roxas e folíolos pequenos. São utilizados como cultura de subsistência nos países produtores e consumidos na forma de farinha e grãos partidos. Por outro lado, as plantas do tipo "Kabuli" são de tamanho médio, com ausência de antocianina (mancha púrpura) nas hastes, flores brancas e folíolos grandes. As sementes do tipo "Desi" possuem formato angular, com um proeminente e característico "bico" que abriga o eixo embrionário e uma superfície rugosa, variando em cores que vão do amarelo ao preto. As sementes "Kabuli" apresentam tons mais

claros, do branco ao creme, são arredondadas com um “bico” menos pronunciado e, geralmente são maiores e mais pesadas (0,2-0,6 g) (Queiroga, Girão e Albuquerque, 2021).

Figura 4 - Grão-de-bico do tipo Desi e Kabuli



Fonte: Adaptado de Gaur *et al.*, 2015

#### 2.3.5.1 Produção e consumo

Globalmente o grão é considerado a terceira leguminosa mais importante em termos de produção, com cerca de 12 milhões de hectares dedicados ao cultivo, concentrado majoritariamente na Ásia. No Brasil, o cultivo tem crescido gradualmente devido à sua adaptabilidade climática e à demanda por alimentos saudáveis e fontes alternativas de proteína (Queiroga; Girão e Albuquerque, 2021).

As características visuais distintas (Desi e Kabuli) são úteis na identificação e classificação de variedades, podendo também influenciar nas preferências dos consumidores devido às diferenças no sabor, textura e uso culinário. O tipo Desi corresponde a aproximadamente 80% da produção global, cultivado predominantemente na Etiópia e na Índia, enquanto o Kabuli corresponde aos 20% restantes, cultivado principalmente no Mediterrâneo. No Brasil, todo o grão comercializado e consumido é do tipo Kabuli (De Carvalho *et al.*, 2021).

#### 2.3.5.2 Composição química, digestibilidade e propriedades nutraceuticas

O grão-de-bico é uma excelente fonte nutricional, contendo 18% a 25% de proteínas e 41% a 51% de carboidratos, além de ácidos graxos insaturados, fibras, vitaminas (como folato e B6) e minerais (ferro, magnésio, fósforo e zinco). O grão-de-bico também se destaca pelo elevado teor de compostos fitoquímicos, incluindo carotenoides, compostos fenólicos e isoflavonas. Contudo, contém fatores antinutricionais, como fitatos e inibidores de tripsina, os quais podem interferir na absorção de minerais e na digestão de proteínas, respectivamente (Kore *et al.*, 2022). Ademais, os ácidos graxos insaturados, especialmente oleico e linoleico, presentes no grão-de-bico contribuem para o controle dos níveis de colesterol, conferindo a esse alimento relevância como fonte de proteína vegetal em dietas vegetarianas (Queiroga; Girão e Albuquerque, 2021).

O processamento da farinha de grão-de-bico exerce influência direta sobre sua microestrutura e sobre o perfil de digestão *in vitro* do amido e das proteínas, com reflexos nas respostas fisiológicas relacionadas ao apetite. Pälchen *et al.* (2022) demonstraram que a preservação da integridade da estrutura celular da farinha promove o retardo da digestão desses macronutrientes. Consequentemente, o consumo de farinhas com estrutura celular mantida está associado a maiores índices de saciedade e plenitude, bem como a menores percepções de fome, em comparação àquelas submetidas a processamentos que ocasionam a ruptura dessa estrutura.

### **2.3.5.3 Funcionalidade, encapsulação e aplicações tecnológicas**

A farinha de grão-de-bico, com seu teor proteico de 16%, 61% de carboidratos e 10% de fibras, apresenta boa afinidade com água e leite, e excelente capacidade de gelificação, o que a torna um ingrediente versátil para a indústria alimentícia. A substituição parcial da sêmola de trigo por farinha de grão-de-bico em massas alimentícias aumenta o teor de proteína e fibra alimentar, contribuindo significativamente com o amido resistente (Garcia-Valle; Bello-Perez e Tovar, 2021). Essa substituição também pode ser otimizada com outros ingredientes, como o *teff*, para melhorar as propriedades de cozimento e a firmeza da massa, mantendo a aceitabilidade sensorial (Kore *et al.*, 2022).

Uma inovação recente envolve o uso de células de grão-de-bico intactas (ICC). Xiong *et al.* (2025) demonstraram que a substituição de 30% da sêmola por ICC em massas extrusadas, mesmo sob alta tensão de cisalhamento, preserva a integridade

celular. Essa retenção microestrutural é fundamental, pois resulta na redução da digestibilidade do amido na massa, o que reforça o potencial do grão-de-bico como ingrediente para o desenvolvimento de alimentos com baixo índice glicêmico.

#### **2.3.5.4 Sistemas de entrega de nutrientes (encapsulação e aquafaba)**

A proteína do grão-de-bico tem se mostrado uma matriz biológica eficaz para a proteção e entrega controlada de compostos bioativos, sendo central em novos sistemas de *delivery* de nutrientes. Uma dessas aplicações é a Microencapsulação, onde a proteína isolada de grão-de-bico pode ser utilizada para encapsular vitaminas, como o folato (vitamina B9), um processo que aumenta tanto a potência nutricional quanto a estabilidade térmica do composto. Adicionalmente, em matrizes poliméricas com alginato, a proteína de grão-de-bico demonstrou eficácia na encapsulação de curcumina, melhorando sua estabilidade, promovendo a liberação sustentada e aumentando a bioacessibilidade *in vitro*. Outra área promissora envolve a aquafaba e Emulsões de *Pickering*. A aquafaba (AF), líquido de cozimento do grão-de-bico, tem sido estudado como um estabilizante de emulsões de alto desempenho. Sahin *et al.* (2024) demonstraram que a AF de grão-de-bico Kabuli, que é naturalmente rica em proteínas e nanopartículas auto-organizadas, é capaz de formar e estabilizar emulsões de *Pickering* de *oleorresina* de pimenta-chili. Neste sistema, as nanopartículas e as proteínas presentes na aquafaba atuam como agentes de revestimento natural, conferindo alta estabilidade à emulsão.

#### **2.3.5.5 Embalagens ativas e impressão 3D de alimentos**

O grão-de-bico também se estabelece como um insumo promissor para tecnologias emergentes, notavelmente a embalagem ativa e a impressão 3D de alimentos. No campo da impressão 3D de alimentos (3DFP), a extrusão pode ser utilizada para gerar materiais a partir da farinha de grão-de-bico com alto potencial de imprimibilidade. Rodríguez-Fernández *et al.* (2025) investigaram a viabilidade de formulações de farinha de grão-de-bico enriquecidas com óleo rico em ômega-3, destacando as vantagens funcionais e nutricionais desses materiais para a tecnologia de impressão.

Em relação às Embalagens Ativas e Inteligentes, as proteínas do grão-de-bico são utilizadas no desenvolvimento de filmes avançados. Primeiramente, Filmes Bioativos foram desenvolvidos a partir de farinha de grão-de-bico e quitosana, utilizando ácido cítrico como reticulador e curcumina como agente ativo, demonstrando potencial para o armazenamento de produtos como peito de frango. O aumento da concentração de ácido cítrico melhorou a resistência do filme à permeabilidade ao vapor de água (Yildiz *et al.*, 2022).

Em um segundo estudo, Kavur e Yemenicioğlu (2024) produziram filmes compósitos com eugenol utilizando quitosana e proteínas de grão-de-bico de superfície ativa, assistidos por ultrassom. Esses filmes apresentaram uma retenção de eugenol (óleo essencial) 1,2 a 1,4 vezes superior em comparação com filmes preparados apenas por homogeneização mecânica, resultando em maior liberação sustentada do composto.

### **2.3.6 Hidrocolóides**

O hidrocolóide é um grupo heterogêneo de polissacarídeos e proteínas, obtidos de fontes naturais (plantas, animais, algas e, em alguns casos, de microrganismos) ou sintéticos. Estes polímeros são frequentemente chamados de "gomas". São caracterizados por formar dispersões viscosas e/ou géis quando dispersos em água devido à presença de um grande número de grupos hidroxila, o que aumenta acentuadamente sua afinidade para ligar moléculas de água, conferindo-lhes um caráter hidrofílico (Asadzadeh; Pirsá, 2022).

Devido às suas excelentes propriedades hidrofílicas e de multidispersão, esses compostos são amplamente empregados como aditivos alimentares para modificar a reologia, a estabilidade e a estrutura dos produtos. O uso das gomas se baseia primariamente no aproveitamento de suas propriedades funcionais, relacionadas à capacidade de prevenir ou retardar uma série de fenômenos físicos. Eles atuam fundamentalmente como estabilizantes, emulsificantes e espessantes na indústria de alimentos. Embora não contribuam diretamente para o aroma ou sabor, são essenciais para a aceitabilidade, melhorando a textura e consistência dos produtos. Propriedades adicionais apreciadas, como a ação coagulante, lubrificante e formadora de filmes, são notáveis mesmo em baixas concentrações. Hidrocolóides, como o ágar, alginato, carrageninas, gelana, goma xantana (XG) e goma guar (GG), possuem propriedades

espessantes, gelificantes, emulsionantes e estabilizantes (Asadzadeh e Pirsá, 2022). Outros hidrocolóides como a Goma Curdlana, de origem microbiana, são indispensáveis por contribuírem para o espessamento, gelificação, estabilização, suspensão e formação de filme, atuando também como agentes auxiliares de processamento.

#### **2.3.6.1 Ação dos hidrocolóides no amido e na textura do gel**

Os hidrocolóides são amplamente utilizados na tecnologia de alimentos para a melhoria da textura, o retardamento da retrogradação do amido e o aumento da retenção de umidade, contribuindo para a melhoria da qualidade geral dos produtos alimentícios. O principal efeito dos hidrocolóides é o atraso da retrogradação da amilose, um fenômeno que leva ao endurecimento do produto final e à perda de água do sistema. Isso ocorre pela formação de complexos entre os hidrocolóides e as cadeias da amilose. A retrogradação deve ser minimizada, pois reconstrói uma estrutura mais rígida devido ao rearranjo das cadeias de amilose durante o *shelf-life* do produto. A incorporação de hidrocolóides em soluções de amido modifica as propriedades reológicas e causa aumento da viscosidade, sendo utilizados para conferir estabilidade a produtos como pudins e sobremesas (Asadzadeh e Pirsá, 2022).

Em relação à influência na textura do gel de amido de milho (amilose), a goma xantana (GX), um polissacarídeo extracelular produzido pela bactéria *Xanthomonas campestris*, em estudos com gel de amido de milho de alto teor de amilose, apresentou os menores valores de força do gel de amilose após 24 horas de armazenamento com a aplicação de 0,7-1,0%. Após 120 horas de armazenamento, o uso de 0,5-1,0% de goma xantana minimizou a força do gel. Esse efeito é positivo, pois a diminuição da força do gel provavelmente indica uma redução da retrogradação, que interfere negativamente na qualidade de produtos espessados com amido que necessitam de refrigeração. Já a goma guar (GG), uma galactomanana que forma dispersões coloidais quando hidratada em água fria, não apresentou influência positiva na redução da força do gel no período inicial (24h). No entanto, após 120 horas de armazenamento, a força do gel foi minimizada com a adição de 0-0,15% de goma guar em combinação com goma xantana. O aumento da concentração de goma guar, independente da goma xantana, aumentou a força do gel (Diniz *et al.*, 2023).

### 2.3.6.2 Produção e consumo: reologia e aplicações em produtos de massa

A principal motivação para o uso de hidrocolóides em alimentos é a sua capacidade de modificar a reologia do sistema, como a viscosidade. Isso afeta criticamente a solubilidade, o comportamento de fusão, a emulsificação, a formação de creme, a transferência de calor e o valor nutricional.

### 2.3.6.3 Hidrocolóides em massas alimentícias

Na fabricação de massas, especialmente as isentas de glúten (GF), os hidrocolóides são vitais como agentes ligantes para compensar a ausência da rede proteica do glúten, mimetizando algumas propriedades reológicas do glúten e formando uma pseudo-rede que melhora as propriedades da massa e a qualidade de cozimento (Culetu *et al.*, 2021). A inclusão desses aditivos aprimora a qualidade de massas GF, conferindo-lhes maior firmeza, reduzindo o excesso de cozimento, a aderência e a perda de volume. Eles formam géis estáveis que melhoram a firmeza e a experiência sensorial das massas (Asadzadeh e Pirsa, 2022). O seu papel também foi estudado na estrutura, cozimento e propriedades nutricionais de massas frescas de ovo enriquecidas com fibra, à base de farinha de noz-tigre e sêmola de trigo duro (Martín-Esparza *et al.*, 2021).

Estudos específicos demonstram o impacto desses polímeros, como a goma xantana (XG) e a goma guar (GG): a adição de XG e GG, em concentrações como 1,5% e 2,5%, melhora significativamente a textura e a estabilidade de massas frescas recheadas GF, mantendo a qualidade após a pasteurização e durante o armazenamento refrigerado. A XG, em particular, é uma das principais alternativas para fornecer a estrutura ausente em produtos GF (Diniz *et al.*, 2023).

A diversidade de hidrocolóides também é relevante; em espaguete GF à base de farinha de milho e aveia, a goma gelana (GG), a carboximetilcelulose (CMC), a pectina, o ágar, a goma guar e a quitosana demonstraram efeitos variados. A goma gelana e o ágar resultaram nas menores perdas de sólidos durante o cozimento, o que é um indicador fundamental da qualidade da massa, sugerindo uma melhor integridade estrutural. Os hidrocolóides são também importantes para o Controle da sinérese e viscosidade. Embora todos aumentem a viscosidade, apenas um conjunto reduzido pode originar géis. Para mitigar a sinérese (desidratação), um fenômeno

adverso na estrutura do gel, os hidrocolóides gelificantes são empregados em conjunto com gomas estabilizantes (Krempel; Griffin e Khouryieh, 2019; Zhang *et al.* 2021). Gomas como a guar e a goma alfarroba (*Locust Bean Gum* - LBG) são importantes por fornecerem soluções altamente viscosas em baixas concentrações e por serem capazes de reduzir a sinérese de produtos lácteos e correlatos.

O uso de hidrocolóides em massas está intrinsecamente ligado ao processo de extrusão termoplástica, que utiliza calor, umidade e pressão, afetando a viscosidade e o Índice de Absorção de Água em massas pré-cozidas. O tratamento térmico, como a pré-gelatinização e o *parboiling* no arroz, é uma alternativa para melhorar a qualidade de cozimento das massas GF mesmo sem a adição de aditivos, mas a combinação com hidrocolóides é geralmente necessária para atingir a qualidade ideal (Zhang *et al.* 2021).

#### **2.3.6.4 Novas fronteiras: alimentos ricos em proteínas e emulsões-gel**

A associação de hidrocolóides com outros biopolímeros, como proteínas (incluindo caseína e gelatina), é uma estratégia chave e amplamente explorada para melhorar a funcionalidade, a reologia e a estabilidade de sistemas alimentícios. Essa sinergia entre diferentes macromoléculas é particularmente relevante na criação de Alimentos Proteicos de Próxima Geração (NPFs – *Next Generation Protein Foods*). Um exemplo disso é o estudo de hidrogéis compósitos formados pela combinação de proteína de batata (PP) e goma gelana (GG). Esses hidrogéis estão sendo investigados com o objetivo de otimizar a textura e controlar a separação de fases, fatores essenciais para o desenvolvimento de NPFs com atributos texturais aprimorados. A combinação da proteína de batata com goma gelana de alto acilo (HA-GG) ou baixo acilo (LA-GG) resulta em microestruturas e texturas de gel heterogêneas, que são cruciais para mimetizar com sucesso a textura de produtos de origem animal (Li *et al.*, 2024). Além disso, o foco em NPFs sustentáveis tem levado à investigação de híbridos de micélio e goma gelana (GG) para a fabricação desses produtos (Jayakumar *et al.*, 2025).

#### **2.3.6.5 Composição química e funcionalidade**

O ágar-ágar (código CE E406) é um hidrocolóide gelificante e estabilizante, atóxico e não-absorvível, composto por agarose e agarpectina, extraído de algas. É reversível, isto é, (alterna entre gel e sólido por adição ou remoção de calor e amplamente utilizado em produtos lácteos, doces e panificação devido ao seu baixo custo e alta resistência. Ressalta-se que a qualidade e as características do ágar podem variar, podendo ser necessária a adição de dextrose para facilitar a dissolução (Pirsa e Hafezi, 2023).

A goma gelana, um polissacarídeo microbiano da *Sphingomonas elodea*, é notável por suas formas baixo acilo (LA-GG), que forma géis rígidos, e alto acilo (HA-GG), que confere textura mais macia. Seu código CE é E418. Sua gelificação é termicamente reversível e altamente influenciada pela reticulação iônica mediada por cátions divalentes ou trivalentes. Entre suas propriedades destacadas estão a boa resistência ao calor e a excelente capacidade de liberação de sabor. Além disso, a goma gelana é particularmente útil para a produção de "géis fluidos". Em estudos com espaguete sem glúten, a utilização de goma gelana na concentração de 2% resultou nas menores perdas de sólidos durante o cozimento, provavelmente indicando uma superior integridade estrutural. Apesar de suas vantagens, a GG pura apresenta baixa resistência mecânica e baixa estabilidade em condições fisiológicas, o que justifica sua associação com outros biopolímeros, como o alginato, para otimizar suas propriedades (Gomes *et al.* 2023).

#### 2.3.6.5.1 Estrutura molecular

Quimicamente, a gelana é um polímero linear aniônico de alto peso molecular. Segundo a avaliação da European Food Safety Authority (EFSA), a unidade repetitiva é um tetrasacarídeo composto por dois resíduos de D-glicose, um de D-ácido glucurônico e um de L-ramnose, ligados respectivamente por ligações  $\beta$ -D-Glcp (1 $\rightarrow$ 4)- $\beta$ -D-GlcpA (1 $\rightarrow$ 4)- $\beta$ -D-Glcp (1 $\rightarrow$ 4)- $\alpha$ -L-Rha (1 $\rightarrow$ 3) (EFSA, 2017).

Além disso, a molécula pode estar substituída por grupos acila (glicerato e acetato) ligados por esterificação O-glicosídica em certas unidades repetitivas (Rodríguez-Hernández *et al.*, 2003).

Essa substituição acila é o que distingue os dois principais tipos comerciais: baixo acilo (LA-GG) e alto acilo (HA-GG). Quanto aos tipos, há os de baixo acilo (LA-GG) vs alto acilo (HA-GG) que se caracteriza-se por grau de acilação reduzido ou

praticamente eliminado (tipicamente  $\leq 50\%$  acilado ou  $< 1\%$  em peso acila) conforme a EFSA. Esses géis tendem a formar redes iónicas mais densas, com forte reticulação via cátions divalentes (especialmente  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) e apresentam gel firme, rígido, transparente, pouco elástico. HA-GG (high acyl gellan gum), possui grau de acilação mais elevado (tipicamente  $> 50\%$  ou  $> 7.35 \text{ wt\%}$  acila) segundo EFSA (EFSA, 2017).

A presença dos grupos acila causa maior impedimento estérico, menor densidade de reticulação iónica, resultando em géis mais elásticos, suaves, com maior capacidade de deformação e textura mais “macia” ou “gel-mousse”. Em linhas gerais, a diferenciação entre LA-GG e HA-GG fica assim: LA-GG  $\rightarrow$  gel firme, pouco elástico, “brittle” em algumas aplicações. HA-GG produz gel macio, elástico, mais deformável. Essa distinção permite ao formulador ajustar a textura final em sistemas alimentares com base no tipo de gelana escolhido ou em mistura dos dois tipos (Mikusheva *et al.*, 2025).

#### **2.3.6.5.2 Mecanismo de gelificação e reticulação iónica**

A gelana hidrata-se melhor a temperaturas elevadas, forma hélices por resfriamento e a gelificação é induzida ou fortemente modulada pela presença de cátions (particularmente  $\text{Ca}^{2+}$  e outros divalentes) que promovem a agregação de cadeias helicoidais formando uma rede de gel (Morris; Nishinari e Rinaudo, 2012).

No tipo LA-GG, a presença de cátions é crítica: a adição de  $\text{Ca}^{2+}$  eleva a temperatura de gelificação, aumenta a força do gel e diminui sua deformabilidade. No tipo HA-GG, pela presença dos grupos acila, a rede é mais frouxa, menos dependente de cátions para formar textura elástica, embora cátions ainda contribuam. Além disso, a gelificação pode ocorrer em temperaturas mais elevadas e a rede resultante pode ser termicamente reversível (gel  $\rightarrow$  líquido  $\rightarrow$  gel) com menos reticulação pesada (Bradbeer *et al.*, 2014).

A termoversibilidade (ou seja, descongelamento/reaquecimento) é uma característica importante: a gelana é capaz de géis termicamente reversíveis, o que a diferencia de muitos géis “irreversíveis” (Mao *et al.*, 2000).

#### **2.3.6.5.3 Propriedades físico-químicas e funcionais**

Na tabela 3 a seguir são apresentadas as propriedades físicas das gomas de baixo e alto acilo.

Tabela 3. Goma gelana baixo acilo (LA-GG) vs. alto acilo (HA-GG)

| Parâmetro                                                                     | LA-GG (Baixo Acilo)                                                                               | HA-GG (Alto Acilo)                                                                                        | Condições / Observações                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Concentração mínima para formar gel                                           | 0,05–0,15% p/p (gel reportado a 0,05% em sistemas iônicos; géis coesos geralmente $\geq 0,15\%$ ) | $\geq 0,1$ –0,3% p/p para formar géis macios/viscoelásticos                                               | O limiar reduz com íons ( $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^{+}/\text{Na}^{+}$ ) e maior teor de sólidos |
| Temperatura de gelificação ( $T_g$ / transição espiral $\rightarrow$ hélice)  | $\sim 39$ – $43$ °C (ex.: 0,3% LA + 0,1 M NaCl; medido por reologia e observação visual)          | $\sim 70$ – $84$ °C (misturas/géis ricos em HA iniciam gelificação em temperaturas bem maiores)           | HA e misturas gelam em temperaturas mais altas; monovalentes aumentam $T_g$                     |
| Módulo / Força de compressão (no ponto de falha)                              | $\sim 61$ kPa (gel 1% LA com $\text{Ca}^{2+}$ na concentração ótima)                              | Menor que LA isolado; porém mistura 50:50 LA:HA (1%) pode atingir $\sim 63,5$ kPa e maior deformabilidade | $\text{Ca}^{2+}$ ótimo $\sim 30$ mM para força máxima; rigidez máxima em $\sim 9$ – $12$ mM     |
| Módulo de Young (rigidez inicial)                                             | $\sim 6$ – $24$ kPa (misturas 50:50 em 0,5–1,5%; pico com $\text{Ca}^{2+}$ $\sim 9$ – $12$ mM)    | Menor que LA na mesma concentração; aumenta ao misturar com LA                                            | Valores aumentam com % de polímero e até o ponto ótimo de $\text{Ca}^{2+}$                      |
| Sensibilidade ao $\text{Ca}^{2+}$ (ponto ótimo de reticulação)                | Ótimo típico $\sim 30$ mM (máxima força de falha)                                                 | Semelhante em misturas; HA puro requer concentrações e temperaturas maiores                               | Após o ponto ótimo, a força diminui devido ao “excesso de sal”                                  |
| Deformabilidade (strain no ponto de falha)                                    | $\sim 0,38$ (1% LA, $\text{Ca}^{2+}$ ótimo)                                                       | 0,6–1,5 (misturas ricas em HA; 1% total; 2–30 mM $\text{Ca}^{2+}$ )                                       | HA e misturas reduzem a fragilidade do gel (menos “brittle”)                                    |
| Gelificação na presença de íons monovalentes ( $\text{Na}^{+}/\text{K}^{+}$ ) | Sim; ex.: 0,3% LA + 0,1 M NaCl $\rightarrow T_g \sim 39$ °C                                       | HA também gela, porém a rede é mais elástica e macia                                                      | Monovalentes elevam $T_g$ ; cinética depende da massa molar                                     |
| Sinérese / Capacidade de retenção de água (WHC)                               | Maior tendência à sinérese; WHC menor que em misturas                                             | Menor sinérese; WHC maior em HA e misturas com mais HA                                                    | Resultados obtidos por microcentrifugação; HA mostra WHC superior                               |
| Retenção / liberação de sabor                                                 | Libera mais sabor (rede rígida e mais frágil)                                                     | Boa retenção de sabor em géis macios; liberação moderada                                                  | LA tende a liberar sabor mais facilmente; HA confere maciez                                     |
| Faixa prática de uso em alimentos                                             | 0,05–0,5% p/p (géis firmes, bebidas clarificadas com suspensão “fluid gel”)                       | 0,1–0,75% p/p (géis macios, suspensões estáveis, bebidas/geleias elásticas)                               | Ajustar concentração conforme o objetivo (gel firme vs. elástico) e íons                        |

Fonte: Mikusheva *et al.* (2025); Bradbeer *et al.* (2014); Morris; Nishinari e Rinaudo (2012); Rodríguez-Hernández *et al.* (2003); Mao *et al.* (2000).

Algumas das principais propriedades da comumente usadas em formulações alimentares incluem, com quantidades típicas, estão abaixo de 0,1-0,5% para

formação de gel em muitas aplicações. Transparência e aparência, a gelana forma géis muito claros/translúcidos, especialmente a LA-GG, favorecendo aplicações visuais. Quanto à estabilidade térmica e de pH, os géis de gelana resistem bem ao calor e variabilidade de pH (até ~pH 3-5, algumas formulações mais amplas) (Bradbeer *et al.*, 2014).

Uma importante característica refere-se à liberação de sabor pela rede formada permitindo boa difusão de moléculas de sabor e de aroma (especialmente em géis mais frouxos ou macios). A capacidade de suspensão (“fluid gels”) em versões agitadas ou parcialmente reticuladas, a gelana pode formar géis fluidos capazes de suspender partículas e manter fluxo sob stress, importante para sobremesas, bebidas ou produtos com componentes de textura (ex: “fluid gels”) (Mikusheva *et al.*, 2025).

A propriedade e/ou capacidade de combinação com outros hidrocolóides a gelana pura (especialmente HA-GG) pode ter baixa resistência mecânica ou baixa estabilidade sob condições fisiológicas ou de processamento, justificando a associação com outros biopolímeros como alginato, carragenina, goma xantana etc. Um recente trabalho (Yan *et al.*, 2023) aborda os sistemas mistos gelana-outros polímeros.

#### **2.3.6.5.4 Aplicações alimentares e exemplos práticos**

A gelana é utilizada em confeitaria, sobremesas, doces, geleias, aspics, aplicações de gels de frutas, bebidas com partículas suspensas, snacks extrudados com géis de superfície, e também em formulações de alimentos sem glúten para dar estrutura e manutenção da textura.

Por exemplo, em espaguete sem glúten, 2% de gelana (provavelmente LA-GG ou blend) resultou nas menores perdas de sólidos durante o cozimento, provavelmente indicando melhor integridade estrutural (Padalino *et al.*, 2013).

Versões “fluid gel” de gelana são usadas para texturas inovadoras: géis que fluem sob aplicação de stress mas mantêm suspensão sob gravidade, interessantes para molhos, bebidas premium ou sobremesas.

Em bebidas ácidas ou com partículas suspensas, HA-GG é vantajosa pela sua textura macia, elasticidade e estabilidade de mistura com sais.

Evidentemente, existem limitações e estratégias de melhoria (associação com

outros biopolímeros), apesar das vantagens, a gelana tem algumas limitações, especialmente quando usada isoladamente, tais como, a resistência mecânica limitada em algumas condições de carga ou deformação, especialmente para HA-GG ou para géis muito diluídos. Estabilidade reduzida em certas condições fisiológicas (temperatura corporal, presença de sais fisiológicos, digestão) ou em formulações que exigem elasticidade elevada ou umidade elevada. Dependência de cátions e condições térmicas/humidificação para gelificação eficaz, o que pode complicar formulação em sistemas complexos. Dessa forma, associar a gelana com outros biopolímeros (como alginato, carragenina, goma xantana, etc.) tem sido uma estratégia frequente: os sistemas mistos permitem ajustar rigidez, elasticidade, sinergia de géis, liberação de sabor, e estabilidade ao processamento e/ou armazenamento. Recentemente, por exemplo, o trabalho de Yan *et al.* (2023) apontou que “gellan-polysaccharide” systems favorecem modulação de textura, condução de bioativos, filmes comestíveis e alimentos funcionais.

Além disso, estudos de blends de LA-GG + HA-GG mostraram que a combinação permite obter texturas intermediárias, ajustáveis e com comportamento de gel mais favorável para impressão 3D e formulações avançadas (Li *et al.*, 2024).

Para áreas de pesquisa (produtos plant-based, extrusados, alimentos sem glúten, alto-teor de fibras ou proteínas), algumas considerações práticas ao usar gelana seriam, selecionar o tipo, isto é, ao precisar de gel firme e rígido (ex: snack extrudado expansível, fixação de forma de massa de macarrão sem glúten após cozimento), a LA-GG será a escolha mais indicada; caso precisar de gel suave/elástico (ex: substitutos de carne, texturas mastigáveis, gelatina vegetal refinada), então HA-GG ou blends são mais adequados (Jayakumar *et al.*, 2025).

Atentar à presença de cátions: formulações com proteína vegetal, minerais, ou adição de Ca/Mg devem considerar como esses impactam a gelificação da gelana (definir dosagem de cátions e condições térmicas).

Nas condições de extrusão ou de alta temperatura/umidade, a gelana suporta relativamente bem calor e pH, mas a força do gel resultante pode variar bastante com concentração, presença de outros componentes (proteína, fibras, lipídios) e pós-processamento (cozimento, resfriamento, secagem) (Gomes *et al.* 2023).

Em produtos extrudados ou de alta umidade, avaliar a integridade estrutural (coesão) após tratamento térmico/água de cozimento, neste caso a gelana pode ajudar a reduzir a perda de sólidos no caso da aplicação em formulações de

espaguete sem glúten. Na combinação com outros polímeros, poderá otimizar textura, reduzir custo ou modular comportamento, a gelana pode ser combinada com alginato, xantana, ou amido modificado, devendo-se estudar sinergias, interações iônicas e compatibilidade (Gomes *et al.* 2023).

Dentre alguns ensaios de controle, temos a medição da firmeza, elasticidade (ex: ensaio de compressão), fluxo ou deformação (no caso de géis elásticos), estabilidade ao calor/resfriamento, sinérese, liberação de sabor/aroma e microestrutura (microscopia, DSC para gelificação, etc). Documentar a “grau de acilação” se possível (fornecido por fabricante) para prever comportamento gel-versus elástico; e considerar a concentração típica (muitas aplicações funcionam em 0,1–0,5 %, mas pode variar conforme formulação) (Jayakumar *et al.*, 2025).

Em consequência, a goma gelana (E 418) emerge como um polímero funcional extremamente versátil para a indústria de alimentos, em especial em contextos de alimentos sem glúten, texturas avançadas e produtos plant-based. A distinção entre suas formas baixo acilo (LA-GG) e alto acilo (HA-GG) permite ao formulador escolher ou combinar géis com texturas firmes ou elásticas, adaptando-se às exigências de processamento e sensoriais. A goma gelana apresenta um conjunto relevante de vantagens tecnológicas, destacando-se pela elevada eficiência de uso, alta transparência, adequadas propriedades de suspensão, liberação moderada de sabor e boa estabilidade frente a variações de temperatura e pH. Entretanto, sua aplicação pode ser limitada em determinados contextos, especialmente em função de resistência mecânica insuficiente ou da necessidade de ajustes estruturais por meio da associação com outros polímeros. Nesse sentido, a continuidade das pesquisas voltadas a sistemas mistos e ao aprimoramento de formulações, incluindo a compatibilização com proteínas, fibras e minerais, revela-se essencial para ampliar e consolidar o potencial de aplicação desse biopolímero. Recentes revisões destacam que o futuro da gelana envolve não só alimentos, mas também filmes comestíveis, bioimpressão e produtos funcionais multifuncionais (Li *et al.*, 2024).

### **2.3.7 Ovo desidratado**

Os ovos de galinha são apreciados mundialmente como alimentos baratos, nutritivos e tecnologicamente versáteis. O aumento constante na produção, que se

aproxima de 80 milhões de toneladas por ano, e uma média global *per capita* calculada de aproximadamente 161 ovos demonstram a sua crescente procura. O consumo varia muito regionalmente, oscilando entre 300 g *per capita* anuais em vários países africanos e 19,1 kg no Japão (Pirkwieser *et al.*, 2022).

#### **2.3.7.1 Produção, consumo e aplicações tecnológicas**

Os ovos de galinha são apreciados mundialmente como alimentos baratos, nutritivos e tecnologicamente versáteis, com o consumo global per capita se aproximando de 161 ovos, mas variando amplamente (Pirkwieser *et al.*, 2022).

O processo de desidratação para a produção de ovo em pó, eleva a vida de prateleira, facilita o transporte e simplifica a estocagem do produto. A produção segue etapas bem definidas, que incluem a quebra do ovo, seguida de filtração, pasteurização, desidratação, embalagem e estocagem. Quando o objetivo é desidratar partes específicas do ovo, como a gema ou a clara, é necessária uma etapa de separação imediatamente após a quebra (Oma; Dos Santos e Madrona, 2021).

A secagem por atomização (*spray drying*) é o método de desidratação predominante na indústria. Nesse processo, a temperatura de secagem é um parâmetro crítico a ser controlado. Grassi e Ponsano (2015) avaliaram o efeito de diferentes temperaturas (90, 120 e 150 °C) na desidratação da gema e concluíram que, embora a temperatura influencie a umidade final do produto, ela não interferiu significativamente nos teores centesimais ou no grau de rancidez da gema em pó. Após a produção, o produto final exige estocagem específica: um ambiente escuro e seco, com umidade relativa igual ou menor a 75% e temperatura entre 8 a 22 °C (Oma; Dos Santos e Madrona, 2021).

O amplo uso do ovo em pó na indústria alimentícia é impulsionado, principalmente, pelo seu poderoso poder emulsificante, conferido pela lecitina, além das claras vantagens logísticas. O ovo em pó é extremamente eficiente em termos de rendimento: a equivalência do ovo desidratado reconstituído é de 250 gramas de ovo em pó para 750 mililitros de água, o que representa o equivalente a 20 ovos inteiros (Oma; Dos Santos e Madrona, 2021).

#### **2.3.7.2 Aplicação em massas e produtos extrusados**

Na produção de massas alimentícias, o ovo desidratado apresenta resultados de qualidade e características sensoriais semelhantes ao ovo em casca (Oma; Dos Santos e Madrona, 2021), sendo a gema em pó tradicionalmente utilizada na produção de macarrão (Huang e Ahn, 2019).

O ovo em pó atua como um componente funcional essencial na EC (Pismag *et al.*, 2024; Cotovanu *et al.*, 2023). A adição de ovo em pó influencia a microestrutura, resultando em uma estrutura interna mais homogênea e compacta no macarrão pré-cozido. O controle de parâmetros como velocidade do parafuso, temperatura do cilindro e umidade é vital, afetando índices como absorção e solubilidade em água e textura (Altaf *et al.*, 2021).

Em macarrão de sêmola, o aumento da proporção de ovo em pó leva a uma redução na Absorção de Água e Estabilidade da massa (farinógrafo), mas aumenta a Perda de Sólidos de Cozimento (*Cooking Loss*) e a Pegajosidade (*Stickiness*) do produto cozido. Essa alteração é acompanhada por uma redução na dureza e elasticidade (*springiness*), sugerindo que o ovo em pó pode fragilizar a rede do glúten em altas concentrações, sendo a aceitabilidade sensorial otimizada em concentrações específicas (Girma *et al.*, 2019).

No crescente mercado SG (Mordor Intelligence, 2024; Catassi *et al.*, 2013), as proteínas do ovo desidratado são cruciais para compensar a ausência da rede de glúten. Em formulações de massas SG à base de amido de mandioca (*cassava starch*), o ovo em pó é utilizado como reforço nutricional, sendo uma estratégia viável para combater a desnutrição proteica em populações vulneráveis (Oke *et al.*, 2024).  
Composição química e funcionalidade na matriz alimentícia

Os ovos são ricos em vitaminas, minerais e proteínas de excelente valor biológico (Maia *et al.*, 2021; Pirkwieser *et al.*, 2022). O ovo em pó aumenta significativamente o teor de proteína, gordura e cinzas, reduzindo a proporção de carboidratos e fibras no produto final (Girma *et al.*, 2019).

Além dos macronutrientes, a incorporação de ovo em pó melhora notavelmente o teor de minerais como Ferro (Fe), Cálcio (Ca) e Zinco (Zn) na massa (Girma *et al.*, 2019), e fornece compostos bioativos, como a colina e a luteína (Oke *et al.*, 2024).

A gema é valorizada por suas excelentes propriedades de coagulação/gelificação e emulsificação, sendo usada para emulsificar, colorir, dar sabor e suplementar nutricionalmente diversos produtos (Huang e Ahn, 2019).

### 2.3.7.3 Mecanismo de interação e estabilidade

A funcionalidade é determinada pela formação de complexos ternários amido-lipídio-proteína, fundamentais para a textura, vida de prateleira e digestibilidade (Wang *et al.*, 2020). O processamento térmico, como na Extrusão com Alta Umidade (HME), intensifica estas interações, onde amido (amilopectina) e lipídio (ácido esteárico) agem sinergicamente com a proteína para melhorar a dureza (*hardness*) do extrudado (Chen *et al.*, 2023).

O equilíbrio proteico é delicado. Em massas com glúten (como *noodles* de ovo), a substituição parcial da farinha de trigo (diluindo a rede de glúten) por outras farinhas ricas em fibra, mesmo mantendo o ovo, pode levar à redução da força tênsil e ao aumento da dureza, da gomosidade (*gumminess*) e da mastigabilidade (*chewiness*) do produto cozido (Lerdluksamee *et al.*, 2025).

### 2.3.7.4 Modulação da retrogradação do amido e digestibilidade

As proteínas do ovo são essenciais na modulação da retrogradação do amido, um processo que afeta negativamente a textura. Por outro lado, Scott e Awika (2023) detalham que a proteína pode inibir ou promover a retrogradação, dependendo das interações entre seus resíduos (carregados ou hidrofóbicos) e o amido, afetando a mobilidade da água.

Na nutrição, Tan *et al.* (2022) demonstraram o papel de frações proteicas no retardo da digestão do amido em sementes de grão-de-bico. Os complexos ternários amido-lipídio-proteína oferecem maior resistência à digestão enzimática *in vitro* do que os complexos amido-lipídio, atribuída à sua maior ordem estrutural e ao impedimento estérico (*steric hindrance*) (Wang *et al.*, 2020).

Apesar da desidratação causar perdas de nutrientes, como as notáveis no ácido linoleico e linolênico, o ovo em pó seco por pulverização ainda é uma fonte valiosa, fornecendo 100% da dose recomendada de vitamina E contribuições significativas para retinol, selênio e zinco (Pirkwieser *et al.*, 2022).

Na Tabela 4 a seguir são descritos os parâmetros físico-químicos e as informações nutricionais do ovo integral desidratado, da gema desidratada e da clara desidratada.

Tabela 4. Parâmetros físico-químicos e informações nutricionais do ovo integral desidratado, da gema desidratada e da clara desidratada.

| Ingrediente              | Parâmetros Físico-químicos | Informação Nutricional (por 100g) |
|--------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
|                          | pH                         | Umidade                           |
| Ovo integral desidratado | 7,5 a 9,5                  | 2 a 5%                            |
| Gema desidratada         | 6,0 a 7,0                  | 2 a 5%                            |
| Clara desidratada        | 6,0 e 8,0                  | 5 e 8%                            |

Fonte: Adaptado de Cunha *et al.* (2012).

## REFERÊNCIAS

ABIMAPI. **Anuário 2022**. São Paulo: ITAL: BB Editora: Abimapi, 2022. Disponível em: <https://abimapi.com.br/publicacao/anuario-abimapi-2022/>.

ALI, Abida et al. Comparative study of the physico-chemical properties of rice and corn starches grown in Indian temperate climate. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 15, n. 1, p. 75-82, 2016.

ALJADA, B.; ZOHNI, A.; EL-MATARY, W. The Gluten-Free Diet for Celiac Disease and Beyond. *Nutrients* 2021, 13, 3993. **Recent Advances and Remaining Challenges**, p. 265, 2021.

ALTAF, Uzma et al. Investigation on mild extrusion cooking for development of snacks using rice and chickpea flour blends. **Journal of Food Science and Technology**, v. 58, n. 3, p. 1143-1155, 2021.

ANGELES GREMASQUI, Ileana de los et al. Effect of the addition of hydrolyzed broad bean flour (*Vicia faba*. L) on the functional, pasting and rheological properties of a wheat-broad bean flour paste. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 19, n. 2, p. 1362-1372, 2025.

ASADZADEH, Farrokh; PIRSA, Sajad. Zein/EDTA/chlorophyll/nano-clay biocomposite sorbent: Investigation physicochemical properties sorbent and its ability to remove contaminants of industrial wastewater. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 30, n. 5, p. 2109-2127, 2022.

ASCHERI, J. L. R. **Perguntas e respostas sobre extrusão termoplástica de alimentos: uma abordagem simplificada**. Ponta Grossa: Atena Editora, 2022.

ASCHERI, J. L. R. Why Food Technology by Extrusion-Cooking? **Discoveries in Agriculture and Food Sciences**, v. 12, n. 4, p. 110–144, 2024. DOI: 10.14738/tnc.124.17453.

AZEREDO, Bruna Melo et al. **Impacto da substituição da farinha de trigo (*Triticum spp.*) nas propriedades tecnológicas e sensoriais nos produtos de panificação e massas alimentícias**. 62 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Alimentos) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2022.

BAAH, Rose Otema; DUODU, Kwaku Gyebi; EMMAMBUX, Mohammad Naushad. Cooking quality, nutritional and antioxidant properties of gluten-free maize–Orange-fleshed sweet potato pasta produced by extrusion. **LWT**, v. 162, p. 113415, 2022.

BAZANELLA, N. M. **Elaboração de massas alimentícias a base de farinha de arroz e fécula de mandioca com adição de farinha de ervilha**. 2019. 33 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal do Pampa, Itaqui, 2019.

BLANDINO, Massimo et al. Pulse type and extrusion conditions affect phenolic profile and physical properties of extruded products. **Food Chemistry**, v. 403, p. 134369, 2023.

BOUASLA, Abdallah; WÓJTOWICZ, Agnieszka. Gluten-free rice instant pasta: Effect of extrusion-cooking parameters on selected quality attributes and microstructure. **Processes**, v. 9, n. 4, p. 693, 2021.

BOUASLA, Abdallah; WÓJTOWICZ, Agnieszka; ZIDOUNE, Mohammed Nasereddine. Gluten-free precooked rice pasta enriched with legumes flours: Physical properties, texture, sensory attributes and microstructure. **Lwt**, v. 75, p. 569-577, 2017.

BRADBEER, Jennifer F. et al. Self-structuring foods based on acid-sensitive low and high acyl mixed gellan systems to impact on satiety. **Food hydrocolloids**, v. 35, p. 522-530, 2014.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Resolução RDC nº 263, de 22 de setembro de 2005**. Aprova o Regulamento Técnico para Produtos de Cereais, Amidos, Farinhas e Farelos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 23 set. 2005. Disponível em: [https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2005/rdc0263\\_22\\_09\\_2005.html](https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2005/rdc0263_22_09_2005.html). Acesso em: 24 fev. 2024.

BRESCIANI, Andrea; PAGANI, Maria Ambrogina; MARTI, Alessandra. Pasta-making process: A narrative review on the relation between process variables and pasta quality. **Foods**, v. 11, n. 3, p. 256, 2022.

CASTRO-MONTOYA, Y. A. et al. Effect of the extrusion process on phytochemical, antioxidant, and cooking properties of gluten-free pasta made from broken rice and nopal. **Revista Mexicana de Ingeniería Química**, v. 23, n. 1, 2024 Alim24149. DOI: <https://doi.org/10.24275/rmiq/Alim24149>.

CATASSI, Carlo et al. Non-celiac gluten sensitivity: the new frontier of gluten related disorders. **Nutrients**, v. 5, n. 10, p. 3839-3853, 2013.

CHEN, Qionglings et al. Mechanism of high-moisture extruded protein fibrous structure formation based on the interactions among pea protein, amylopectin, and stearic acid. **Food Hydrocolloids**, v. 136, p. 108254, 2023.

COELHO, Jackson Dantas. Feijão: Produção e Mercados: v. 6 n. 197 (2021). **Caderno Setorial ETENE**, v. 6, 2021.

COTOVANU, Ionica et al. Effect of extrusion parameters on the extruded products features. **International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM**, v. 23, n. 6.2, p. 133-140, 2023.

CULETU, Alina et al. The role of hydrocolloids in gluten-free bread and pasta; rheology, characteristics, staling and glycemic index. **Foods**, v. 10, n. 12, p. 3121, 2021.

CUNHA, Fernanda Lima et al. Processamento, pasteurização, desidratação e outros processos similares de conservação de ovos de consumo. **Pubvet**, v. 6, p. Art. 1450-1454, 2012.

DA CUNHA ESTANECH, Amanda Fulgoni et al. Desafios e estratégias da aplicação de farinhas fermentadas na fortificação de massas alimentícias: Uma revisão. **Observatório de la Economía Latinoamericana**, v. 21, n. 7, p. 6386-6401, 2023.

DA CUNHA ESTANECH, Amanda Fulgoni et al. Otimização da formulação de massas alimentícias elaboradas com farinhas de grão-de-bico e de feijão-caupi fermentados utilizando delineamento de mistura. **Observatório de la Economía Latinoamericana**, v. 22, n. 1, p. 2605-2623, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.55905/oelv22n1-135>.

DA SILVA, Erika Madeira Moreira; ASCHERI, José Luis Ramírez; ASCHERI, Diego Palmiro Ramírez. Quality assessment of gluten-free pasta prepared with a brown rice and corn meal blend via thermoplastic extrusion. **LWT-Food Science and Technology**, v. 68, p. 698-706, 2016.

DALBHAGAT, Chandrakant Genu; MAHATO, Dipendra Kumar; MISHRA, Hari Niwas. Effect of extrusion processing on physicochemical, functional and nutritional characteristics of rice and rice-based products: A review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 85, p. 226-240, 2019.

DETCHEWA, Pakkawat et al. Substitution of rice flour with rice protein improved quality of gluten-free rice spaghetti processed using single screw extrusion. **Lwt**, v. 153, p. 112512, 2022.

DE CARVALHO, S. I. C. et al. **Fenologia do grão-de-bico tipo Kabuli**. Brasília, DF, 2021. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/231333/1/COT-133-final1.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2024.

DELGADO-MURILLO, Samuel Arturo et al. Effect of the extrusion process on the physicochemical, phytochemical, and cooking properties of gluten-free pasta made from broken rice and chickpea flours. **Biotechnia**, v. 26, 2024.

DE SOUZA, Valéria França et al. Efeito da granulometria na expansão de extrusados de cascas e albedo de maracujá (*Passiflora edulis flavicarpa* Degener) e arroz (*Oryza sativa* L.). **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 43214-43228, 2020.

DINIZ, Rebecca Cardillo et al. Um estudo sobre diferentes farinhas sem glúten e possíveis aplicações. **Revista Científica SENAI-SP-Educação, Tecnologia e Inovação| SENAI-SP Scientific Journal-Education, Technology and Innovation**, v. 2, n. 1, p. 121-136, 2023.

DODI, Rossella et al. Traditional and non-conventional pasta-making processes: Effect on in vitro starch digestibility. **Foods**, v. 10, n. 5, p. 921, 2021.

EFSA PANEL ON FOOD CONTACT MATERIALS, ENZYMES, FLAVOURINGS AND PROCESSING AIDS (CEF) et al. Safety assessment of the process '4 PET', based on EREMA Basic technology, used to recycle post-consumer PET into food contact materials. **EFSA Journal**, v. 15, n. 6, p. e04845, 2017. DOI: 10.2903/j.efsa.2017.4844.

FAISAL, Shah et al. Molecular Profiling of Pakistani Selected Advance Lines of Rice for Amylose Content. **Advancements in Life Sciences**, v. 9, n. 4, p. 560-566, 2023.

GANI, Adil et al. Characterization of rice starches extracted from Indian cultivars. **Food science and technology international**, v. 19, n. 2, p. 143-152, 2013.

GARCIA-VALLE, Daniel E.; BELLO-PEREZ, Luis A.; TOVAR, Juscelino. Addition of chickpea markedly increases the indigestible carbohydrate content in semolina pasta as eaten. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 101, n. 7, p. 2869-2876, 2021.

GAUR, Rashmi et al. High density linkage mapping of genomic and transcriptomic SNPs for synteny analysis and anchoring the genome sequence of chickpea. **Scientific reports**, v. 5, n. 1, p. 13387, 2015.

GIRMA, A.; BULTOSA, G.; ABERA, S. Effects of blending semolina with egg powder on physico-chemical and sensory quality of macaroni. **J Food Sci Nutr The**, v. 5, n. 1, p. 001-006, 2019.

GOMES, D. et al. Progress and opportunities in Gellan gum-based materials: A review of preparation, characterization and emerging applications. **Carbohydrate Polymers**, v. 311, p. 120782, 2023.

GRASSI, Thiago Luís Magnani; PONSANO, Elisa Helena Giglio. Desidratação de gemas de ovos por secagem por atomização em diferentes temperaturas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, p. 1186-1191, 2015.

GRUMI, Mattia et al. Ultrastructure of pasta from gluten-free grains: a brief overview. **Microscopie**, v. 32, n. 1, 2021.

GU, Xue et al. Structural and physicochemical properties of rice starch from a variety with high resistant starch and low amylose content. **Frontiers in Nutrition**, v. 11, p. 1413923, 2024.

GUNA, Vijaykumar et al. Sustainable bioproducts through thermoplastic processing of wheat gluten and its blends. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, v. 36, n. 4, p. 1775-1806, 2023.

HIROSE, Tatsuro; TAKANO, Makoto; TERAOKA, Tomio. Cell wall invertase in developing rice caryopsis: molecular cloning of OsCIN1 and analysis of its expression in relation to its role in grain filling. **Plant and Cell Physiology**, v. 43, n. 4, p. 452-459, 2002.

HUANG, Huihua et al. Frontier in gellan gum-based microcapsules obtained by emulsification: Core-shell structure, interaction mechanism, intervention

strategies. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 272, p. 132697, 2024.

IACCHERI, Eleonora et al. Studying physical state of films based on casava starch and/or chitosan by dielectric and thermal properties and effects of pitanga leaf hydroethanolic extract. **Journal of Food Engineering**, v. 339, p. 111280, 2023.

ITUSACA-MALDONADO, Yisenia Mirian et al. Technological and textural properties of gluten-free quinoa-based pasta (*Chenopodium quinoa* Wild). **Heliyon**, v. 10, n. 7, 2024.

JALGAONKAR, Kirti et al. Pearl millet based pasta: Optimization of extrusion process through response surface methodology. **Journal of Food science and technology**, v. 56, n. 3, p. 1134-1144, 2019.

JAYAKUMAR, Disha; SANTHAPUR, Ramdattu; MCCLEMENTS, David Julian. Fabrication of mycelium-gellan gum hybrids as next generation alternative protein foods produced by fermentation. **Food Research International**, p. 116495, 2025.

JIA, Bin et al. Degradation of starch in pasta induced by extrusion below gelatinization temperature. **Food Chemistry**, v. 426, p. 136524, 2023.

KAUR, Ravneet; PRASAD, Kamlesh. Technological, processing and nutritional aspects of chickpea (*Cicer arietinum*)-A review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 109, p. 448-463, 2021.

KAVUR, Pelin Barış; YEMENICIOĞLU, Ahmet. An efficient method of improving essential oil retention and sustained release of chitosan films: Ultrasound-assisted preparation of chitosan composites with surface active chickpea proteins. **Food Hydrocolloids**, v. 151, p. 109790, 2024.

KORE, Tamirat; ABEBE, Workineh; GETACHEW, Paulos. Optimization of cooking, textural, and sensorial qualities of macaroni supplemented with tef (*Eragrostis tef* (Zucc.) Trotter) and chickpea flours. **International Journal of Food Properties**, v. 25, n. 1, p. 2254-2266, 2022.

KREMPEL, Mara; GRIFFIN, Kristen; KHOURYIEH, Hanna. Hydrocolloids as emulsifiers and stabilizers in beverage preservation. In: **Preservatives and preservation approaches in beverages**. Academic Press, 2019. p. 427-465.

KUMAR, Gopika S. et al. Pasta: Raw materials, processing and quality improvement. **Pharma Innov. J**, v. 10, p. 185-197, 2021.

LERDLUKSAMEE, Chutima et al. Techno-functional, nutritional, and sensory properties of pumpkin flour-enriched dried egg noodles. **Applied Food Research**, v. 5, n. 2, p. 101399, 2025.

LI, Sisheng et al. Development of novel protein-rich foods: Studies of composite hydrogels formed from potato proteins and gellan gums with different degrees of acylation. **Food Hydrocolloids**, v. 157, p. 110387, 2024.

- LUO, Xianli et al. Structural and functional characteristics of Japonica rice starches with different amylose contents. **CyTA-Journal of Food**, v. 19, n. 1, p. 532-540, 2021.
- MAIA, Karina Milene et al. Caracterização dos consumidores de ovos na cidade de Maringá–Paraná. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, 2021.
- MAO, Runsheng; TANG, Juming; SWANSON, B. G. Texture properties of high and low acyl mixed gellan gels. **Carbohydrate polymers**, v. 41, n. 4, p. 331-338, 2000.
- MARQUES, Gleicyane de Almeida et al. O Efeito do Processamento por Extrusão Termoplástica na Qualidade Nutricional dos Alimentos: Uma Revisão. **Journal of Applied Pharmaceutical Sciences–JAPHAC**, v. 5, n. 1, p. 45-56, 2018.
- MARTI, Alessandra et al. Cooking behavior of rice pasta: Effect of thermal treatments and extrusion conditions. **LWT-Food Science and Technology**, v. 54, n. 1, p. 229-235, 2013.
- MARTÍN-ESPARZA, Maria Eugenia et al. Role of hydrocolloids in the structure, cooking, and nutritional properties of fiber-enriched, fresh egg pasta based on tiger nut flour and durum wheat semolina. **Foods**, v. 10, n. 10, p. 2510, 2021.
- MAZHAR, Syed Hammad et al. Influence of microwave processing on nutritional, anti-nutritional, antioxidant and sensory characteristics of kachnar powder and supplemented flatbreads. **Food Chemistry: X**, v. 24, p. 101888, 2024.
- MENG, Linghan et al. Effects of high temperature and high relative humidity drying on moisture distribution, starch microstructure and cooking characteristics of extruded whole buckwheat noodles. **Journal of Future Foods**, v. 4, n. 2, p. 159-166, 2024.
- MIKUSHEVA, Nina G. et al. Influence of Reduced Molar Mass of Low-Acyl Gellan Gum on Weak Gel Formation and Rheological Properties. **Gels**, v. 11, n. 6, p. 398, 2025.
- MOHAPATRA, Pravat K. et al. **Panicle architecture of rice and its relationship with grain filling**. Springer International Publishing, 2022.
- MONTEMURRO, Marco; CODA, Rossana; RIZZELLO, Carlo Giuseppe. Recent advances in the use of sourdough biotechnology in pasta making. **Foods**, v. 8, n. 4, p. 129, 2019.
- MONTIEL, S. A. E. **Efeito do tratamento térmico convencional e do processo de extrusão sobre a qualidade nutricional de arroz (*Oryza sativa*) e feijão (*Phaseolus vulgaris*)**. 2020. 84 p. Dissertação (Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2020.
- MORDOR INTELLIGENCE RESEARCH & ADVISORY. **Tamanho do mercado de alimentos e bebidas sem glúten do Brasil e análise de ações: tendências e previsões de crescimento (2024–2029)**. 2024. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/brazil-gluten-free-foods-beverages-market-industry>. Acesso em: 19 jun. 2024.

MORRIS, Edwin R.; NISHINARI, Katsuyoshi; RINAUDO, Marguerite. Gelation of gellan—a review. **Food Hydrocolloids**, v. 28, n. 2, p. 373-411, 2012.

MOSTAFA, Sayed et al. Development and quality evaluation of high-protein gluten-free pasta formulations. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 27266, 2025.

MOURA, C. M. A. **Qualidade de farinhas pré-gelatinizadas e macarrões formulados com arroz (*Oryza sativa* L.) e linhaça (*Linum usitatissimum* L.)**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia dos Alimentos) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2011.

NAYYAR, Puja; MONDAL, Imdadul Hoque. Assessment of Microbial and Physicochemical Properties of Pasta Prepared Using Buckwheat, Chickpea Flour. **European Journal of Nutrition and Food Safety**, v. 16, n. 4, p. 132-138, 2024.

NUNES, G. M. **Massas alimentícias sem glúten de farinhas formuladas à base de arroz e feijão**. 122 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2020.

OKE, Emmanuel Kehinde et al. Quality attributes of pasta produced from cassava starch, egg powder and spiced with ginger flour. **The Annals of the University Dunarea de Jos of Galati. Fascicle VI-Food Technology**, v. 48, n. 1, p. 131-146, 2024.

OKPALA, Nnaemeka Emmanuel et al. The roles of starch branching enzymes and starch synthase in the biosynthesis of amylose in rice. **Journal of Cereal Science**, v. 104, p. 103393, 2022.

OLIVEIRA, Karliana Silva. **Biofortificação de arroz (*Oryza sativa* L.) em selênio e implicações na composição nutricional**. 2016. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Qualidade Alimentar) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 2016.

OMA, Jéssica Mayuri; DOS SANTOS, Suelen Siqueira; MADRONA, Grasielle Scaramal. Aplicação de tecnologias para melhoramento das características funcionais da clara de ovo desidratada: Uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 7, p. e39410716787-e39410716787, 2021.

PADALINO, Lucia et al. Effects of hydrocolloids on chemical properties and cooking quality of gluten-free spaghetti. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 48, n. 5, p. 972-983, 2013.

PÄLCHEN, Katharina et al. Effect of processing and microstructural properties of chickpea-flours on in vitro digestion and appetite sensations. **Food Research International**, v. 157, p. 111245, 2022.

PANDEY, Vivek et al. Extension-dominated improved dispersive mixing in single-screw extrusion. Part 2: Comparative analysis with twin-screw extruder. **Journal of applied polymer science**, v. 138, n. 5, p. 49765, 2021.

PANG, Yunlong et al. Relationship of rice grain amylose, gelatinization temperature and pasting properties for breeding better eating and cooking quality of rice varieties. **PloS one**, v. 11, n. 12, p. e0168483, 2016.

PATIL, Nikhil Dnyaneshwar et al. Extraction, modification, biofunctionality, and food applications of chickpea (*cicer arietinum*) protein: an up-to-date review. **Foods**, v. 13, n. 9, p. 1398, 2024.

PIRKWIESER, Philip et al. Evaluation of spray-dried eggs as a micronutrient-rich nutritional supplement. **Frontiers in Nutrition**, v. 9, p. 984715, 2022.

PIRSA, Sajad; HAFEZI, Kosar. Hydrocolloids: Structure, preparation method, and application in food industry. **Food Chemistry**, v. 399, p. 133967, 2023.

PISMAG, Remigio Yamid et al. Effect of extrusion cooking on the chemical and nutritional properties of instant flours: a review. **F1000Research**, v. 12, p. 1356, 2024.

PUTSEYS, J. A.; LAMBERTS, Lieve; DELCOUR, and JA. Amylose-inclusion complexes: Formation, identity and physico-chemical properties. **Journal of Cereal Science**, v. 51, n. 3, p. 238-247, 2010.

PURWADI, R.; TEGUH, C. F.; MAZAYA, D. Fermented cassava as an alternative flour for pasta noodle. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 2021. p. 012042.

QI, X. et al. Molecular basis of the gelatinisation and swelling characteristics of waxy rice starches grown in the same location during the same season. **Journal of Cereal Science**, v. 37, n. 3, p. 363-376, 2003.

QIN, Wanyu et al. Influence of particle size on the properties of rice flour and quality of gluten-free rice bread. **Lwt**, v. 151, p. 112236, 2021.

QUEIROGA, V. P.; GIRÃO, E. G.; ALBUQUERQUE, E. M. B. Grão de bico (*Cicer arietinum* L.): tecnologias de plantio e utilização. **Campina Grande: AREPB**, 2021.

RAMOS, M. J. S.; ROCHA, E. B. M.; GUSMÃO, T. A. S.; NASCIMENTO, A.; LISBOA, H. M.; GUSMÃO, R. P. Optimizing gluten-free noodle quality: the impacts of transglutaminase concentration and kneading time on cooking properties, nutritional value, and rheological characteristics. **LWT – Food Science and Technology**, v. 189, p. 115485, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115485>.

RODRIGUEZ-HERNÁNDEZ, A. I. et al. Rheology-structure properties of gellan systems: evidence of network formation at low gellan concentrations. **Food Hydrocolloids**, v. 17, n. 5, p. 621-628, 2003.

ROMANO, Annalisa et al. New ingredients and alternatives to durum wheat semolina for a high quality dried pasta. **Current Opinion in Food Science**, v. 41, p. 249-259, 2021.

ROMERO, Hollman Motta et al. Dough rheological properties and texture of gluten-free pasta based on proso millet flour. **Journal of cereal science**, v. 74, p. 238-243, 2017.

RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ, Ibrahym et al. Generating 3D food printing materials through extrusion cooking: Printability and rheological properties of omega-3-enriched and chickpea flours formulations. **Food and Bioproducts Processing**, v. 151, p. 287-299, 2025.

SAHIN, S. S. et al. Composition, characterisation and emulsifying properties of natural nanoparticles in chickpea aquafaba for the formation of chilli oleoresin-in-water Pickering emulsions. **Food Hydrocolloids**, v. 150, p. 109728, 2024.

SAINI, Rashmi et al. Drought priming induces chilling tolerance and improves reproductive functioning in chickpea (*Cicer arietinum* L.). **Plant Cell Reports**, v. 41, n. 10, p. 2005-2022, 2022.

SANGUINETTI, Anna Maria et al. Gluten-free fresh filled pasta: The effects of xanthan and guar gum on changes in quality parameters after pasteurisation and during storage. **LWT-Food science and Technology**, v. 64, n. 2, p. 678-684, 2015.

SCOTT, Gabrielle; AWIKA, Joseph M. Effect of protein–starch interactions on starch retrogradation and implications for food product quality. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 22, n. 3, p. 2081-2111, 2023.

SHELAR, Gaurav A.; GAIKWAD, Sandip T. Extrusion in food processing: An overview. **The Pharma Innovation Journal**, v. 8, n. 2, p. 562-568, 2019.

SHIOZAWA, Simone et al. Produção E Caracterização De Massas Alimentícias Com Substituição Parcial Da Semolina De Trigo Durum Por Farinha De Feijão Fradinho E De Arroz. **FTT Journal of Engineering and Business**, n. 6, 2020.

SHOUKAT, Rizwan et al. Rice Starch Chemistry, Functional Properties, and Industrial Applications: A Review. **Polymers**, v. 17, n. 1, p. 110, 2025. DOI: 10.3390/polym17010110.

SILVA, Erika Madeira Moreira da et al. Efeito dos parâmetros de extrusão nas características de viscosidade de pasta e índice de absorção de água de macarrões pré-cozidos elaborados a partir de farinha mista de arroz integral e milho obtidos por extrusão. **Bol. Centro Pesqui. Process. Aliment**, p. 239-254, 2008.

SINGH, Gurpreet et al. Development and characterisation of barley-based non-conventional pasta supplemented with chickpea flour. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 59, n. 2, p. 1104-1112, 2024.

SPÖRL, Johannes; SPEER, Karl; JIRA, Wolfgang. A UHPLC-MS/MS method for the detection of meat substitution by nine legume species in emulsion-type sausages. **Foods**, v. 10, n. 5, p. 947, 2021.

SUO, Xinying et al. Effect of “shape” on technological properties and nutritional quality of chickpea-corn-rice gluten free pasta. **Lwt**, v. 192, p. 115661, 2024.

TAN, Xiaoyan et al. The role of storage protein fractions in slowing starch digestion in chickpea seed. **Food Hydrocolloids**, v. 129, p. 107617, 2022.

TEBA, C. da S. **Elaboração de massas alimentícias pré-cozidas à base de farinha mista de arroz polido e feijão preto sem casca pelo processo de extrusão termoplástica**. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2009.

USDA - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Production, Supply and Distribution (PSD) on line**. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/downloads>. Acesso em: 24 fev. 2024.

VERMA, Deepak Kumar; SRIVASTAV, Prem Prakash. Bioactive compounds of rice (*Oryza sativa* L.): Review on paradigm and its potential benefit in human health. **Trends in Food Science & Technology**, v. 97, p. 355-365, 2020.

VICENTE, Maria Helena do Nascimento. **Desenvolvimento de produtos com utilização da farinha do arroz vermelho**. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso Superior em Tecnologia de Alimentos (Tecnólogo de Alimentos) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2022.

WANG, Lijuan et al. Milling of buckwheat hull to cell-scale: Influences on the behaviors of protein and starch in dough and noodles. **Food Chemistry**, v. 423, p. 136347, 2023.

WANG, Shujun et al. Starch–lipid and starch–lipid–protein complexes: A comprehensive review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 19, n. 3, p. 1056-1079, 2020.

WONBEBE, Wondyfrw Tadele et al. Analysis of Sushi Rice: Preparation Techniques, Physicochemical Properties and Quality Attributes. **Applied Sciences**, v. 15, n. 12, p. 6540, 2025. DOI: 10.3390/app15126540.

XIONG, Weiyan; DEVKOTA, Lavaraj; DHITAL, Sushil. Substitution of wheat semolina with intact chickpea cells: A study on extruded pasta quality. **Food Research International**, v. 202, p. 115687, 2025.

XU, Lu et al. Oleogel for improving the texture and flavor in rice cooking: Preparation from natural wax and rice bran oil and characterization. **Journal of Cereal Science**, v. 118, p. 103955, 2024. DOI: 10.1016/j.jcs.2024.103955.

YAN, Bowen et al. Fabrication, functional properties, and potential applications of mixed gellan–polysaccharide systems: A review. **Annual Review of Food Science and Technology**, v. 15, 2024.

YILDIZ, Eda et al. Citric acid cross-linked curcumin/chitosan/chickpea flour film: An active packaging for chicken breast storage. **Food Bioscience**, v. 50, p. 102121, 2022.

ZHAO, Renjie et al. Improvement effect of different protein powder on cooking characteristics of gluten-free pasta and the establishment of quality evaluation based on principal component analysis. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 59, n. 2, p. 1138-1149, 2024. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16728>

ZHANG, Cenyue et al. Comprehensive analysis of the effects of cooking conditions on the quality, sensory characteristics, and flavor profile of glutinous rice chicken, a Chinese traditional poultry meat product. **Food Chemistry: X**, v. 24, p. 101868, 2024. DOI: 10.1016/j.fochx.2024.101868.

ZHANG, Tao et al. Effects of pH and temperature on the structure, rheological and gel-forming properties of sugar beet pectins. **Food Hydrocolloids**, v. 116, p. 106646, 2021.

## **CAPÍTULO II**

### **FORMULAÇÃO INOVADORA DE MASSA *FUSILLI* SEM GLÚTEN UTILIZANDO FARINHAS DE ARROZ JAPONÊS E GRÃO-DE-BICO EXTRUSADAS**

### **3 CAPÍTULO II: Formulação Inovadora de Massa *Fusilli* sem Glúten Utilizando Farinhas de Arroz Japonico e Grão-De-Bico Extrusadas**

#### **RESUMO**

**Introdução:** A crescente demanda por produtos isentos de glúten e nutricionalmente equilibrados tem incentivado o desenvolvimento de formulações inovadoras que ofereçam simultaneamente qualidade sensorial e benefícios funcionais. A combinação de farinhas de arroz e leguminosas apresenta alternativas promissoras para mimetizar propriedades semelhantes às do glúten, ao mesmo tempo em que melhora o valor nutricional. Este estudo teve como objetivo desenvolver uma massa tipo fusilli sem glúten utilizando farinhas extrusadas à base de misturas de partículas de arroz japonês (JR) e grão-de-bico (CP). **Métodos:** Foi aplicado um delineamento fatorial  $2^3$  com pontos centrais aumentados para avaliar os efeitos da proporção de farinhas (X1, CP/JR, 20–40%), da umidade de alimentação (X2, 24–30%) e da temperatura de extrusão (X3, 80–120 °C) sobre respostas relacionadas às propriedades do processo (PPs), das farinhas extrusadas (EFs) e das propriedades da massa (NPs). **Resultados:** Observaram-se efeitos de interação de X3 com X1 ou X2 nas respostas avaliadas. Em PPs, X1 a 120 °C reduziu o consumo de energia mecânica (de 181,0 para 136,2 kJ/kg) e aumentou a retenção de umidade (de 12,0 para 19,8%). Em EFs, X1 aumentou os sólidos solúveis em água (de 2,3 para 4,2 g/100 g, bs) e diminuiu a absorção de água (de 8,6 para 5,7 g/g de sólidos insolúveis). Em NPs, X1 também influenciou as propriedades de cocção: o aumento de massa foi maior a 80 °C (140 a 174%), enquanto a perda de sólidos solúveis foi maior a 120 °C (9,3 a 4,5%). A formulação ótima (X1–X2–X3: 40–30%–80 °C) resultou em massas com melhor elasticidade, maior teor proteico e maior integridade textural. **Conclusões:** Farinhas extrusadas produzidas com adição de 40% de farinha de grão-de-bico e processadas sob condições brandas mostraram-se uma estratégia eficaz para aprimorar as propriedades nutricionais e tecnológicas de massas à base de arroz, além de apoiar o desenvolvimento de produtos clean label como alternativas para consumidores intolerantes ao glúten ou preocupados com a saúde.

**Palavras-chave:** produto sem glúten; produto análogo a massa; farinha extrusada; cozimento por extrusão; propriedade física; composição química; teste de cocção.

## ABSTRACT

The growing demand for gluten-free and nutritionally balanced products has driven the development of innovative formulations capable of delivering both desirable sensory quality and functional benefits. In this context, the combination of rice and legume flours represents a promising approach to mimicking gluten-like properties while enhancing nutritional value. Accordingly, this study aimed to develop a gluten-free fusilli-type pasta using extruded flours produced from particle blends of Japanese rice (JR) and chickpea (CP). A  $2^3$  factorial design with augmented central points was applied to investigate the effects of flour proportion (X1, CP/JR, 20–40%), feed moisture (X2, 24–30%), and extrusion temperature (X3, 80–120 °C) on responses related to process properties, extruded flour characteristics, and noodle properties. Significant interaction effects between extrusion temperature and either flour proportion or feed moisture were observed across the evaluated responses. With respect to process properties, increasing the proportion of chickpea flour at 120 °C reduced specific mechanical energy consumption from 181.0 to 136.2 kJ/kg while simultaneously increasing moisture retention from 12.0 to 19.8%. Regarding extruded flour characteristics, higher chickpea levels led to increased water-soluble solids, from 2.3 to 4.2 g/100 g on a dry basis, and a reduction in water absorption capacity, from 8.6 to 5.7 g/g of insoluble solids. In terms of noodle properties, flour proportion also influenced cooking behavior, with greater mass gain observed at 80 °C (140–174%) and higher cooking loss occurring at 120 °C (9.3–4.5%). The optimal formulation, defined by the combination of 40% chickpea flour, 30% feed moisture, and an extrusion temperature of 80 °C, resulted in pasta with improved elasticity, higher protein content, and enhanced textural integrity. Overall, the findings demonstrate that extruded flours produced with a 40% incorporation of chickpea flour and processed under mild extrusion conditions constitute an effective strategy to improve the nutritional and technological quality of rice-based pasta, while also supporting the development of clean-label products as suitable alternatives for gluten-intolerant consumers and health-conscious individuals.

**Keywords:** gluten-free product; pasta-like product; extruded flour; extrusion cooking; physical property; chemical composition; cooking test

### 3.1 Introdução

As massas sem glúten atendem à crescente demanda de consumidores com doença celíaca e intolerância ao glúten. Na América do Sul, o Brasil lidera esse segmento de mercado, que tende a se expandir à medida que mais consumidores, como aqueles adeptos de atividades físicas e esportes, além de outros que associam esses produtos a uma melhor digestão, aderem a esse mercado (Mordor Intelligence, 2024). Para obter massas sem glúten de alta qualidade, as farinhas devem apresentar excelente capacidade de hidratação, elasticidade e estabilidade. Essas características dependem de como seus biopolímeros, principalmente amidos, proteínas e fibras, interagem para formar uma rede elástico-coesiva que confere firmeza à massa.

O amido é o principal componente das farinhas, tanto de cereais quanto de leguminosas. Quando farinhas dessas duas fontes são combinadas, os polímeros de amido tornam-se mais disponíveis para reagir. No arroz japonês, os grânulos de amido são constituídos quase totalmente por amilopectina, o que lhe confere propriedades glutinosas que favorecem a formação de massas coesas (Hashim *et al.*, 2024; Wu *et al.*, 2023; Iijima *et al.*, 2019). Por outro lado, em leguminosas como o grão-de-bico, cerca de um terço dos grânulos de amido é composto por amilose, proporcionando propriedades estruturais que contribuem para a firmeza do produto. Além disso, as proteínas e fibras presentes nos grãos integrais de grão-de-bico desempenham um papel importante na retenção de água, auxiliando, assim, na plastificação da massa de macarrão (Begum *et al.*, 2023).

Os biopolímeros presentes nas farinhas cruas são estruturas compactas que requerem modificações leves para melhorar a firmeza da massa, e a extrusão termoplástica é a tecnologia ideal para realizar essas modificações (Ascheri, 2024). Essas alterações incluem fissuras superficiais, alongamento, fusão e/ou ruptura de grânulos de amido, corpos proteicos e feixes de fibras. Dependendo do grau de conversão dos grânulos de amido e do desentrelaçamento ou aglomeração das proteínas, a absorção e a solubilidade em água dos componentes das farinhas extrusadas são afetadas. Isso influencia tanto o processo de conformação de massas frescas em formatos específicos quanto a manutenção desse formato durante o subsequente processo de secagem ou durante o cozimento de massas frescas ou secas até atingir a textura *al dente*, caracterizada por elevada firmeza, elasticidade e mastigabilidade (Blandino *et al.*, 2023).

Pesquisas anteriores utilizaram farinhas extrusadas baseadas em misturas de cereais e leguminosas para a produção de massas sem glúten, visando melhorar suas características nutricionais e tecnológicas. O arroz foi amplamente empregado como farinha base (Bouasla; Wójtowicz e Zidoune, 2016; Suo *et al.*, 2022; Scarton e Clerici, 2022), por fornecer a estrutura necessária de amido, enquanto as fibras e proteínas das farinhas de leguminosas (ervilha amarela, grão-de-bico e lentilha) atuam como substitutos do glúten, melhorando significativamente a elasticidade da massa e a qualidade nutricional (Bouasla; Wójtowicz e Zidoune, 2016; Suo *et al.*, 2022). Essa combinação também aumenta a coloração escura, reduz a expansão da massa, o brilho e as perdas de cocção, além de influenciar positivamente a aceitação sensorial do produto final (Bouasla; Wójtowicz e Zidoune, 2016; Scarton e Clerici, 2022).

Além disso, dependendo do nível de inclusão da farinha de leguminosa e da temperatura de cocção empregada para produzir as farinhas extrusadas, propriedades como cor, firmeza e adesividade podem variar. Do ponto de vista da saúde, se níveis elevados de amido resistente forem mantidos no produto final, isso pode exercer efeitos benéficos sobre as respostas glicêmicas pós-prandiais (Bouasla; Wójtowicz e Zidoune, 2016; Suo *et al.*, 2022).

O teor de umidade utilizado durante a extrusão, aplicado como etapa de pré-cozimento para produzir a farinha sem glúten, influencia significativamente a textura, a expansão e as características de cocção da massa. Níveis de umidade de 24%, 27% e 30% foram selecionados com base em estudos anteriores, que demonstraram que valores abaixo de 24% resultam em estrutura frágil, enquanto níveis acima de 30% comprometem a coesão da massa e sua textura final (Ramos e Rocha, 2023).

A temperatura de extrusão é outro parâmetro crítico que afeta a qualidade das massas sem glúten, pois influencia a gelatinização do amido e a modificação das proteínas. As temperaturas de 80 °C, 100 °C e 120 °C foram estrategicamente selecionadas para otimizar essas transformações e alcançar a estrutura e a textura ideais da massa. Temperaturas abaixo de 80 °C podem gelatinizar o amido de forma insuficiente, enquanto temperaturas acima de 120 °C podem degradar os componentes do produto e comprometer sua qualidade geral (Ahmed *et al.*, 2024).

Devido ao processo termo-mecânico envolvido na extrusão, uma abordagem para evitar a transformação excessiva dos biopolímeros naturais pode ser alimentar o extrusor com partículas mais grossas do material (Vargas-Solórzano *et al.*, 2020). Neste estudo, partículas grossas  $\leq 1,40$  mm de grão-de-bico integral e arroz polido

(subsp. japonica) foram misturadas como fator experimental para complementar seus biopolímeros, partindo do pressuposto de que partículas grossas cozidas por extrusão, dentro de faixas adequadas de umidade e temperatura, podem gerar farinhas extrusadas com propriedades tecnológicas melhoradas para moldagem por extrusão a frio, resultando em massas sem glúten com características de cocção e textura adequadas ao consumo.

O objetivo deste estudo foi desenvolver massas sem glúten utilizando farinhas extrusadas. Os extrusados foram obtidos variando-se três fatores de processamento: a proporção de farinhas em misturas baseadas em partículas de grão-de-bico (CP) e arroz japonês (JR) (CP/JR: 20/80–40/60, bs), a umidade de alimentação (24–30%) e a temperatura do barril na terceira zona de aquecimento (80–120 °C). A caracterização física durante os processos de extrusão e secagem, nas farinhas extrusadas e nas massas preparadas, foi realizada para quantificar o grau de modificação dos biopolímeros no material de alimentação e seu impacto nos testes de cocção e na textura instrumental das massas.

## **3.2 Materiais e Métodos**

### **3.2.1. Produção das farinhas cruas**

Grãos curtos de arroz polido (variedade japonesa, tipo (1)) foram adquiridos da marca Momiji (Camil Alimentos, São Paulo, SP, Brasil), cuja área de produção está localizada no sul do Brasil (variedade BRS 358). Os grãos-de-bico foram gentilmente doados pela Indústria de Alimentos Granfino® (Nova Iguaçu, RJ, Brasil). Para evidenciar a diferença nas propriedades das massas entre o arroz japonês e um arroz comercial, grãos longos e finos de arroz polido (variedade índica, tipo (2)) foram adquiridos da marca Palmares (Cooperativa Arrozeira Palmares, Palmares do Sul, RS, Brasil).

Os grãos foram moídos em grits ( $\leq 1,400$  mm) em duas etapas, utilizando um moinho de discos LM3600 (Perten Instruments AB, Huddinge, Suécia), com o espaçamento entre os discos ajustado na posição #2. Os produtos moídos foram peneirados manualmente (Newark, NJ, EUA), e as partículas grossas  $> 1,40$  mm foram novamente passadas pelo moinho de discos (posição #0 para o arroz e #2 para o grão-de-bico). Os ingredientes granulados crus resultantes foram acondicionados

em sacos plásticos hermeticamente fechados e armazenados sob refrigeração ( $\sim 7^{\circ}\text{C}$ ) por, no máximo, 7 dias antes do uso.

Antes da preparação das misturas, foi determinado o teor de umidade do ingrediente cru de arroz japonês (JR,  $13,39 \pm 0,05\%$ ) e do ingrediente de grão-de-bico (CP,  $11,36 \pm 0,01\%$ ). Em seguida, foram preparadas proporções CP/JR em três níveis: 20/80, 30/70 e 40/60 (base seca). O teor de umidade das misturas 20/80 e 40/60 foi ajustado para 24% e 30%, e o da mistura 30/70 para 27%. As cinco misturas permaneceram em repouso por 16 h, à temperatura ambiente, para a homogeneização do teor de umidade. Após esse período, os teores de umidade foram verificados: 20/80–24% ( $23,56 \pm 0,05\%$ ), 40/60–24% ( $23,71 \pm 0,17\%$ ), 20/80–30% ( $29,69 \pm 0,07\%$ ), 40/60–30% ( $29,93 \pm 0,01\%$ ) e 30/70–27% ( $26,02 \pm 0,22\%$ ). A redução no teor de umidade foi inferior a 1%, o que assegurou a conformidade com o delineamento experimental.

A composição centesimal das farinhas mistas foi avaliada quanto ao teor de umidade, proteínas totais (fator de conversão de nitrogênio para arroz e seus produtos de 5,95) e cinzas (AOAC, 2010). A determinação de lipídios totais foi realizada de acordo com Bligh e Dyer (Bligh e Dyer, 1959). A fibra alimentar foi quantificada utilizando kits de ensaio da Megazyme, e o teor de carboidratos foi determinado por diferença.

### **3.2.2. Propriedades de pasta (RVA)**

As propriedades de viscosidade de pasta das amostras foram avaliadas utilizando um Rapid Visco Analyzer, modelo RVA-4 (Newport Scientific Pty Ltd., Warriewood, Austrália), empregando o perfil Standard Analysis 1. As análises foram realizadas com 3 g de amostras de farinha, corrigidas para 14% de umidade (base úmida).

Os parâmetros obtidos incluíram a viscosidade de pico (PV), que indica a viscosidade máxima durante o aquecimento; a viscosidade de gelificação (GV), correspondente à viscosidade máxima durante a fase de manutenção a frio; a viscosidade de vale (TV), que representa a viscosidade mínima entre PV e GV; a viscosidade de quebra ( $BV = PV - TV$ ), que expressa a estabilidade dos grânulos inchados sob ação de calor e cisalhamento; e a viscosidade de retrogradação ( $SV = GV - TV$ ), que reflete a tendência das moléculas de amido à retrogradação durante o resfriamento.

### 3.2.3. Produção das farinhas extrudadas

As farinhas extrudadas foram produzidas seguindo um delineamento experimental fatorial  $2^3$ , com quatro pontos centrais aumentados. Os fatores estudados e seus níveis reais estão detalhados na Tabela 1. O fator X1 representa a proporção de farinha de grão-de-bico (%) combinada com arroz japonês. O fator X2 corresponde ao teor de umidade ajustado (%), e o fator X3 refere-se à temperatura do canhão na terceira zona.

As misturas CP/JR condicionadas (materiais de alimentação) foram processadas utilizando um extrusor monorroscas 19/20 DN (Brabender, Duisburg, Alemanha), no qual o eixo do motor estava acoplado a um reômetro de torque PlastiCorder LabStation (Brabender, Duisburg, Alemanha). O parafuso acoplado ao eixo do motor apresentou uma razão de compressão de 2:1 e operou a 150 rpm. As temperaturas do canhão do extrusor foram fixadas em 50 e 80 °C para as zonas de alimentação e compressão, respectivamente. A matriz do extrusor correspondeu à terceira zona de aquecimento, a qual foi aquecida de acordo com as condições descritas na Tabela 1. O orifício do bico na saída da matriz do extrusor possuía diâmetro de 4 mm.

Os materiais de alimentação foram introduzidos no extrusor a uma taxa de 4 kg/h por meio de um alimentador volumétrico (Brabender, Duisburg, Alemanha), no qual a rotação do parafuso do alimentador variou de 8 a 19 rpm (Tabela 1), em função das diferenças de densidade aparente entre as misturas.

Tabela 1. Delineamento experimental e propriedades avaliadas nos processos de extrusão-secagem e nas farinhas extrudadas.

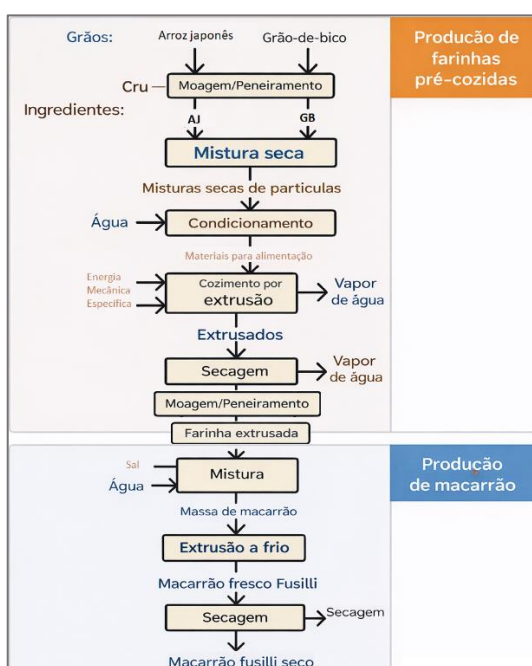
| Experimental |        |         | Tratamento |     | Propriedades do Processo |             |         |         |            |           | Propriedades da farinha extrusada |       |       |                    |         |         |         |         |
|--------------|--------|---------|------------|-----|--------------------------|-------------|---------|---------|------------|-----------|-----------------------------------|-------|-------|--------------------|---------|---------|---------|---------|
| Design       |        |         | Código     |     | Extrusão                 |             | Secagem |         | Hidratação |           | Cor instrumental                  |       |       | Composição química |         |         |         |         |
| X1 (%)       | X2 (%) | X3 (°C) | -          | EO  | VPA (rpm)                | EME (kJ/kg) | UM (%)  | UMS (%) | ISA (%)    | IAA (g/g) | L*                                | a*    | b*    | PRO (%)            | CHO (%) | LIP (%) | CIN (%) | FIB (%) |
| 20           | 24     | 80      | T1         | 4°  | 8                        | 254.39      | 13.68   | 8.71    | 2.32       | 7.67      | 90.01                             | 0.05  | 15.67 | 9.84               | 74.32   | 1.81    | 1.39    | 3.56    |
| 40           | 24     | 80      | T2         | 11° | 10                       | 200.75      | 16.72   | 12.51   | 3.00       | 7.96      | 89.27                             | -0.19 | 19.04 | 11.38              | 75.01   | 2.92    | 1.71    | 5.81    |
| 20           | 30     | 80      | T3         | 5°  | 17                       | 172.26      | 15.27   | 10.02   | 2.40       | 8.41      | 87.20                             | 1.77  | 24.55 | 9.85               | 74.29   | 1.79    | 1.41    | 3.56    |
| 40           | 30     | 80      | T4         | 10° | 19                       | 161.40      | 19.08   | 14.22   | 1.85       | 8.72      | 90.44                             | 0.15  | 16.65 | 11.29              | 71.01   | 2.85    | 1.72    | 5.77    |
| 20           | 24     | 120     | T5         | 2°  | 8                        | 160.33      | 13.53   | 8.97    | 2.23       | 7.51      | 90.02                             | -0.03 | 17.06 | 9.81               | 74.38   | 1.84    | 1.42    | 3.49    |
| 40           | 24     | 120     | T6         | 7°  | 10                       | 163.80      | 15.14   | 10.60   | 2.85       | 6.89      | 87.51                             | 1.05  | 24.22 | 11.29              | 71.24   | 2.77    | 1.69    | 5.79    |
| 20           | 30     | 120     | T7         | 1°  | 17                       | 138.37      | 11.29   | 5.77    | 2.90       | 8.33      | 90.55                             | 0.14  | 15.90 | 9.79               | 74.22   | 1.82    | 1.36    | 3.48    |
| 40           | 30     | 120     | T8         | 8°  | 19                       | 141.04      | 16.45   | 11.03   | 4.31       | 5.49      | 88.93                             | 0.13  | 20.02 | 11.40              | 72.11   | 2.81    | 1.73    | 5.82    |
| 30           | 27     | 100     | T9         | 3°  | 14                       | 171.32      | 16.37   | 10.33   | 3.09       | 7.13      | 90.13                             | -0.15 | 17.11 | 10.52              | 69.91   | 2.32    | 1.55    | 4.66    |
| 30           | 27     | 100     | T10        | 6°  | 14                       | 168.81      | 15.69   | 11.03   | 3.34       | 7.26      | 89.12                             | -0.17 | 18.92 | 10.55              | 72.64   | 2.35    | 1.53    | 4.59    |
| 30           | 27     | 100     | T11        | 9°  | 14                       | 157.39      | 16.95   | 12.00   | 3.48       | 7.67      | 89.05                             | -0.25 | 18.67 | 10.50              | 71.98   | 2.31    | 1.56    | 4.69    |

| Experimental |     |      | Tratamento |     | Propriedades do Processo |         |         |       |            |       | Propriedades da farinha extrusada |       |       |                    |       |      |      |      |
|--------------|-----|------|------------|-----|--------------------------|---------|---------|-------|------------|-------|-----------------------------------|-------|-------|--------------------|-------|------|------|------|
| Design       |     |      | Código     |     | Extrusão                 |         | Secagem |       | Hidratação |       | Cor instrumental                  |       |       | Composição química |       |      |      |      |
| X1           | X2  | X3   | -          | EO  | VPA                      | EME     | UM      | UMS   | ISA        | IAA   | L*                                | a*    | b*    | PRO                | CHO   | LIP  | CIN  | FIB  |
| (%)          | (%) | (°C) |            |     | (rpm)                    | (kJ/kg) | (%)     | (%)   | (%)        | (g/g) |                                   |       |       | (%)                | (%)   | (%)  | (%)  | (%)  |
| 27           | 100 | T12  |            | 12° | 14                       | 174.76  | 16.47   | 11.88 | 3.04       | 7.37  | 90.14                             | -0.17 | 17.29 | 10.51              | 72.12 | 2.41 | 1.54 | 4.68 |

X1: adição de farinha de grão-de-bico; X2: umidade de alimentação; X3: temperatura do canhão na terceira zona; EO: ordem de extrusão; VPA: velocidade do parafuso do alimentador; EME: energia mecânica específica; UM: umidade do extrudado; UMS: umidade dos extrudados após a secagem; ISA: índice de solubilidade em água (<sup>1</sup> g ss/100 g bs); IAA: índice de absorção de água (2 g de água/g de is); L\*: luminosidade; a\*: coordenada de cor vermelho-verde; b\*: coordenada de cor amarelo-azul; PRO: proteínas; CHO: carboidratos; LIP: lipídios; CIN: cinzas; FIB: fibra alimentar. Fonte: Elaborada pela própria autora.

As amostras recém-extrudadas, que não apresentaram expansão significativa, foram imediatamente cortadas e secas a 60 °C em estufa com circulação forçada de ar. As amostras secas foram então moídas utilizando um moinho de discos LM3600 (Pertin Instruments AB, Huddinge, Suécia), com o espaçamento entre os discos ajustado na posição #12. As partículas grossas resultantes (diâmetro < 4 mm) foram alimentadas em um moinho de rolos Quadrumat Jr. (Brabender, Duisburg, Alemanha), e os produtos moídos obtidos foram peneirados manualmente em peneiras laboratoriais (Newark, NJ, EUA). Os produtos peneirados, constituídos por partículas ≤ 0,500 mm, foram denominadas farinhas extrudadas (EFs), acondicionados em sacos plásticos hermeticamente fechados e armazenados sob refrigeração (~7 °C) por até três meses. Uma ilustração esquemática do processo é apresentada na Figura S1.

Figura S1 -Ilustração esquemática do processo



Fonte: Elaborada pela própria autora

### 3.2.4. Caracterização física nos processos de extrusão e secagem

A vazão mássica ( $\dot{m}$ , kg/h) foi medida no início e ao final de cada tratamento e, juntamente com o torque registrado ( $T$ , N·m), foi utilizada para determinar a energia mecânica específica (EME, kJ/kg) fornecida ao material durante a extrusão (Equação (1)) (Romero Rodríguez *et al.*, 2021). O teor de umidade dos extrudados coletados e após a secagem foi determinado pelo método AOAC 925.09 (AOAC, 2010).

$$EME = \frac{T \times 2\pi \times N}{\dot{m}} \quad (1)$$

### 3.2.5. Caracterização física e química das farinhas extrudadas

As farinhas extrudadas (EFs) foram caracterizadas quanto às propriedades tecnológicas: índice de absorção de água (IAA, g de água/g de sólidos insolúveis) e índice de solubilidade em água (ISA, g de sólidos solúveis/100 g em base seca) (Equações (2) e (3)) (Vargas-Solórzano *et al.*, 2014).

$$ISA = \frac{\text{g de sólidos solúveis em água (ss)}}{\text{g de amostra seca (bs)}} \times 100 \quad (2)$$

$$IAA = \frac{\text{g de água absorvida}}{\text{g de amostra seca} \times (1 - \text{fração solúvel})} = \frac{\text{g de água absorvida}}{\text{g de sólidos insolúveis (si)}} \quad (3)$$

A cor instrumental das EFs foi determinada utilizando um colorímetro (Konica Minolta, CR-5, Tóquio, Japão). Os parâmetros de cor foram expressos de acordo com a escala CIELAB: coordenadas de cromaticidade ( $a^*$  e  $b^*$ ) e luminosidade ( $L^*$ ). A composição química das farinhas extrudadas foi determinada seguindo os mesmos procedimentos utilizados para os ingredientes crus.

### 3.2.6. Produção dos macarrões

Os ingredientes para a produção dos macarrões foram preparados utilizando 300 g de EF. A farinha (100%) foi inicialmente misturada com sal (1%) em uma batedeira planetária N50A (Hobart Corp., North York, ON, Canadá) por 3 min. Em

seguida, água (36%) foi adicionada gradualmente ao longo de 7 min, com base nas características de absorção de água de cada tratamento. O processo de amassamento teve duração aproximada de 20 min.

A massa foi então moldada em macarrões do tipo fusilli utilizando uma extrusora de massas (Pastaia 2, ITALVISA, Tatuí, SP, Brasil). Após a moldagem, os macarrões foram secos em um secador de bandejas SL102 (SOLAB, São Paulo, SP, Brasil), resfriados à temperatura ambiente, embalados em sacos plásticos herméticos e armazenados sob refrigeração (~7 °C) por até três meses. Uma ilustração esquemática do processo é apresentada na Figura S1.

### 3.2.7. Testes de cocção dos macarrões

Os testes de cocção, realizados de acordo com o método AACC 16–50 (AACC, 1995), consistiram no cozimento de 10 g de macarrão em 140 mL de água destilada em ebulição. A cada 15 s, após 5 min de cocção, uma amostra era retirada para verificar a presença de material cru no eixo central. O tempo ótimo de cocção (TOC) de cada tratamento foi determinado quando não foram observados vestígios visuais de material cru, provavelmente indicando a gelatinização total do amido.

Uma vez determinado o TOC, o aumento de massa (AM) após a drenagem do macarrão cozido foi calculado (Equação (4)):

$$AM = \frac{\text{massa da amostra cozida}}{\text{massa da amostra crua}} \times 100\% \quad (4)$$

O volume do macarrão cru e cozido (no TOC) foi determinado pelo método de deslocamento de água. A massa do conjunto foi registrada em uma proveta graduada de 200 mL preenchida com água até o topo. Após a remoção de metade da água, a amostra foi inserida, completando-se o volume com a água restante até o topo. O volume deslocado correspondeu ao volume da amostra. O aumento de volume após a drenagem do macarrão cozido foi calculado (Equação (5)):

$$AV = \frac{\text{volume da amostra cozida}}{\text{volume da amostra crua}} \times 100\% \quad (5)$$

A perda de sólidos solúveis (PSS) foi determinada por evaporação de 25 mL da água de cocção em estufa a 105 °C até obtenção de massa constante (Equação (6)). Amostras de macarrão de trigo foram utilizadas para fins de comparação.

$$PSS = \frac{\text{massa do resíduo evaporado}}{\text{massa da amostra crua}} \left( \frac{140 \text{ mL}}{25 \text{ mL}} \right) \times 100\% \quad (6)$$

### 3.2.8. Análise do perfil de textura dos macarrões

Os macarrões cozidos no TOC foram submetidos a dois ciclos de compressão em um analisador de textura TA-XT Plus (Stable Micro System, Surrey, Reino Unido), equipado com célula de carga de 5 kg. A sonda cilíndrica, com base de 50 mm de diâmetro, desceu à velocidade de 1 mm/s até deformar a amostra em 50% de sua altura inicial, com um intervalo de 5 s entre os ciclos. As curvas de força foram registradas pelo software Exponent, versão 6.1.11.0.

Os parâmetros de textura extraídos dos perfis de força foram: dureza (HA), elasticidade (EL), coesividade (CO), gomosidade (GO) e mastigabilidade (MA).

### 3.2.9. Análise estatística

Os dados obtidos de acordo com a geometria fatorial  $2^3$ , com quatro pontos centrais aumentados, permitiram a geração de superfícies de resposta preditivas (Equação (7)):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \varepsilon \quad (7)$$

Em que Y é a resposta avaliada nas seguintes propriedades: (1) durante o processo de extrusão-secagem, (2) da farinha extrudada ou (3) do macarrão formulado com farinha extrudada. O termo  $x_i$  representa o efeito principal de um fator do estudo em níveis codificados, enquanto  $x_i x_j$  representa o efeito de interação entre dois fatores do estudo. Os coeficientes  $\beta_i$  e  $\beta_{ij}$  correspondem, respectivamente, aos coeficientes lineares e de interação do modelo, os quais foram obtidos por análise de regressão.

Essa análise teve como objetivo minimizar o erro experimental do modelo ( $\varepsilon$ ); para isso, foi utilizado o software Statistica (StatSoft, Tulsa, OK, EUA).

Modelos preditivos foram gerados para equações com  $R^2 > 0,70$  e ausência de falta de ajuste significativa, sendo apresentados na forma de superfícies de resposta. Nas superfícies geradas, o nível do fator constante foi fixado em seu valor alto para  $X_1$  e  $X_2$  (+1) ou em seu valor baixo para  $X_3$  (-1). Essa escolha foi adotada com o objetivo de modelar condições de extrusão menos severas.

### **3.3 Resultados e Discussão**

#### **3.3.1 Composição centesimal das misturas**

Em relação à composição centesimal das misturas de farinha de grão-de-bico/arroz (20/80, 30/70 e 40/60), foram observadas alterações significativas. O teor de proteínas aumentou de 9,85% (20/80) para 11,40% (40/60), refletindo o maior conteúdo proteico da farinha de grão-de-bico (15,74%) quando comparado à farinha de arroz (~8,37%).

Em contrapartida, o teor de carboidratos diminuiu progressivamente de 74,32% para 71,01%, em razão do menor conteúdo de carboidratos da farinha de grão-de-bico (60,82%) em comparação à farinha de arroz (~77,69%). O teor de cinzas aumentou de forma expressiva, passando de 1,39% (20/80) para 1,71% (40/60), provavelmente indicando maior conteúdo mineral na farinha de grão-de-bico (2,66%) em relação à farinha de arroz (~1,08%).

O valor energético total (VET) apresentou leve redução, de 364,75 kcal/100 g (20/80) para 354,16 kcal/100 g (40/60), refletindo o menor valor energético da farinha de grão-de-bico (322,38 kcal/100 g) quando comparado ao da farinha de arroz (~375,34 kcal/100 g).

#### **3.3.2 Propriedades de pasta dos ingredientes *in natura***

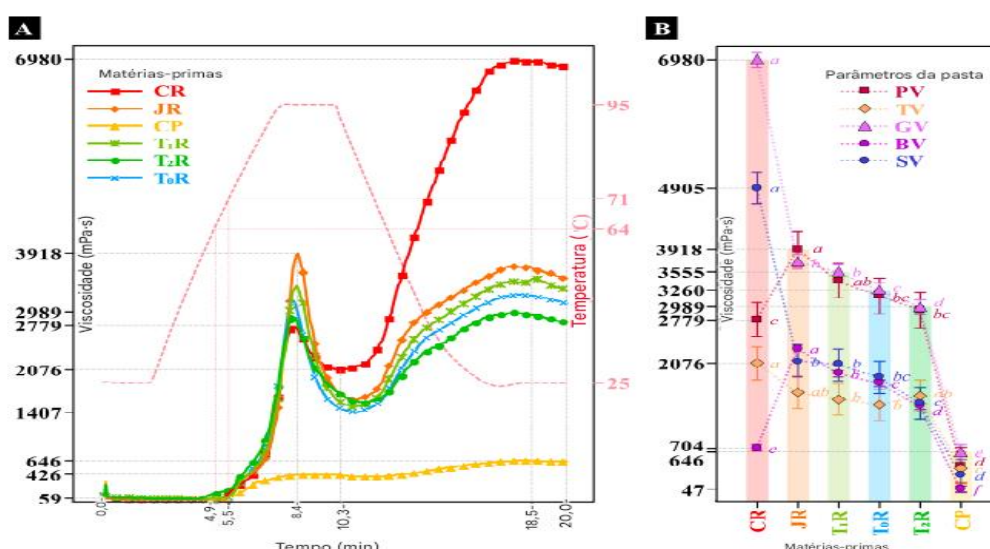
A Figura 1 apresenta os perfis de viscosidade RVA dos ingredientes *in natura* e das misturas de alimentação para extrusão formuladas à base de arroz japonês (JR), com adição de partículas inteiras de grão-de-bico (CP). A determinação das propriedades de pasta é essencial para compreender os efeitos do processamento

por extrusão sobre o comportamento do amido sob condições hidrotérmicas cíclicas, as quais podem ser adequadamente avaliadas por meio do Rapid Visco Analyzer (RVA).

Conforme observado na Figura 1, o arroz comercial (CR) apresentou a maior viscosidade de pico (PV; 6980 mPa·s), provavelmente indicando elevada capacidade de absorção de água, característica associada ao intenso intumescimento dos grânulos de amido e à consequente formação de uma pasta altamente viscosa. Em contraste, o grão-de-bico apresentou valor de PV significativamente inferior (426 mPa·s), sugerindo menor absorção de água e comportamento térmico distinto, fortemente influenciado pelo maior teor de proteínas e fibras.

As misturas de JR e CP apresentaram valores intermediários de viscosidade, com redução progressiva à medida que aumentou a proporção de grão-de-bico na formulação. Esse comportamento pode ser atribuído, em parte, ao efeito de diluição do amido, uma vez que o grão-de-bico contém quantidades expressivas de componentes não amiláceos, como proteínas e lipídios, que limitam o intumescimento dos grânulos de amido. Dessa forma, as amostras T1R (20% CP), T0R (30% CP) e T2R (40% CP) evidenciaram claramente o efeito diluidor do grão-de-bico sobre a viscosidade de pasta das formulações à base de arroz.

Figura 1 – Perfis de viscosidade RVA dos ingredientes *in natura* e das misturas de alimentação para extrusão, e variação dos parâmetros de pasta



(A) Perfis de viscosidade RVA dos ingredientes *in natura* (arroz japonês: JR; partículas inteiras de grão-de-bico: CP; e farinha de arroz comercial: CR, para fins de comparação) e das misturas de alimentação para extrusão, com base nas proporções CP/JR em base seca (T1R: 20/80; T2R: 40/60; e T0R: 30/70). (B) Variação dos parâmetros de pasta: viscosidade de pico (PV), viscosidade mínima ou de manutenção (*trough viscosity*, TV), viscosidade de gelificação (GV), viscosidade de quebra (*breakdown viscosity*,

BV) e viscosidade de retrogradação (*setback viscosity*, SV). Valores seguidos de letras minúsculas diferentes, para um mesmo parâmetro, diferem entre si de acordo com o teste de Tukey. Fonte: Elaborada pela própria autora

A Figura 1B confirma essas tendências nos parâmetros específicos de viscosidade. A amostra CR apresentou novamente valores significativamente mais elevados de viscosidade de gelificação (GV), viscosidade de retrogradação (SV) e viscosidade mínima (TV), provavelmente indicando maior estabilidade e capacidade de formação de gel após o resfriamento. Em contraste, o grão-de-bico (CP) apresentou valores inferiores desses parâmetros, evidenciando menor estabilidade da pasta após o tratamento térmico. A análise estatística (teste de Tukey) confirmou diferenças significativas entre os tratamentos, ressaltando o impacto negativo do grão-de-bico sobre as propriedades viscoelásticas, efeito que se tornou mais pronunciado em maiores concentrações. Esses resultados são fundamentais para a otimização das características de produtos extrudados, especialmente no que se refere à textura e à viscosidade.

### 3.3.3 Caracterização Física nos Processos de Extrusão e Secagem

A Tabela 1 apresenta o delineamento experimental, o código dos tratamentos (combinação dos níveis reais dos fatores) e os resultados da rotação do parafuso alimentador (*feeder screw speed* – FSS) e da ordem de extrusão semialeatorizada (EO) dos tratamentos, definida considerando as restrições práticas relacionadas ao rápido ajuste da temperatura do canhão na zona final de aquecimento. Essa abordagem permitiu a avaliação isolada das variáveis de entrada, como a umidade da alimentação e a rotação do parafuso alimentador, sem interferência imediata das variações de temperatura. A Tabela 1 descreve esses parâmetros e suas variações controladas, assegurando a comparabilidade e a minimização de influências externas entre os tratamentos. Para atingir uma vazão mássica de alimentação de 4 kg/h, foi necessário variar a FSS de 8 a 19 rpm, em função das diferenças na densidade aparente dos materiais. Materiais de alimentação com menor densidade aparente requerem maiores valores de FSS para fornecer a vazão mássica estabelecida. A partir da Tabela 1, pode-se inferir que os tratamentos T3, T4, T7 e T8 apresentaram as menores densidades aparentes, as quais foram significativamente reduzidas pela umidade da alimentação e, em menor extensão, pela adição de grão-de-bico.

Partículas úmidas tendem a formar aglomerados e aumentar de volume, reduzindo a densidade interparticular.

A adição de grão-de-bico (X1), a umidade da alimentação (X2) e a temperatura do canhão (X3) influenciaram inversamente a energia mecânica específica (EME). X1 e X2 impactaram significativamente a EME, ambos em níveis baixos, sendo esse efeito mais pronunciado em baixas temperaturas (80 °C). A EME variou de 136,2 a 209,5 kJ/kg, atingindo valores máximos com 40% de grão-de-bico, 24% de umidade e temperatura de 80 °C (Figura 2A), e mínimos com 20% de grão-de-bico, 30% de umidade e temperatura de 120 °C (Figura 2B). A composição do material, especialmente os teores de fibra, proteína e umidade, influenciou fortemente a EME (Altaf *et al.*, 2021). Temperaturas elevadas reduziram a viscosidade da massa fundida, variando conforme o teor de fibras, a umidade e o nível de aquecimento (Delgado-Murillo *et al.*, 2024). A 80 °C, a viscosidade elevada, associada à presença de fibras e água, reduziu a energia mecânica aplicada (Bouasla e Wójtowicz, 2021).

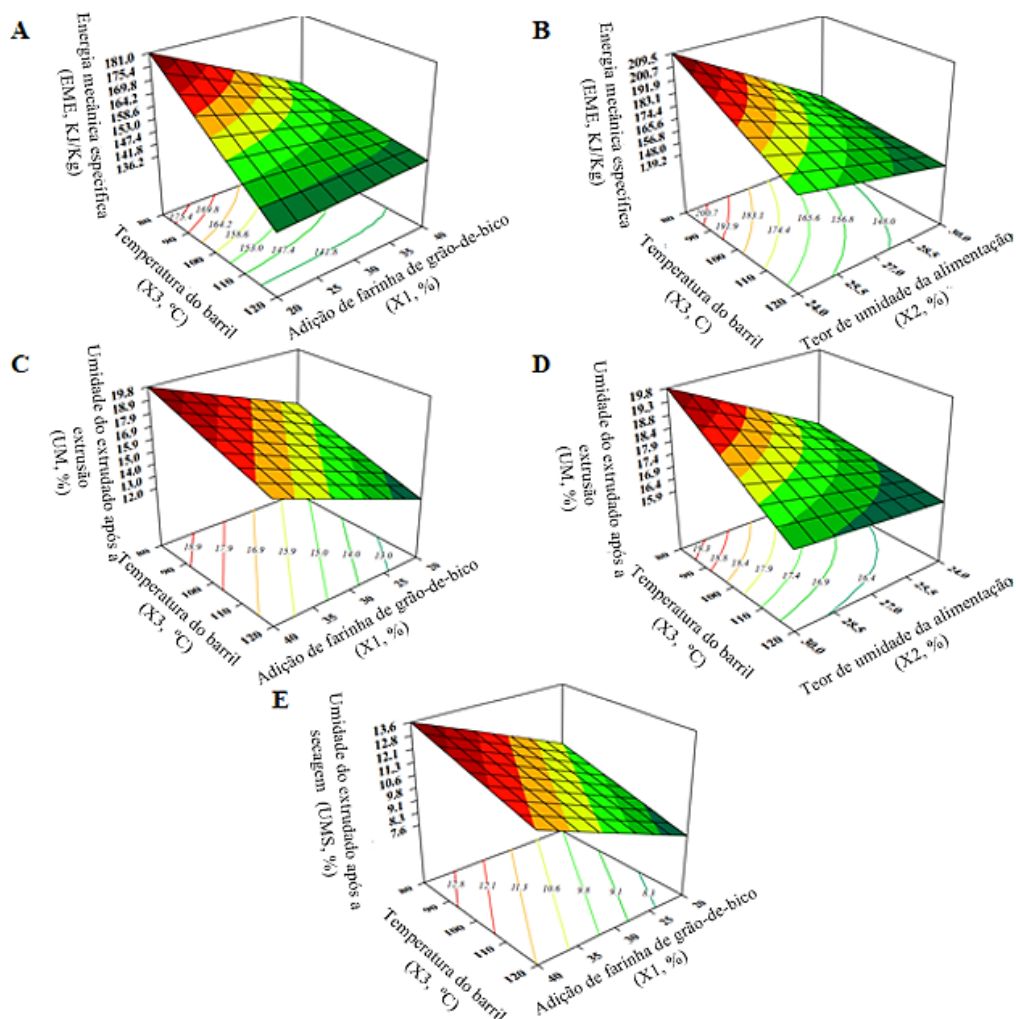
A umidade final dos extrudados antes da secagem (UM) e após a secagem (UMD) é função da umidade do material de alimentação. Além disso, a retenção de umidade aumentou com a adição de grão-de-bico e diminuiu com temperaturas de cozimento mais elevadas. Por exemplo, em X2 = 30%, o tratamento T4 (X1–X3: 40%–80 °C) apresentou os maiores valores de UM (19,08%) e UMD (14,22%), refletindo maior capacidade de retenção de água devido aos teores de fibra e proteína provenientes do grão-de-bico. Por outro lado, o tratamento T7 (X1–X3: 20%–120 °C) apresentou os menores valores de UM (11,29%) e UMD (5,77%). O efeito de X3 sobre a retenção de umidade está relacionado à maior ou menor vaporização da água em níveis elevados ou reduzidos de temperatura, respectivamente. Relacionando-se esse comportamento à EME, observa-se que maior retenção de água, associada aos teores de fibra e proteína e a menores temperaturas de cozimento, aumenta a viscosidade do material fundido e, conseqüentemente, a energia mecânica transferida por dissipação viscosa (Vargas-Solórzano *et al.*, 2020), como evidenciado pela comparação entre a EME de T4 (161,40 kJ/kg) e T7 (138,37 kJ/kg).

X1 e X2 afetaram diretamente a EM, especialmente em baixas temperaturas (80 °C). X3 afetou inversamente a EM em condições de alta umidade (30%). A EM variou de 12,0% em 20% de grão-de-bico, 30% de umidade e 120 °C (Figura 2C) a 19,8% em 40% de grão-de-bico, 30% de umidade e 80 °C (Figura 2D). A umidade dos extrudados depende da retenção de água promovida pelos teores de fibra e proteína

e da umidade inicial. Temperaturas mais baixas favoreceram a retenção de umidade pela redução da vaporização, enquanto temperaturas mais elevadas intensificaram a vaporização, reduzindo o teor de umidade (Ascheri, 2024).

X1 influenciou diretamente a umidade após a secagem (UMD), enquanto X3 exerceu efeito inverso. A UMD variou de 7,6% em 20% de grão-de-bico e 120 °C a 13,6% em 40% de grão-de-bico e 80 °C (Figura 2E). Maiores teores de fibra e proteína, associados a temperaturas mais baixas, aumentaram a retenção de umidade, demandando maior energia de secagem devido à maior densidade e à maior capacidade de retenção de água do material (Bouasla e Wójtowicz, 2021).

Figura 2 - Efeito da adição de farinha de grão-de-bico, da umidade da alimentação e da temperatura do canhão sobre a energia mecânica específica e a umidade dos extrudados antes e após a secagem



Efeito da adição de farinha de grão-de-bico, da umidade da alimentação e da temperatura do canhão sobre: (A,B) a energia mecânica específica aplicada durante o cozimento por extrusão; (C,D) a umidade dos extrudados após a extrusão; e (E) a umidade dos extrudados após a secagem. Fonte: Elaborada pela própria autora

### 3.3.4 Caracterização Física das Farinhas Extrudadas

A Tabela 1 apresenta as propriedades físicas das farinhas extrudadas (EFs). As propriedades hidrotérmicas (solubilidade e hidratação) das partículas suspensas em água foram fortemente influenciadas por todos os fatores estudados. Embora os parâmetros de cor instrumental não tenham sido estatisticamente afetados pelos fatores avaliados, foram observadas diferenças numéricas, bem como variações na aparência visual dos extrudados.

O índice de solubilidade em água (ISA) reflete o grau de degradação molecular, especialmente do amido. A maior inclusão de grão-de-bico aumentou os valores de ISA, principalmente em condições de baixa EME. Por exemplo, o tratamento T8 (40% de grão-de-bico) apresentou o maior ISA (4,31 g ss/100 g bs), enquanto o tratamento T4, também com 40% de grão-de-bico, apresentou o menor valor (1,85 g ss/100 g bs), provavelmente em função do maior estresse mecânico ( $EME = 161,40 \text{ kJ/kg}$ ), que reduziu a integridade da matriz. Em contraste, tratamentos com 20% de grão-de-bico e maior EME, como T1, apresentaram ISA moderado (2,32 g ss/100 g bs). As variações no ISA provavelmente indicam que o aumento da energia mecânica intensifica a quebra molecular, solubilizando maior quantidade de sólidos em água.

X3 impactou significativamente o ISA das EFs, especialmente em níveis mais elevados de umidade (30%). X1 influenciou significativamente o ISA em altas temperaturas (120 °C). X2 apresentou efeitos opostos dependendo da temperatura, sendo direto em altas temperaturas e inverso em baixas temperaturas (80 °C). O ISA variou de 2,3 a 4,3 g ss/100 g bs, atingindo valor máximo em 40% de grão-de-bico, 30% de umidade e 120 °C (Figura 3A) e mínimo em 20% de grão-de-bico, 30% de umidade e 80 °C (Figura 3B). A solubilização mostrou associação com a severidade do processo de extrusão, em especial com a energia térmica aplicada, a qual possivelmente esteve relacionada à degradação do amido e à desnaturação proteica. Da mesma forma, menores teores de umidade podem estar associados ao aumento da força de cisalhamento, potencializando a fragmentação de macromoléculas nas condições de 80 °C e 24% de umidade (Ascheri, 2024).

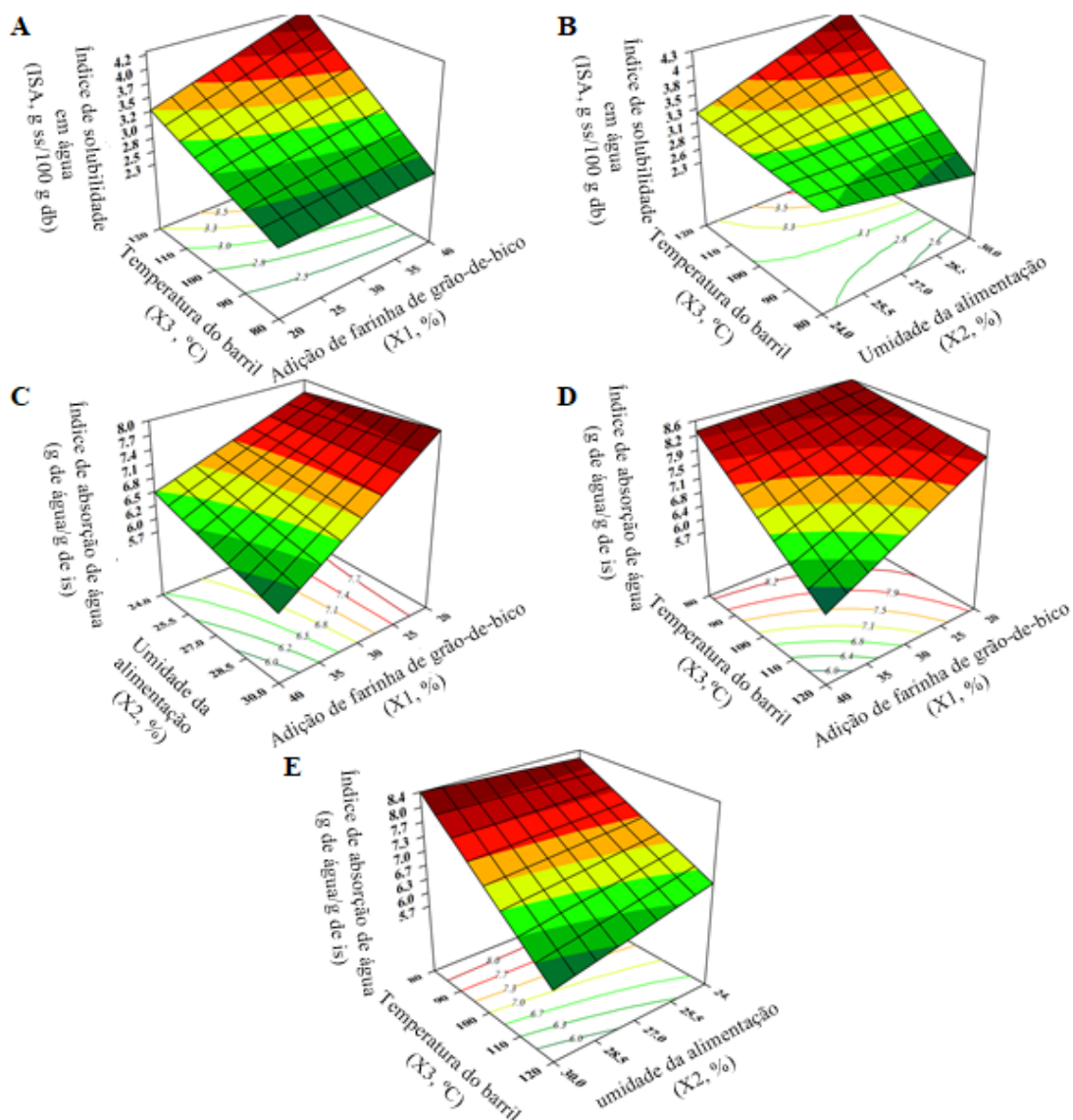
O índice de absorção de água (IAA) indica a capacidade do material de reter água, sendo influenciado pela gelatinização do amido e pelo teor de fibras. Valores mais baixos de EME, como observado em T8 ( $EME = 141,04 \text{ kJ/kg}$ ), estiveram associados a menores valores de IAA (4,31 g água/g is), enquanto valores mais

elevados de EME, como em T1 (EME = 254,39 kJ/kg), resultaram em maiores valores de IAA (7,67 g água/g is). Além disso, misturas com menor teor de grão-de-bico (T1, T3, T5) apresentaram, de modo geral, maiores valores de IAA, provavelmente devido à predominância do amido de arroz, que é mais suscetível à degradação por cisalhamento do que os componentes das leguminosas. As variações no IAA provavelmente indicam que o cisalhamento pode romper estruturas, mas também expor parcialmente sítios de ligação à água.

O IAA variou de 5,7 a 8,6 g água/g is (Figura 3C), sendo influenciado pela adição de grão-de-bico, pelo teor de umidade e pela temperatura. O menor IAA foi observado em 40% de grão-de-bico, 30% de umidade e 120 °C (Figura 3D), enquanto o maior IAA ocorreu em 20% de grão-de-bico, 30% de umidade e 80 °C (Figura 3E). A adição de grão-de-bico afetou inversamente o IAA devido à introdução de fibras insolúveis, resultando em menor absorção de água. Altos teores de umidade e temperatura expuseram resíduos proteicos hidrofóbicos, reduzindo ainda mais o IAA (Delgado-Murillo *et al.*, 2024).

Os atributos de cor foram influenciados numericamente, mas não estatisticamente, pela adição de grão-de-bico e pela temperatura do canhão (Tabela 1). A adição de grão-de-bico levou à redução dos valores de  $L^*$  (aparência mais escura), como observado em T6 ( $L^* = 87,51$ ), em comparação com misturas dominadas por arroz, como T1 ( $L^* = 90,01$ ). Esse escurecimento pode estar associado a reações de Maillard envolvendo proteínas e açúcares do grão-de-bico, especialmente em condições de alta temperatura. Em relação ao parâmetro  $a^*$  (vermelhidão), a maioria dos tratamentos apresentou valores baixos ou levemente negativos, provavelmente indicando pouca pigmentação vermelha. No entanto, T3 ( $a^* = 1,77$ ) e T6 ( $a^* = 1,05$ ) apresentaram tons avermelhados mais elevados, possivelmente devido a reações de escurecimento não enzimático mais intensas em temperaturas mais altas. O parâmetro  $b^*$ , indicativo de tonalidade amarela, aumentou com a concentração de grão-de-bico e foi, em geral, mais elevado nos tratamentos com 40% de grão-de-bico (por exemplo, T2:  $b^* = 19,04$ ; T6:  $b^* = 24,22$ ; T8:  $b^* = 20,02$ ), refletindo os pigmentos amarelos naturais do grão-de-bico e sua concentração decorrente da desidratação e do cozimento. Misturas com predominância de arroz (T1, T5) apresentaram valores menores de  $b^*$  (~15–17).

Figura 3 - Efeito da adição de farinha de grão-de-bico, da umidade da alimentação e da temperatura do canhão sobre o índice de solubilidade em água e o índice de absorção de água



Efeito da adição de farinha de grão-de-bico, da umidade da alimentação e da temperatura do canhão sobre: (A,B) o índice de solubilidade em água e (C–E) o índice de absorção de água. Fonte: Elaborada pela própria autora

### 3.3.5 Composição Química das Farinhas Extrudadas

A composição nutricional das farinhas extrudadas (EFs) (Tabela 1) foi significativamente afetada por todos os fatores estudados. A adição de farinha de grão-de-bico contribuiu para o aumento dos teores de proteínas, lipídios, cinzas e fibras alimentares, em razão de seu perfil nutricional intrinsecamente mais rico em comparação à farinha de arroz.

O teor de proteínas (PRO) aumentou proporcionalmente com a adição de grão-de-bico, como observado nos tratamentos com 40% de grão-de-bico (por exemplo, T2, T4, T6 e T8), nos quais os valores de proteína superaram consistentemente 11,2%. Em contrapartida, formulações com 20% de grão-de-bico mantiveram níveis mais baixos de proteína (~9,8%). Entretanto, os parâmetros de extrusão também modularam a retenção proteica. Por exemplo, apesar de conter 40% de grão-de-bico, o tratamento T6 apresentou teor de proteína ligeiramente inferior (11,29%) ao de T8 (11,40%), o que pode ser atribuído às diferentes energias mecânicas específicas (EME) aplicadas (163,80 versus 141,04 kJ/kg). Valores mais baixos de EME podem preservar melhor a integridade proteica, devido à menor degradação mecânica.

O teor de carboidratos (CHO) apresentou tendência de redução com o aumento da inclusão de grão-de-bico, conforme esperado. Contudo, anomalias como o tratamento T2 (75,01%), que apresentou CHO superior ao de T1 (74,32%), podem indicar que a EME e o teor de umidade influenciaram a degradação e a solubilização do amido. A menor EME em T2 (200,75 kJ/kg), em comparação a T1 (254,39 kJ/kg), pode ter contribuído para menor quebra do amido e menor solubilização, resultando em maior retenção de carboidratos mensuráveis.

O teor de lipídios (LIP) aumentou proporcionalmente à adição de grão-de-bico, com misturas contendo 40% de grão-de-bico atingindo até 2,92% (T2). Entretanto, T6 (2,77%) e T8 (2,81%) apresentaram leves reduções no teor lipídico, provavelmente em decorrência da maior temperatura do canhão (120 °C), que favorece processos de oxidação ou volatilização dos lipídios. Adicionalmente, valores mais baixos de EME (por exemplo, 138,37 kJ/kg em T7) estiveram associados a melhor retenção lipídica, uma vez que o estresse mecânico excessivo pode romper os corpos oleosos presentes no grão-de-bico.

O teor de cinzas (ASH) acompanhou de forma consistente os níveis de inclusão de grão-de-bico, com tratamentos contendo 40% apresentando valores em torno de 1,69–1,73%, refletindo o perfil mineralmente rico das leguminosas. Pequenas variações entre os tratamentos podem estar relacionadas à lixiviação mineral ou à formação de complexos durante o processamento em altas temperaturas.

A fibra alimentar (FIB) também aumentou com a adição de grão-de-bico. Os maiores valores foram observados nas misturas com 40% de grão-de-bico, especialmente em T8 (5,82%) e T2 (5,81%). Esses resultados demonstram que, apesar do processamento térmico e mecânico intenso, uma fração significativa da

fibra alimentar insolúvel foi preservada. Destaca-se que o tratamento T8, processado a alta temperatura (120 °C), manteve a integridade das fibras, possivelmente em função da menor EME aplicada, que reduziu a ruptura mecânica.

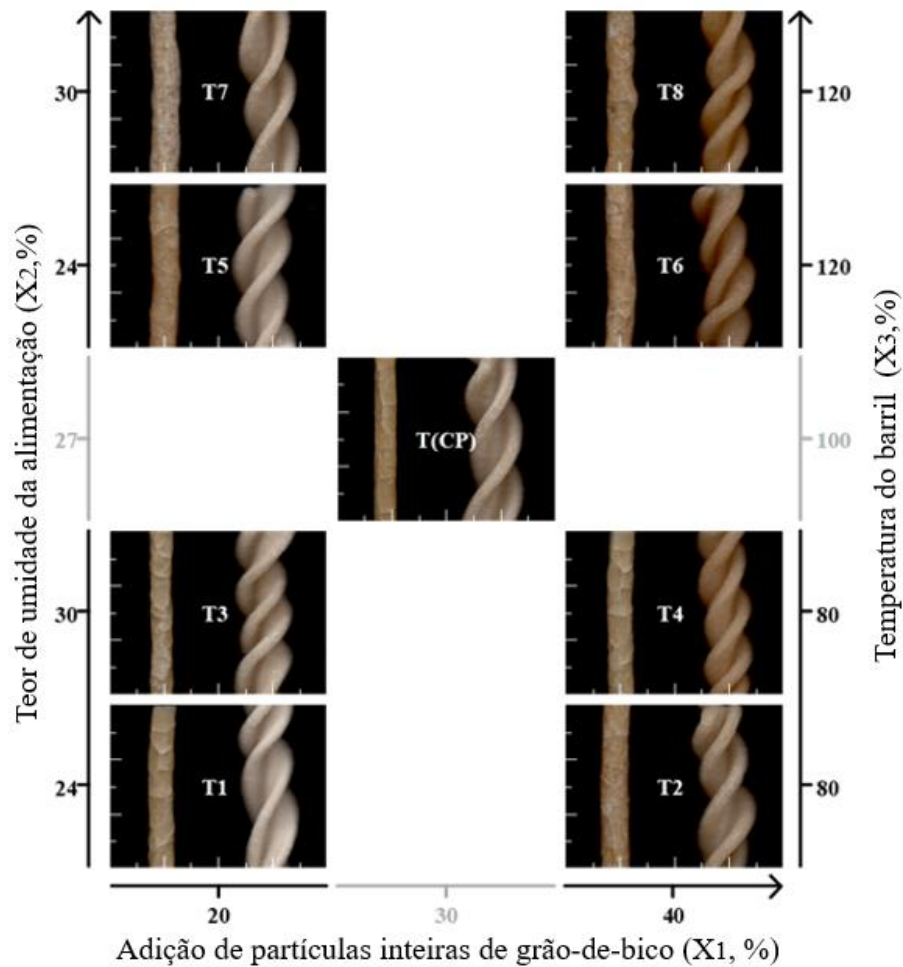
Por fim, os tratamentos com níveis intermediários de grão-de-bico (30%), como T9 a T12, apresentaram padrões nutricionais estáveis. O tratamento T11, que apresentou a menor EME (157,39 kJ/kg), resultou em valores de fibra ligeiramente superiores aos de T9 e T10, sugerindo que níveis moderados de energia mecânica favorecem a preservação de nutrientes.

### **3.3.6 Características Visuais dos Extrudados e dos Macarrões Produzidos**

A Figura 4 apresenta a expansão dos extrudados após a secagem, bem como a aparência visual da superfície e da forma dos extrudados e dos respectivos macarrões secos preparados a partir das EFs. A expansão dos extrudados foi maior quando o material de alimentação com 20% de adição de grão-de-bico foi umedecido a 24% e processado à temperatura de 80 °C no canhão (T1 em comparação a T3). O efeito da umidade da alimentação sobre a expansão dos extrudados foi menos pronunciado nos materiais com 40% de grão-de-bico (T2 em comparação a T4) e foi praticamente inexistente quando os materiais foram processados a 120 °C (T5–T8).

A coloração de ambos os produtos se tornou mais escura com a adição de 40% de grão-de-bico (tratamentos T2, T4, T6 e T8) e foi intensificada pelo aumento da temperatura do canhão (T6 e T8). Em comparação aos extrudados, a coloração dos macarrões foi mais clara nos tratamentos T1, T3 e T5 e mais escura em T4, T6 e T8. Essas diferenças refletem o efeito de interação entre a adição de grão-de-bico e a temperatura do canhão sobre a cor dos produtos finais. A retenção de água nos extrudados secos (e, conseqüentemente, nas EFs) influenciou a coloração dos macarrões secos. Farinhas extrudadas obtidas com 30% de umidade de alimentação, que apresentaram maiores valores de UMD (Tabela 1), resultaram em macarrões mais escuros quando comparadas às farinhas extrudadas com 24% de umidade de alimentação.

Figura 4 - Imagens digitalizadas dos extrudados secos e dos respectivos macarrões moldados por extrusão a frio



Dimensão da imagem: 4 cm × 3 cm. Códigos dos tratamentos de acordo com o delineamento experimental: pontos fatoriais (T1–T8) e pontos centrais (T(CP)). Fonte: Elaborada pela própria autora

A aparência mais escura dos produtos está provavelmente associada aos pigmentos presentes na farinha de grão-de-bico. A retenção de pigmentos nos extrudados aumenta com maior umidade de alimentação e menor temperatura do canhão. Além disso, os amidos e proteínas presentes nos materiais de alimentação (especialmente aqueles com 40% de adição de grão-de-bico) tendem a formar açúcares redutores e aminoácidos quando modificados durante o processo de extrusão. Sob condições de umidade moderada (30% de umidade de alimentação) e altas temperaturas (120 °C de temperatura do canhão), esses compostos favorecem reações de Maillard, levando a alterações no aroma e na cor dos extrudados (Delgado-Murillo *et al.*, 2024; Mironeasa *et al.*, 2023).

É provável que os pigmentos derivados do grão-de-bico, como polifenóis e carotenoides, reajam com amidos e proteínas durante a extrusão. O maior teor

proteico do grão-de-bico contribuiu para a melhoria da textura e da integridade estrutural do macarrão. Os complexos amido–proteína e proteína–lipídio formados no macarrão promoveram maior hidratação, elasticidade e firmeza (Mironeasa *et al.*, 2023).

O processo de extrusão promove a formação de uma rede amido–proteína–lipídio, em particular a formação de ligações de hidrogênio entre amilose e amilopectina, o que afeta significativamente as propriedades de hidratação, textura e nutricionais, neste último caso por influenciar a digestibilidade e a biodisponibilidade de nutrientes (Yeasmen *et al.*, 2025). Dessa forma, a umidade, a temperatura e as proporções dos ingredientes são fatores críticos na definição dos atributos sensoriais, nutricionais e funcionais de macarrões sem glúten, sendo essenciais para a otimização de produtos com maior apelo sensorial e aceitação pelo consumidor (Ismail *et al.*, 2021).

### 3.3.7 Caracterização dos macarrões

Após a determinação do tempo ótimo de cozimento (TOC) de cada tratamento (quatro unidades intactas de macarrão seco com aproximadamente 5 cm), foram realizados ensaios de cozimento e avaliados os parâmetros de textura nos macarrões cozidos, cujos resultados estão sumarizados na Tabela 2.

Tabela 2. Médias dos testes de cozimento e dos parâmetros de textura dos macarrões

| Tratamento | Testes de cozimento <sup>1</sup> |           |           |            | Parâmetros de textura <sup>2</sup> |         |         |           |        |
|------------|----------------------------------|-----------|-----------|------------|------------------------------------|---------|---------|-----------|--------|
|            | TOC<br>(min)                     | IM<br>(%) | AV<br>(%) | PSS<br>(%) | DU<br>(N)                          | EL<br>- | CO<br>- | GM<br>(N) | MC (N) |
| T1         | 10                               | 145,82    | 155,60    | 5,86       | 29,17                              | 0,93    | 0,74    | 21,09     | 19,70  |
| T2         | 11                               | 165,93    | 154,12    | 10,17      | 14,04                              | 0,88    | 0,73    | 10,17     | 9,54   |
| T3         | 10                               | 151,51    | 160,02    | 9,11       | 19,50                              | 1,09    | 0,79    | 15,64     | 14,09  |
| T4         | 10                               | 172,50    | 205,04    | 7,72       | 9,21                               | 2,30    | 0,80    | 7,12      | 9,21   |
| T5         | 9                                | 143,94    | 151,99    | 6,48       | 4,56                               | 2,05    | 0,75    | 3,45      | 4,49   |
| T6         | 9                                | 147,36    | 152,40    | 6,53       | 6,51                               | 2,02    | 0,73    | 5,52      | 5,20   |
| T7         | 9                                | 139,37    | 147,07    | 8,72       | 20,15                              | 0,94    | 0,75    | 15,13     | 13,67  |
| T8         | 9                                | 138,51    | 160,44    | 4,12       | 14,11                              | 1,07    | 0,84    | 11,47     | 11,19  |
| T9         | 9                                | 158,76    | 191,59    | 9,06       | 4,12                               | 2,22    | 0,77    | 3,02      | 3,11   |
| T10        | 10                               | 155,36    | 175,28    | 8,68       | 5,70                               | 0,95    | 0,71    | 3,15      | 3,02   |
| T11        | 10                               | 156,39    | 176,36    | 7,77       | 5,11                               | 2,21    | 0,79    | 4,17      | 4,14   |
| T12        | 10                               | 152,02    | 152,55    | 9,25       | 18,52                              | 0,89    | 0,71    | 12,08     | 10,04  |

<sup>1</sup>Média de 3 repetições; <sup>2</sup> Média de 16 repetições; TOC: tempo ótimo de cozimento; IM: incremento de massa; AV: aumento de volume; PSS: perda de sólidos solúveis; DU: dureza; EL:

elasticidade; CO: coesividade; GM: gomosidade; MC: mastigabilidade. Fonte: Elaborada pela própria autora.

### 3.3.7.1 Ensaios de cocção

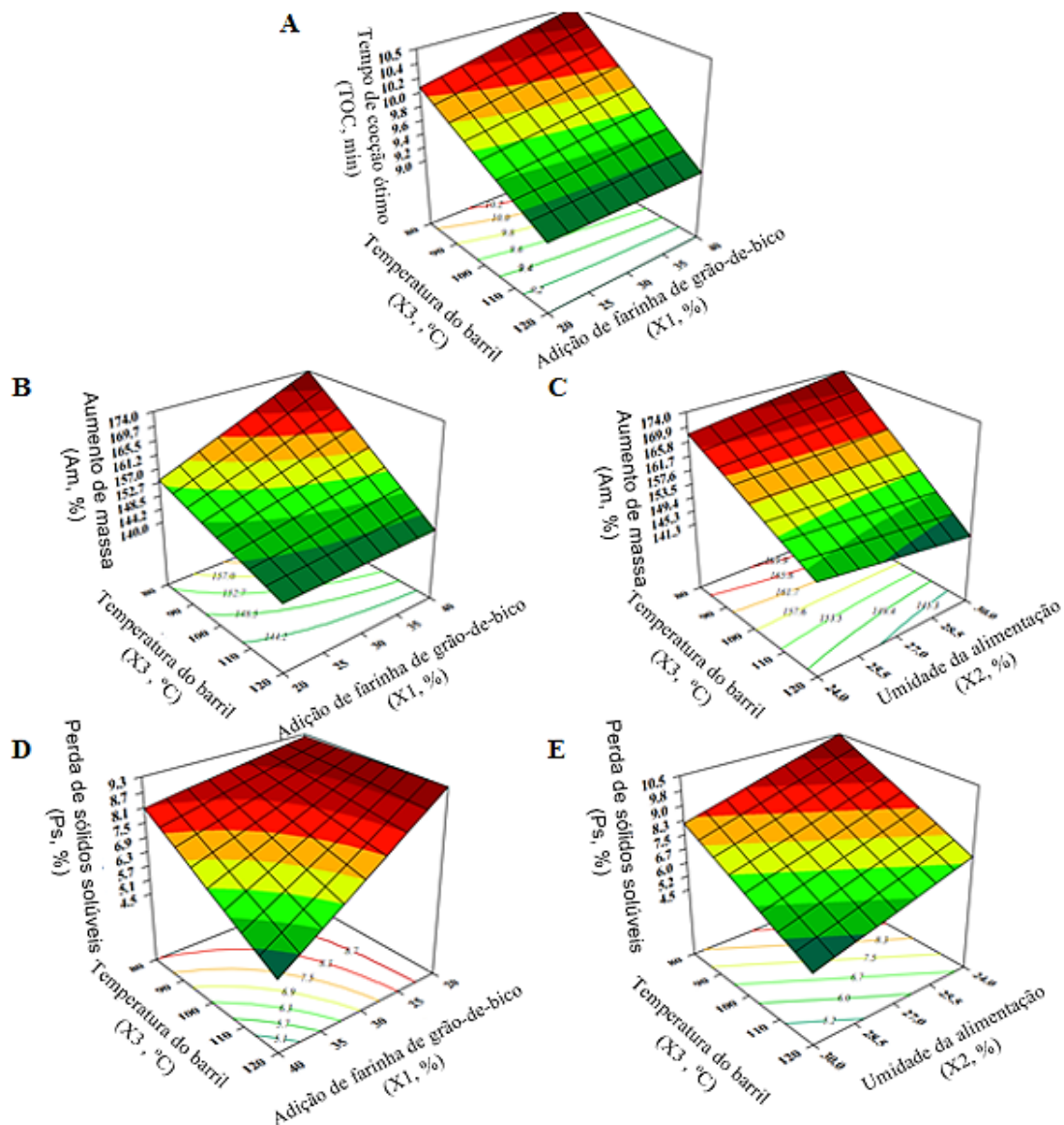
Os ensaios de cozimento são essenciais para a avaliação da qualidade do macarrão. O tempo ótimo de cozimento (TOC) variou entre 9 e 11 min; o tratamento T2 apresentou o maior tempo (11 min), o que é atribuído ao maior teor de grão-de-bico, que requer maior tempo para hidratação e gelatinização. A maioria dos tratamentos apresentou tempo de cozimento entre 9 e 10 min, provavelmente indicando conversão eficiente do amido promovida pela extrusão, com redução do tempo de cozimento (Bayomy e Alamri, 2022).

A Figura 5A apresenta o TOC dos macarrões, o qual foi levemente influenciado por X1 em proporção direta apenas em baixas temperaturas (80 °C), enquanto X3 impactou o TOC de forma significativa e inversa. Valores mais elevados de TOC foram observados a 80 °C, enquanto valores mais baixos ocorreram a 120 °C, condição necessária para eliminar o núcleo opaco do macarrão (Ahmed *et al.*, 2024).

O incremento de massa (IM) e o aumento de volume (AV) refletem a capacidade de absorção de água. Os tratamentos T4 (172,50%) e T9 (158,76%) apresentaram os maiores valores de IM, enquanto o tratamento T7 apresentou o menor valor (139,37%). Valores elevados de IM indicam maior absorção de água, associada à presença de componentes hidrofílicos, como amido e fibras (hemicelulose). O AV foi maior no tratamento T4 (205,04%) e menor no tratamento T7 (147,07%), provavelmente indicando maior hidratação e expansão para o tratamento T4.

A variável X3 influenciou diretamente o incremento de massa (IM) do macarrão, especialmente em níveis mais elevados de grão-de-bico. A variável X2 afetou diretamente o IM de forma mais pronunciada em altas temperaturas (120 °C), porém apresentou efeito inverso em temperaturas mais baixas (80 °C). O IM variou de 140,0% em formulações com 20% de grão-de-bico, 30% de umidade e temperatura de 120 °C (Figura 5B) até 172,50% em formulações com 40% de grão-de-bico, 30% de umidade e temperatura de 80 °C (Figura 5C).

Figura 5 - Efeito da adição de farinha de grão-de-bico, da umidade de alimentação e da temperatura do canhão sobre o tempo ótimo de cozimento, o incremento de massa e a perda de sólidos solúveis



Efeito da adição de farinha de grão-de-bico, da umidade de alimentação e da temperatura do canhão sobre (A) o tempo ótimo de cozimento; (B, C) o incremento de massa; e (D, E) a perda de sólidos solúveis. Fonte: Elaborada pela própria autora

A perda de sólidos solúveis (PSS), indicativa da integridade do macarrão, foi mais elevada nos tratamentos T2 (10,17%) e T3 (9,11%), provavelmente indicando interações amido-proteína mais fracas. O tratamento T8 apresentou a menor PSS (4,12%), refletindo melhor retenção estrutural durante o cozimento (Namir *et al.*, 2022). A variável X1 afetou significativamente a PSS nos macarrões cozidos, especialmente em altas temperaturas (120 °C), sendo esse efeito menos pronunciado a 80 °C (Figura 5D). As variáveis X2 e X3 influenciaram a PSS de forma inversa

(Figura 5E), a qual variou de 4,5% (40% de grão-de-bico, 30% de umidade, 120 °C) a 10,5% (40% de grão-de-bico, 24% de umidade, 80 °C).

### 3.3.7.2 Análise do perfil de textura

Os parâmetros da análise do perfil de textura revelam a qualidade do macarrão e, indiretamente, as preferências sensoriais do consumidor, especialmente em relação à percepção da textura *al dente*, conforme relatado em estudos anteriores. A dureza (DU), definida como a força de compressão, apresentou os maiores valores nos tratamentos T1 (29,17 N) e T7 (20,15 N), provavelmente indicando textura mais firme. Os tratamentos T9 (4,12 N) e T5 (4,56 N) apresentaram os menores valores de dureza, provavelmente indicando texturas mais macias. As diferenças de dureza entre os tratamentos estão relacionadas à conversão do amido e à desnaturação das proteínas, provavelmente influenciadas pelas proteínas do grão-de-bico (Altaf *et al*, 2021).

A elasticidade (EL), definida como a capacidade do macarrão de recuperar sua forma após deformação, foi maior nos tratamentos T4 (2,30) e T9 (2,22) e menor no tratamento T2 (0,88). Valores elevados de elasticidade estão associados à formação eficiente de ligações cruzadas entre amilose, amilopectina e proteínas, sendo essenciais para a manutenção do formato do fusilli após o cozimento (Ahmed *et al.*, 2024).

A coesividade (CO), definida como a força de ligação interna, variou entre 0,84 (T8) e 0,71 (T10 e T12). Valores mais elevados de CO provavelmente indicam interações moleculares mais fortes, contribuindo para maior integridade estrutural do macarrão. A gomosidade (GO) e a mastigabilidade (MA) refletem a firmeza e a resistência à mastigação. Os maiores valores de GO foram observados nos tratamentos T1 (21,09 N) e T7 (15,13 N), correlacionando-se com a dureza, enquanto os tratamentos T9 (3,02 N) e T10 (3,15 N) apresentaram os menores valores. A mastigabilidade foi maior nos tratamentos T1 (19,70 N) e T3 (14,09 N) e menor nos tratamentos T10 (3,02 N) e T9 (3,11 N), confirmando uma mordida mais macia [8].

Quanto à correlação entre os testes de cozimento e os parâmetros de textura, observou-se que maiores incrementos de massa e volume, como nos tratamentos T4 e T9, estiveram associados a texturas mais macias, sugerindo hidratação excessiva, que comprometeu a firmeza do macarrão. A PSS apresentou correlação inversa com

a coesividade, conforme observado nos tratamentos T2 e T12, que apresentaram elevados valores de PSS e menor CO, provavelmente devido à lixiviação do amido, enfraquecendo a integridade estrutural. A dureza apresentou correlação positiva com a mastigabilidade, provavelmente indicando que macarrões mais firmes exigem maior esforço mastigatório (Delgado-Murillo *et al.*, 2024).

A influência dos fatores estudados foi evidente entre os tratamentos. Maior umidade durante a extrusão favoreceu a hidratação, porém pode reduzir a integridade estrutural (Mironeasa *et al.*, 2023). A menor dureza observada nos tratamentos T9 e T5 provavelmente indica conversão excessiva do amido, resultando em textura mais macia. Temperaturas mais elevadas intensificaram as interações amido–proteína, podendo ter promovido a degradação do amido e, conseqüentemente, afetado a firmeza (Ahmed *et al.*, 2024). Tratamentos produzidos em temperaturas elevadas (por exemplo, T4 e T8) apresentaram maior elasticidade e coesividade, em detrimento do aumento da gomosidade quando a degradação do amido foi excessiva durante o cozimento por extrusão.

Quanto à formulação dos ingredientes, as proporções entre farinha de grão-de-bico e farinha de arroz influenciaram as interações da matriz proteína–amido. Estudos relatam que as proteínas do grão-de-bico aumentam a elasticidade e a coesividade; entretanto, quantidades excessivas elevam a perda de sólidos solúveis, afetando negativamente a integridade estrutural (Bayomy e Alamri, 2022).

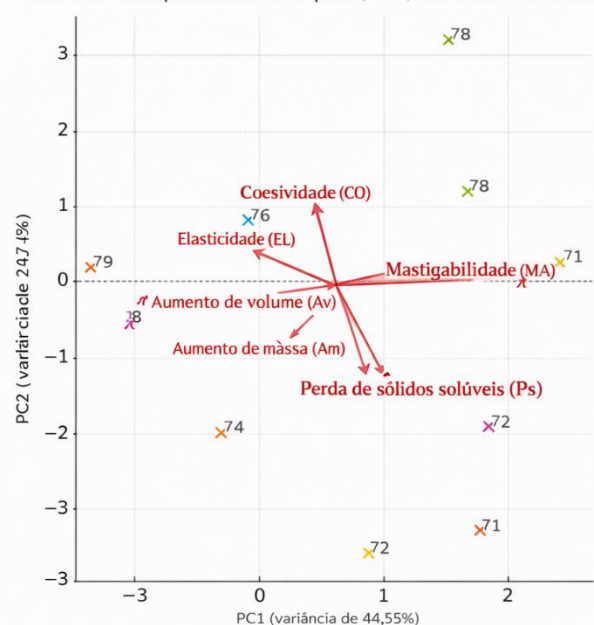
Assim, a obtenção de textura ideal em macarrões sem glúten requer o equilíbrio entre hidratação, parâmetros de processamento e composição dos ingredientes. Os tratamentos T1, T3 e T7 apresentaram texturas mais firmes, provavelmente indicando melhores interações proteína–amido e níveis adequados de gelatinização do amido. Texturas mais macias observadas nos tratamentos T5 e T9 podem influenciar negativamente a preferência do consumidor. Hidratação moderada, cozimento controlado e proporções otimizadas entre proteínas e amido são essenciais para alcançar macarrões de alta qualidade, com textura desejável e estabilidade estrutural (Cotovanu *et al.*, 2023).

As variações entre os tratamentos nos testes de cozimento e nos parâmetros de textura foram visualizadas por meio da análise de componentes principais (ACP, Figura 6A) e de gráficos radar (Figura 6B), que ilustram os impactos dos parâmetros de cozimento e textura, enfatizando o equilíbrio complexo necessário entre formulação

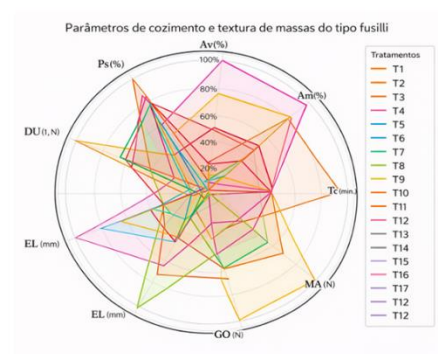
e processamento para obter características desejáveis em macarrões sem glúten (Delgado-Murillo *et al.*, 2024).

Figura 6 - Análise de componentes principais (ACP) e gráfico radar baseados nos parâmetros de cocção e textura dos macarrões

Análise de Componentes Principais (ACP) de Testes de Cozimento e Parâmetros de Textura



(A)



(B)

(A) Gráfico da análise de componentes principais (ACP) e (B) gráfico radar, ambos baseados nos parâmetros de cocção e textura; OCT: tempo ótimo de cozimento; MI: aumento de massa; VI: aumento de volume; SSL: perda de sólidos solúveis; HA: dureza; EL: elasticidade; CO: coesividade; GO: gomosidade; CW: mastigabilidade. Fonte: Elaborada pela própria autora

Esses resultados demonstram que a produção ideal de massas sem glúten envolve o equilíbrio cuidadoso entre a adição de farinha de grão-de-bico, os níveis de umidade e as temperaturas de extrusão, a fim de alcançar propriedades desejáveis de cozimento e textura.

### 3.4 Conclusão

O presente estudo teve como objetivo desenvolver massas do tipo fusilli sem glúten a partir de farinhas extrusadas de arroz japonês e grão-de-bico, bem como avaliar suas propriedades de cocção, parâmetros de textura e características estruturais gerais. Os resultados demonstram que a composição da formulação, as condições de processamento (teor de umidade e temperatura de extrusão) e as

interações entre os ingredientes influenciaram significativamente os atributos de qualidade do produto final.

O aumento da proporção de farinha de grão-de-bico resultou em massas mais escuras, provavelmente devido aos pigmentos naturais presentes no grão-de-bico, efeito intensificado pelos maiores níveis de umidade e energia térmica durante a extrusão. O tempo ótimo de cozimento variou ligeiramente entre as formulações, situando-se entre 9 e 11 minutos. Maiores aumentos de massa e volume foram observados nos tratamentos com maior teor de grão-de-bico, possivelmente em razão da maior capacidade de absorção de água das proteínas e amidos de origem leguminosa.

Entretanto, o aumento do teor de água durante a extrusão (30%) levou a maiores perdas de sólidos (SSL), provavelmente indicando que algumas formulações apresentaram maior solubilização do amido e potencial comprometimento da integridade estrutural. Uma formulação ótima deve envolver uma proporção equilibrada de farinhas de arroz e grão-de-bico, mantendo um nível de umidade de extrusão em torno de 25%, de modo a garantir hidratação adequada e, ao mesmo tempo, minimizar perdas excessivas de sólidos. Uma mistura binária composta por 40% de farinha de grão-de-bico e 60% de arroz japonês, umedecida a 30% e processada por extrusão a 80 °C, assegurou eficiência no processamento.

Esses achados ressaltam a importância do ajuste fino dos parâmetros de extrusão e da composição das formulações para a obtenção de massas sem glúten de alta qualidade. O estudo contribui para o crescente campo de desenvolvimento de massas alternativas ao demonstrar como as interações entre ingredientes, o teor de umidade e as condições de processamento podem ser manipulados para melhorar o desempenho tecnológico e a qualidade nutricional de massas sem glúten. Estudos futuros devem concentrar-se no refinamento das estratégias de formulação, na avaliação da aceitação sensorial e na análise da estabilidade durante o armazenamento a longo prazo, visando garantir a viabilidade comercial do produto.

## REFERÊNCIAS

AACC. **Approved methods of the American Association of Cereal Chemists**. 9. ed. Saint Paul: AACC, 1995. v. 1–2.

AHMED, M. W.; JOTHI, J. S.; SAIFULLAH, M.; HANNAN, M. A.; MOHIBBULLAH, M. Impact of drying temperature on textural, cooking quality, and microstructure of gluten-free noodle. In: GULL, A.; NAYIK, G. A.; BRENNAN, C. (org.). **Development of gluten-free noodle**. Amsterdam: Elsevier, 2024. p. 65–110.

ALTAF, U.; HUSSAIN, S. Z.; QADRI, T.; IFTIKHAR, F.; NASEER, B.; RATHER, A. H. Investigation on mild extrusion cooking for development of snacks using rice and chickpea flour blends. **Journal of Food Science and Technology**, v. 58, p. 1143–1155, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04692-9>.

AOAC. **Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists**. 18. ed. Washington, DC: AOAC, 2010.

ASCHERI, J. L. R. Why food technology by extrusion-cooking? **Discoveries in Agriculture and Food Sciences**, v. 12, n. 4, p. 110–144, 2024. DOI: <https://doi.org/10.14738/tnc.124.17453>.

BAYOMY, H.; ALAMRI, E. Technological and nutritional properties of instant noodles enriched with chickpea or lentil flour. **Journal of King Saud University – Science**, v. 34, p. 101833, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.101833>.

BEGUM, N.; KHAN, Q. U.; LIU, L. G.; LI, W.; LIU, D.; HAQ, I. U. Nutritional composition, health benefits and bio-active compounds of chickpea (*Cicer arietinum* L.). **Frontiers in Nutrition**, v. 10, p. 1218468, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1218468>.

BLANDINO, M.; BRESCIANI, A.; LOCATELLI, M.; LOSCALZO, M.; TRAVAGLIA, F.; VANARA, F.; MARTI, A. Pulse type and extrusion conditions affect phenolic profile and physical properties of extruded products. **Food Chemistry**, v. 403, p. 134369, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134369>.

BLIGH, E. G.; DYER, W. J. A rapid method of total lipid extraction and purification. **Canadian Journal of Biochemistry and Physiology**, v. 37, p. 911–917, 1959. DOI: <https://doi.org/10.1139/o59-099>.

BOUASLA, A.; WÓJTOWICZ, A. Gluten-free rice instant noodle: effect of extrusion-cooking parameters on selected quality attributes and microstructure. **Processes**, v. 9, p. 693, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr9040693>.

BOUASLA, A.; WÓJTOWICZ, A.; ZIDOUNE, M. N. Gluten-free precooked rice noodle enriched with legume flours: physical properties, texture, sensory attributes and microstructure. **LWT – Food Science and Technology**, v. 74, p. 67–75, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.07.015>.

COTOVANU, I.; MIRONEASA, S.; UNGUREANU-IUGA, M.; MIRONEASA, C. Effect of extrusion parameters on the extruded products features. In: **International Multidisciplinary Scientific GeoConference – SGEM**. Sofia, 2023. v. 23.

DELGADO-MURILLO, S. A.; ZAZUETA-MORALES, J. D.; QUINTERO-RAMOS, A.; CASTRO-MONTOYA, Y. A.; RUIZ-ARMENTA, X. A.; LIMÓN-VALENZUELA, V.; DELGADO-NIEBLAS, C. I. Effect of the extrusion process on the physicochemical, phytochemical, and cooking properties of gluten-free noodle made from broken rice and chickpea flours. **Biotechnia**, v. 26, p. 112–121, 2024.

GREMA SQUI, I. L. A.; GIMÉNEZ, M. A.; LOBO, M. O.; SAMMÁN, N. C.; DÍAZ-CALDERÓN, P. Effect of the addition of hydrolyzed broad bean flour (*Vicia faba* L.) on the functional, pasting and rheological properties of a wheat–broad bean flour paste. **Food Measurement**, v. 19, p. 1362–1372, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11694-023-02077-7>.

HASHIM, N.; ALI, M. M.; MAHADI, M. R.; ABDULLAH, A. F.; WAYAYOK, A.; KASSIM, M. S. M.; JAMALUDDIN, A. Smart farming for sustainable rice production: an insight into application, challenge, and future prospect. **Rice Science**, v. 31, p. 47–61, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2023.11.004>.

IJIMA, K.; SUZUKI, K.; HORI, K.; EBANA, K.; KIMURA, K.; TSUJII, Y.; TAKANO, K. Endosperm enzyme activity is responsible for texture and eating quality of cooked rice grains in Japanese cultivars. **Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry**, v. 83, n. 3, p. 502–510, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/09168451.2018.1559622>.

ISMAIL, B. B.; GAMBO, A.; GARBA, U.; AYUB, K. A. Gluten-free noodle's consumer appeal and qualities. In: GULL, A.; NAYIK, G. A.; BRENNAN, C. (org.). **Development of gluten-free noodle**. Amsterdam: Elsevier, 2021. p. 1–18.

MIRONEASA, S.; COTOVANU, I.; MIRONEASA, C.; UNGUREANU-IUGA, M. A review of the changes produced by extrusion cooking on the bioactive compounds from vegetal sources. **Antioxidants**, v. 12, p. 1453, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox12081453>.

MORDOR INTELLIGENCE RESEARCH & ADVISORY. **Tamanho do mercado de alimentos e bebidas sem glúten do Brasil e análise de ações: tendências e previsões de crescimento (2024–2029)**. 2024. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/brazil-gluten-free-foods-beverages-market-industry>. Acesso em: 19 jun. 2024.

NAMIR, M.; ISKANDER, A.; ALYAMANI, A.; SAYED-AHMED, E. T. A.; SAAD, A. M.; ELSAHY, K.; EL-TARABILY, K. A.; CONTE-JUNIOR, C. A. Upgrading common wheat noodle by fiber-rich fraction of potato peel byproduct at different particle sizes: effects on physicochemical, thermal, and sensory properties. **Molecules**, v. 27, p. 2868, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27092868>.

RAMOS, M. J. S.; ROCHA, E. B. M.; GUSMÃO, T. A. S.; NASCIMENTO, A.; LISBOA, H. M.; GUSMÃO, R. P. Optimizing gluten-free noodle quality: the impacts of transglutaminase concentration and kneading time on cooking properties, nutritional

value, and rheological characteristics. **LWT – Food Science and Technology**, v. 189, p. 115485, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115485>.

ROMERO RODRÍGUEZ, J. A.; ASCHERI, J. L. R.; LOPES, A. J. S.; VARGAS-SOLÓRZANO, J. W.; PACHECO, S.; JESUS, M. S. C. Physical characterization of maize grits expanded snacks and changes in the carotenoid profile. **Plant Foods for Human Nutrition**, v. 76, p. 68–75, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11130-020-00867-0>.

SCARTON, M.; CLERICI, M. T. P. S. Gluten-free noodles: ingredients and processing for technological and nutritional quality improvement. **Food Science and Technology**, v. 42, p. e65622, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/fst.65622>.

SUO, X.; DALL'ASTA, M.; GIUBERTI, G.; MINUCCIANI, M.; WANG, Z.; VITTADINI, E. The effect of chickpea flour and its addition levels on quality and in vitro starch digestibility of corn–rice-based gluten-free noodle. **International Journal of Food Sciences and Nutrition**, v. 73, n. 5, p. 600–609, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/09637486.2021.1996133>.

VARGAS-SOLÓRZANO, J. W.; ASCHERI, J. L. R.; CARVALHO, C. W. P.; TAKEITI, C. Y. Impact of the pretreatment of grains on the interparticle porosity of feed material and the torque supplied during the extrusion of brown rice. **Food and Bioprocess Technology**, v. 13, p. 88–100, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02373-4>.

VARGAS-SOLÓRZANO, J. W.; CARVALHO, C. W. P.; TAKEITI, C. Y.; ASCHERI, J. L. R.; QUEIROZ, V. A. V. Physicochemical properties of expanded extrudates from colored sorghum genotypes. **Food Research International**, v. 55, p. 37–44, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.10.036>.

WU, C.; GONG, X.; ZHANG, J.; ZHANG, C.; QIAN, J. Y.; ZHU, W. Effect of rice protein on the gelatinization and retrogradation properties of rice starch. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 242, p. 125061, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125061>.

YEASMEN, N.; ORSAT, V. Industrial processing of chickpeas (*Cicer arietinum*) for protein production. **Crop Science**, v. 65, p. e21361, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1002/csc2.1361>.

### **CAPÍTULO III**

**EFEITO DE HIDROCOLIDES E ADIÇÃO DE OVO NAS CARACTERÍSTICAS  
FÍSICAS E QUÍMICAS DE MACARRÃO TIPO *FUSILLI* ELABORADOS COM  
ARROZ JAPONÊS**

#### **4 CAPÍTULO III: Efeito de Hidrocolóides e Adição de Ovo nas Características Físicas e Químicas de Macarrão Tipo *Fusilli* Elaborados com Arroz Japonês**

##### **RESUMO**

A crescente demanda por massas sem glúten tem impulsionado estratégias de formulação capazes de compensar a ausência da rede de glúten e, simultaneamente, melhorar o perfil nutricional. Este estudo teve como objetivo desenvolver e otimizar macarrões tipo fusilli sem glúten produzidos com farinha crua de arroz japonês e farinha pré-cozida por extrusão (mistura arroz japonês e grão-de-bico), avaliando os efeitos da proporção de farinha extrudada, do hidrocoloide (gelana ou ágar) e da incorporação de ovo em pó nas propriedades tecnológicas, estruturais, sensoriais e funcionais. As formulações seguiram um delineamento fatorial completo  $2^3$  e foram processadas por extrusão a frio e secagem controlada. Determinaram-se parâmetros de cozimento (tempo ótimo, aumento de massa/volume e perda de sólidos), perfil de textura, atividade antioxidante, digestibilidade proteica *in vitro* e composição proximal, além de caracterizações complementares (granulometria e SDS-PAGE). O tempo de cozimento ótimo variou entre 8–10 min, com tendência de redução em formulações com maior teor de farinha extrudada. A substituição parcial (50%) aumentou o intumescimento, enquanto a gelana reduziu a perda de sólidos e elevou a firmeza (dureza  $>12$  N), com efeito sinérgico do ovo em pó. A otimização indicou como melhor desempenho para 50% farinha extrudada + gelana + ovo (desejabilidade  $>0,45$ ), corroborado por maior aceitação sensorial. A extrusão elevou a atividade antioxidante da farinha (6,68→9,48  $\mu\text{mol Trolox/g}$ ) e a incorporação do grão-de-bico aumentou proteínas e fibra alimentar. Conclui-se que a combinação 50% farinha extrudada, gelana e ovo em pó é uma estratégia promissora para fusilli sem glúten com melhor desempenho tecnológico e perfil nutricional superior, com potencial industrial.

Palavras-chaves: Macarrão sem glúten; Farinha extrudada; Arroz japonês; Grão-de-bico; Qualidade tecnológica

## ABSTRACT

The growing demand for gluten-free pasta has driven formulation strategies capable of compensating for the absence of the gluten network while simultaneously improving the nutritional profile. This study aimed to develop and optimize gluten-free fusilli pasta produced with raw Japanese rice flour and extruded pre-cooked flour (mixture of Japanese rice and chickpeas), evaluating the effects of the proportion of extruded flour, hydrocolloid (gellan or agar), and the incorporation of egg powder on technological, structural, sensory, and functional properties. The formulations followed a full  $2^3$  factorial design and were processed by cold extrusion and controlled drying. Cooking parameters (optimal time, mass/volume increase, and solids loss), texture profile, antioxidant activity, in vitro protein digestibility, and proximate composition were determined, in addition to complementary characterizations (particle size distribution and SDS-PAGE). The optimal cooking time ranged from 8–10 min, with a tendency to decrease in formulations with a higher content of extruded flour. Partial substitution (50%) increased swelling, while gellan reduced solids loss and increased firmness (hardness  $>12$  N), with a synergistic effect from the egg powder. Optimization indicated the best performance for 50% extruded flour + gellan + egg (desirability  $>0.45$ ), corroborated by greater sensory acceptance. Extrusion increased the antioxidant activity of the flour (6.68→9.48  $\mu\text{mol Trolox/g}$ ) and the incorporation of chickpeas increased protein and dietary fiber. It is concluded that the combination of 50% extruded flour, gellan, and egg powder is a promising strategy for gluten-free fusilli with better technological performance and a superior nutritional profile, with industrial potential.

**Keywords:** Gluten-free pasta; Extruded flour; Japanese rice; Chickpeas; Technological quality

## 4.1 Introdução

O desenvolvimento de massas alimentícias sem glúten com desempenho tecnológico, qualidade sensorial e valor nutricional adequados constitui um desafio relevante para a ciência e tecnologia de alimentos (Aljada *et al.*, 2021; Bouasla e Wójtowicz, 2021). A ausência da rede proteica do glúten compromete a estrutura, a textura e a estabilidade desses produtos, exigindo a adoção de estratégias de formulação e processamento capazes de reproduzir, ao menos parcialmente, as propriedades viscoelásticas típicas das massas tradicionais (Delgado-Murillo *et al.*, 2024). Adicionalmente, cresce a demanda por produtos sem glúten que apresentem melhor perfil nutricional e funcional, incluindo menor resposta glicêmica e maior aporte de compostos bioativos (Wang *et al.*, 2023).

Nesse contexto, o uso de matérias-primas alternativas, como o arroz e o grão-de-bico, associado a tecnologias de processamento avançadas, tem se mostrado uma estratégia promissora (Romano *et al.*, 2021). O arroz destaca-se por sua ampla aceitação sensorial, digestibilidade e ausência natural de glúten (Qin *et al.*, 2021), enquanto o grão-de-bico contribui com maior teor proteico, fibras e compostos bioativos (Kore *et al.*, 2022). Entretanto, a simples combinação desses ingredientes não garante, por si só, propriedades tecnológicas adequadas, sendo necessária a aplicação de técnicas capazes de modificar a estrutura da matriz alimentar (Delgado-Murillo *et al.*, 2024).

A extrusão termoplástica tem sido amplamente empregada como ferramenta tecnológica para o pré-cozimento de farinhas, promovendo gelatinização parcial do amido, desnaturação proteica e alterações na organização estrutural dos biopolímeros (Ascheri, 2022). Essas modificações favorecem a formação de massas mais coesas, com melhor capacidade de retenção de água e maior estabilidade durante o cozimento, aspectos essenciais para produtos sem glúten. Assim, o pré-tratamento por extrusão de farinhas de arroz e de grão-de-bico apresenta potencial para melhorar o desempenho tecnológico das massas alimentícias (Jalgaonkar *et al.*, 2019).

Além do processamento, a formulação exerce papel determinante na qualidade final do produto. A incorporação de hidrocolóides, como ágar e gelana, tem sido amplamente investigada em sistemas sem glúten devido à sua capacidade de formar redes tridimensionais, aumentar a viscosidade da fase contínua e contribuir para a estruturação da massa (Wang *et al.*, 2023). A adição de ingredientes proteicos, como

o ovo em pó, também pode atuar como coadjuvante tecnológico, reforçando a matriz estrutural e influenciando positivamente atributos de textura e aceitação sensorial (Romano *et al.*, 2021).

Diante da complexidade das interações entre ingredientes e processamento, torna-se fundamental empregar delineamentos experimentais adequados que permitam avaliar, de forma sistemática, os efeitos das variáveis de formulação e suas interações sobre as propriedades do produto final (Jalgaonkar *et al.*, 2019). A caracterização tecnológica das massas, incluindo parâmetros de cozimento, textura e estabilidade, associada à avaliação nutricional e funcional, fornece subsídios para a otimização de formulações sem glúten com melhor desempenho global (Wang *et al.*, 2023).

Adicionalmente, a aceitação sensorial representa um fator decisivo para a viabilidade de novos produtos alimentícios (Romano *et al.*, 2021). Mesmo formulações tecnologicamente estáveis e nutricionalmente adequadas podem não ser bem-sucedidas caso não atendam às expectativas do consumidor. Assim, a avaliação sensorial, conduzida de forma ética e controlada, constitui etapa essencial no desenvolvimento de massas alimentícias sem glúten (Bouasla e Wójtowicz, 2021).

Dessa forma, este trabalho teve como propósito desenvolver, otimizar e caracterizar massas alimentícias sem glúten elaboradas com farinhas de arroz e de grão-de-bico, cruas ou pré-cozidas por extrusão, utilizando hidrocolóides e ingredientes coadjuvantes, avaliando seus efeitos sobre as propriedades tecnológicas, nutricionais, funcionais e sensoriais do produto final.

## **4.2 Revisão da Literatura**

A produção de massas alimentícias isentas de glúten tem sido intensamente investigada como alternativa tecnológica e nutricional aos produtos tradicionais elaborados com trigo, sobretudo para atender indivíduos com doença celíaca e consumidores que buscam diversificação alimentar (Aljada *et al.*, 2021; Bouasla e Wójtowicz, 2021). Entretanto, a ausência da rede proteica do glúten impõe desafios relevantes de estruturação, estabilidade durante o cozimento e textura, demandando estratégias combinadas de seleção de matérias-primas, processamento e uso de agentes estruturantes (Delgado-Murillo *et al.*, 2024; Romano *et al.*, 2021). Nesse cenário, o arroz se destaca como base frequente para massas sem glúten devido à

sua elevada aceitação e características funcionais do amido, enquanto leguminosas como o grão-de-bico têm sido empregadas para elevar densidade proteica, teor de fibras e aporte de compostos bioativos (Qin *et al.*, 2021; Kore *et al.*, 2022).

No caso do arroz japonês de grão curto, características como elevado teor de amido e maior proporção de amilopectina favorecem a gelatinização e a formação de estruturas mais coesas após processamento térmico, contribuindo para o desempenho tecnológico em produtos do tipo massa (Singh *et al.*, 2024). Além disso, o baixo teor lipídico tende a contribuir para maior estabilidade da farinha durante o armazenamento. Em paralelo, o grão-de-bico apresenta relevância por seu perfil nutricional e por propriedades tecnofuncionais associadas às proteínas e fibras, podendo atuar na melhoria do valor nutricional e na modulação de textura e estabilidade da matriz, quando adequadamente incorporado à formulação.

Sob a perspectiva proteica, arroz e grão-de-bico apresentam perfis complementares de aminoácidos essenciais e distribuição distinta das classes de proteínas, o que se reflete em índices de qualidade como o PDCAAS e em diferenças na composição de aminoácidos indispensáveis (Tabela 1). Essa complementaridade sustenta o interesse tecnológico e nutricional pela associação entre cereal e leguminosa no desenvolvimento de produtos isentos de glúten, conforme consolidado em referenciais clássicos e normativos (Boye *et al.*, 2012; Osborne, 1924; Shewry e Casey, 1999). A interpretação dessas diferenças é reforçada pela análise da distribuição de albuminas, globulinas, prolaminas e glutelinas, bem como do perfil de aminoácidos indispensáveis, informações úteis para justificar formulações mistas e discutir qualidade nutricional e potencial de estruturação.

Tabela 1. Qualidade proteica, distribuição das classes de proteínas e composição de aminoácidos indispensáveis do arroz e do grão-de-bico

| Parâmetro                          | Unidade          | Arroz | Grão-de-bico |
|------------------------------------|------------------|-------|--------------|
| Índice de qualidade proteica       |                  |       |              |
| PDCAAS                             | adimensional     | 0,47  | 0,71         |
| Distribuição das classes proteicas |                  |       |              |
| Albuminas                          | %                | 2–6   | 8–12         |
| Globulinas                         | %                | 12    | 53–60        |
| Prolaminas                         | %                | 4     | 3–7          |
| Glutelinas                         | %                | 80    | 19–25        |
| Aminoácidos indispensáveis         | mg/g de proteína |       |              |

Tabela 1. Continuação.

| Parâmetro    | Unidade | Arroz | Grão-de-bico |
|--------------|---------|-------|--------------|
| Arginina     | mg/g    | 79    | 98           |
| Histidina    | mg/g    | 24    | 28           |
| Isoleucina   | mg/g    | 44    | 46           |
| Leucina      | mg/g    | 86    | 78           |
| Lisina       | mg/g    | 38    | 71           |
| Metionina    | mg/g    | 22    | 11           |
| Cistina      | mg/g    | 16    | 12           |
| Fenilalanina | mg/g    | 50    | 60           |
| Tirosina     | mg/g    | 33    | 31           |
| Treonina     | mg/g    | 34    | 39           |
| Triptofano   | mg/g    | 27    | 9            |
| Valina       | mg/g    | 60    | 47           |

Fonte: Adaptado de Boye *et al.* (2012); Osborne (1924); Shewry e Casey (1999).

Além da composição, atributos físicos da farinha, em especial a granulometria, exercem impacto direto sobre hidratação, homogeneidade, comportamento reológico e desempenho no cozimento. A obtenção de farinha crua de arroz com granulometria controlada é, portanto, um fator determinante para a qualidade do macarrão, uma vez que partículas mais finas tendem a aumentar a área superficial e favorecer a absorção de água, enquanto frações mais grossas podem reduzir a coesão e elevar a perda de sólidos solúveis durante o cozimento (Ronda *et al.*, 2011).

A granulometria deve ser tratada como variável estratégica de otimização, pois influencia propriedades funcionais e tecnológicas essenciais, incluindo extensibilidade, fluidez e capacidade de absorção de água (Azeem; Mu e Zhang, 2021). Em farinhas cruas e extrusadas, essa relevância se intensifica: farinhas obtidas apenas por moagem tendem a maior heterogeneidade, enquanto farinhas extrusadas frequentemente exibem maior uniformidade e predominância de partículas finas, em função de alterações físico-estruturais promovidas pela extrusão, com efeitos sobre friabilidade e comportamento pós-moagem (Silva *et al.*, 2014). A classificação em faixas (fina, média e grossa) é frequentemente utilizada para explicar o comportamento tecnológico, pois partículas finas favorecem massas mais coesas e melhor textura, embora tamanhos excessivamente finos possam dificultar hidratação uniforme e favorecer aglomeração (Paulino, 2025).

No contexto de extrusão, o tamanho das partículas também se relaciona ao comportamento do material no processo. Evidências provavelmente indicam que partículas mais grossas podem promover maior índice de expansão em determinados sistemas, por efeitos associados à retenção de umidade e ao desenvolvimento de

pressão interna no momento da extrusão, influenciando a estrutura final (Comettant-Rabanal *et al.*, 2023). Além disso, características como área superficial específica, densidade e porosidade são moduladas pelo tamanho de partículas, afetando fenômenos de transporte, mistura, empacotamento e armazenamento (Carvalho *et al.*, 2010).

A difração a laser é amplamente utilizada para caracterização granulométrica, permitindo a determinação de D10, D50, D90, diâmetros médios volumétricos e de superfície e métricas de distribuição como o *Span*. Estudos em farinhas compostas apontam que composição e condições de processamento podem deslocar curvas acumuladas e alterar a amplitude da distribuição, com implicações tecnológicas na hidratação e estruturação (Liu *et al.*, 2024; Cristiano *et al.*, 2019). O *Span*, em particular, é utilizado como indicador de homogeneidade, em que valores menores podem indicar distribuição mais estreita e uniforme, e valores maiores apontam heterogeneidade, associada a diferenças de matéria-prima e técnicas de moagem ou processamento térmico. Em sistemas multicomponentes, como blends de arroz japonês e grão-de-bico, diferenças de tamanho e morfologia das partículas podem afetar miscibilidade, distribuição de água, interação amido–proteína e desempenho térmico do sistema (Liu *et al.*, 2024).

Do ponto de vista tecnológico, a extrusão termoplástica é uma das principais ferramentas para produção de farinhas pré-cozidas destinadas a massas sem glúten, pois promove modificações estruturais relevantes em amido, proteínas e fibras. Durante o processo, o amido pode sofrer gelatinização parcial ou total, enquanto proteínas e fibras podem ser reorganizadas estruturalmente, resultando em aumento da capacidade de retenção de água e melhor comportamento de amassamento, aspectos críticos para a coesão e estabilidade das massas sem glúten (Camire e Krumhar, 1990; Hagenimana; Ding e Fang, 2006). A incorporação de grão-de-bico em sistemas extrudados tem sido descrita como estratégia para elevar o teor proteico e a densidade nutricional, além de influenciar parâmetros de textura e reduzir fragilidade estrutural durante o cozimento, por interações entre proteínas de leguminosas e o amido gelatinizado, bem como pela contribuição de fibras e componentes bioativos (Petitot *et al.*, 2010; Bouasla *et al.*, 2017).

Uma estratégia tecnológica recorrente para superar limitações estruturais de massas sem glúten é a combinação de farinha crua e farinha extrudada. Nesse arranjo, a farinha extrudada pode atuar como componente funcional, favorecendo

coesão da massa e contribuindo para a formação de uma rede contínua que retém o amido durante o cozimento, enquanto a farinha crua tende a contribuir para atributos sensoriais desejáveis, como cor mais clara e sabor neutro (Marti *et al.*, 2013; Padalino *et al.*, 2013). Entretanto, a proporção entre essas frações é crítica: teores elevados de farinha extrudada podem resultar em produtos excessivamente firmes ou com aparência opaca, enquanto teores insuficientes podem comprometer estabilidade de cozimento e integridade estrutural, reforçando a necessidade de otimização.

Além das farinhas, a estruturação da matriz sem glúten depende fortemente de ingredientes hidrocoloides e, em alguns casos, de fontes proteicas auxiliares. Hidrocoloides como ágar e gelana são frequentemente empregados por sua capacidade de formar géis e elevar a viscosidade da fase contínua, favorecendo retenção de água, estabilidade da massa e redução da perda de sólidos solúveis durante o cozimento, atuando como substitutos estruturais parciais da rede de glúten (Lazaridou *et al.*, 2007; Alvarez-Jubete *et al.*, 2010). O uso de ovo em pó, por sua vez, constitui alternativa relevante, pois as proteínas do ovo sofrem coagulação térmica durante o cozimento, contribuindo para firmeza, elasticidade e coesividade, além de atuar como emulsificante e favorecer melhor distribuição dos componentes na massa, com efeitos potenciais sobre aceitabilidade sensorial (Foschia *et al.*, 2015).

A validação do desempenho tecnológico de massas tradicionalmente se baseia em testes de cozimento, incluindo tempo ótimo, aumento de massa/volume e perda de sólidos solúveis. Em sistemas sem glúten, esses parâmetros são particularmente sensíveis à integridade da matriz formada durante o processamento; perdas elevadas de sólidos solúveis provavelmente indicam estrutura frágil e baixa coesão, enquanto perdas reduzidas refletem maior estabilidade de cozimento e retenção de componentes na matriz (AACC, 1995; Dexter *et al.*, 1983; Edwards, 1995). Complementarmente, a análise de perfil de textura (TPA) é ferramenta central para caracterizar propriedades mecânicas dos macarrões cozidos, gerando parâmetros como dureza, elasticidade, coesividade, gomosidade e mastigabilidade, os quais se relacionam com a percepção sensorial do consumidor e com a qualidade tecnológica esperada em massas (Bourne, 2002).

A caracterização físico-química e funcional também desempenha papel de suporte na validação de formulações sem glúten, pois permite avaliar composição, valor energético, teor proteico e fibras, além de propriedades associadas ao comportamento em água e à estabilidade do sistema, integrando evidências para

seleção das melhores formulações. A análise sensorial, por sua vez, é indispensável para confirmar se melhorias tecnológicas e nutricionais resultam em produto aceito pelo consumidor; por isso, a integração entre métricas instrumentais e sensoriais é frequentemente tratada como etapa fundamental no desenvolvimento e validação de massas sem glúten com qualidade global adequada (Gallagher, 2012; Padalino *et al.*, 2013).

No âmbito funcional, a atividade antioxidante tem sido considerada atributo de interesse crescente, tanto por relevância nutricional quanto por implicações tecnológicas relacionadas à estabilidade oxidativa. A mensuração laboratorial tipicamente inclui quantificação de compostos fenólicos totais e ensaios de sequestro de radicais livres, como ABTS+ e DPPH, os quais permitem discutir potencial bioativo e sua relação com matéria-prima e processamento (Paulino, 2025; Sofi *et al.*, 2020). O tratamento térmico e mecânico associado à extrusão nem sempre reduz compostos antioxidantes; ao contrário, pode aumentar a biodisponibilidade e a extração, ao romper ligações entre fenólicos e a matriz alimentar, justificando a investigação desses parâmetros em farinhas e produtos processados (Sofi *et al.*, 2020; Paulino, 2025; Silva, 2024).

Outra abordagem essencial para discutir qualidade nutricional e resposta metabólica potencial é a digestibilidade *in vitro*, amplamente aplicada como modelo preditivo para estimativa do Índice Glicêmico, com base na cinética de hidrólise do amido e no cálculo do Escore Glicêmico Estimado (Hua e Weiss, 2004). A classificação do amido em frações rapidamente digestível, lentamente digestível e resistente permite relacionar composição e processamento ao comportamento digestivo, sendo que teores mais elevados de amilose tendem a associar-se ao aumento de amido resistente e à redução do potencial glicêmico, conforme observado em cultivares de arroz (Hua e Weiss, 2004). Em produtos sem glúten, a matriz alimentar e os substitutos estruturais do glúten podem modular significativamente a digestibilidade do amido e a resposta glicêmica, uma vez que formulações com múltiplos ingredientes e espessantes alteram interações amido–proteína e a organização estrutural do alimento (Berti *et al.*, 2004; Suo *et al.*, 2022).

Em massas sem glúten, diferenças de estilo e composição podem resultar em variações nas frações de amido digestível e resistente, reforçando a complexidade do tema e a necessidade de avaliação caso a caso (Marti *et al.*, 2018). Adicionalmente, a digestibilidade proteica *in vitro* é influenciada por processos e tratamentos aplicados

às leguminosas; evidências mostram incremento de digestibilidade após desamargamento aquoso e após extrusão em farinha de tremoço, indicando potencial de melhoria da biodisponibilidade proteica por processamento termomecânico (Chamone *et al.*, 2023). Técnicas como germinação também têm sido destacadas: a incorporação de farinha de grão-de-bico germinado em macarrão à base de arroz pré-gelatinizado elevou a digestibilidade proteica e, simultaneamente, reduziu a fração de amido rapidamente digestível, sugerindo ganho nutricional e potencial mitigação glicêmica (Sofi *et al.*, 2020). Estudos ainda reportam que a adição de farinha de grão-de-bico em massas de milho e arroz pode reduzir a digestibilidade do amido em diferentes níveis de incorporação, reforçando seu potencial para modular resposta glicêmica em produtos tipicamente ricos em amido rapidamente disponível. Abordagens recentes também investigaram ingredientes alternativos e reciclados, como farinha de resíduos alimentares, com impacto simultâneo na digestibilidade proteica e na redução de frações rapidamente digestíveis, ampliando a discussão sobre processamento, matriz e desempenho nutricional. A digestibilidade proteica também foi aplicada em outros produtos sem glúten, como cookies formulados com farinha de teff, reforçando sua utilidade na caracterização de alimentos dietéticos (Suo *et al.*, 2022).

Para sustentar a interpretação de mecanismos estruturais associados a desempenho tecnológico e nutricional, técnicas analíticas como SDS-PAGE e MEV são frequentemente utilizadas. A caracterização proteica por eletroforese SDS-PAGE permite análise semi-quantitativa do perfil proteico e identificação de alterações induzidas por processamento, com separação predominantemente por massa molecular, baseada na desnaturação por SDS e migração no gel de poli(acrilamida) (Gallagher, 2012). A resolução depende da concentração de acrilamida e do tamanho dos poros do gel, enquanto a execução em condições redutoras permite ruptura de pontes dissulfeto e avaliação de subunidades polipeptídicas, sendo relevante para monitorar agregação e formação de ligações cruzadas durante processos intensos como a extrusão (Gallagher, 2012). Essa abordagem é particularmente útil em leguminosas como grão-de-bico, cujas globulinas (leguminas e vicilinas) podem sofrer desnaturação e agregação sob extrusão, com formação de agregados de alto peso molecular que podem ser parcialmente dissociados em condições redutoras; tais evidências podem ser correlacionadas com mudanças tecnofuncionais e texturais (Korhonen e Pihlanto, 2006; Osborne, 1907; Ortolan *et al.*, 2022).

Complementarmente, a microscopia eletrônica de varredura (MEV) é reconhecida como técnica central para análise microestrutural de farinhas e produtos, permitindo visualizar morfologia, topografia e organização da matriz, incluindo porosidade, grau de gelatinização e integração entre componentes, contribuindo para correlacionar formulação e processamento com qualidade final (Rodríguez, 2021). Em alimentos, o preparo de amostras e a metalização são etapas críticas para evitar acúmulo de carga e preservar qualidade de imagem, sendo o MEV frequentemente associado a análises adicionais como EDS quando necessário (Muniz; De Azeredo E Rosa, 2019). Em produtos extrudados e massas sem glúten, o MEV tem sido aplicado para evidenciar estruturas celulares, cavidades, coesão da matriz e impactos de ingredientes estruturantes, permitindo discutir mecanismos relacionados a textura e propriedades de cozimento (Bouasla e Wójtowicz, 2021; Raungrusmee *et al.*, 2020; Yalcin, 2020; Sahu *et al.*, 2024; Bouziane *et al.*, 2024). Assim, a integração entre caracterizações instrumentais (cozimento, textura, físico-química), avaliações funcionais (antioxidantes, digestibilidade) e técnicas estruturais (SDS-PAGE, MEV) consolida um arcabouço consistente para desenvolvimento, otimização e validação de massas sem glúten à base de arroz e grão-de-bico, com apoio de hidrocoloides e ingredientes coadjuvantes, visando qualidade tecnológica, nutricional e sensorial.

#### **4.3 Materiais e Métodos**

##### **4.3.1 Produção de farinha crua de arroz japonês para macarrão**

Foram usados 5 kg de grãos de arroz japonês curto, adquiridos do Mercado Livre (São Paulo, Brasil), para o preparo de macarrões. Os grãos de arroz japonês foram reduzidos de tamanho até partículas  $\leq 0,500$  mm, usando pela combinação do uso do moinho de rolos Quadrumat Jr. (Brabender, Duisburg, Alemanha) e peneiras de laboratório (Newark, U.S.A.). A farinha de arroz japonês (AJ) obtida da moagem foi etiquetada como AJ e empacotada em sacola de plástico de alta densidade, hermeticamente fechada, e armazenada sob refrigeração ( $\sim 7^{\circ}\text{C}$ ) até o momento de sua utilização.

##### **4.3.2 Produção de farinha extrudada para macarrão**

Foram usados 5 kg de grãos de arroz japonês e 3 kg de grão-de-bico para produzir farinha extrudada para uso no desenvolvimento de macarrão. Produtos grosseiros  $\leq 1,400$  mm obtidos da moagem com moinho de discos LM3600 (Perten Instruments AB, Huddinge, Suécia), foram misturadas em proporção (%/%, base seca) 40/60. Seguidamente a umidade da mistura foi condicionada a 30%. O material condicionado foi deixado em repouso durante 16 h em temperatura ambiente (overnight). No dia seguinte, o material condicionado foi alimentado ao extrusor de rosca simples 19/20 DN (Brabender, Duisburg, Alemanha), por meio de um alimentador volumétrico de parafuso vertical (Brabender, Duisburg, Alemanha), rotacionado a 19 rpm (equivalente a 4 kg/h de taxa de alimentação).

Os componentes mecânicos do extrusor já haviam sido descritos de forma detalhada por Vargas-Solórzano *et al.* (2020). Neste estudo, utilizou-se um parafuso com taxa de compressão de 2:1, operando a uma rotação constante de 150 rpm. O troquel acoplado à matriz frontal apresentou um único orifício com diâmetro de 4 mm. O perfil térmico do equipamento foi cuidadosamente controlado, estabelecendo-se temperaturas de 80, 100 e 120 °C ao longo das três zonas de aquecimento, desde a região de alimentação até a matriz frontal.

Os extrudados coletados foram secos em secador de bandejas de laboratório SL102 (SOLAB, São Paulo, Brasil) a 60 °C durante 16 h (overnight). Após a secagem, os extrudados secos foram manualmente triturados e logo reduzidos de tamanho até partículas  $\leq 0,500$  mm, usando uma combinação de moinho de discos LM3600 (Perten Instruments AB, Huddinge, Suécia), moinho de rolos Quadrumat Jr. (Brabender, Duisburg, Alemanha), e peneiras de laboratório (Newark, U.S.A.). O produto moído obtido (farinha extrudada, etiquetada como FE4), foi empacotado em sacola de plástico de alta densidade, hermeticamente fechado, e armazenado sob refrigeração ( $\sim 7^{\circ}\text{C}$ ) até o momento de sua utilização ( $< 3$  meses).

#### **4.3.3 Formulação de macarrões**

Os ingredientes para o preparo dos macarrões são apresentados na Tabela 2. O mix de ingredientes foi realizado numa batedeira planetária M5A (Hobart, Alemanha). Primeiramente foi realizado a mistura em seco do mix de farinhas composta de FE4 e AJ. Logo foram acrescentados os demais ingredientes. Os hidrocoloides usados foram: ágar e gelana, os quais foram adquiridos do Mercado

Livre (São Paulo, Brasil). A proporção de FE4 e AJ no mix de farinhas, e as incorporações de hidrocoloide e ovo em pó na formulação, foram realizadas de acordo com um delineamento experimental (Tabela 4). Posteriormente foram acrescentadas o sal refinado (Cisne) e água potável. A incorporação gradual de todos os ingredientes levou em torno de 10 min. Ao todo, um mesmo tempo de amassado foi feito para todos os tratamentos (~ 20 min).

Tabela 2. Ingredientes para elaborar macarrão de acordo com uma formulação padrão

| Ingredientes             | Percentual (%) |
|--------------------------|----------------|
| Farinha mix <sup>1</sup> | 100,0%         |
| Hidrocoloides            | 2,0%           |
| Ovo em pó                | 2,0%           |
| Água potável             | ~ 36,0%        |
| Cloreto de sódio (NaCl)  | 1,0%           |

<sup>1</sup>Mistura de farinhas de arroz cru e, farinha pré-cozido por extrusão com boas características de amassado. Fonte: Elaborada pela própria autora.

Terminado o tempo de amassado dos ingredientes, os macarrões foram produzidos a temperatura ambiente mediante um extrusor a frio (Pastaia 2, ITALVISA, Tatuí, Brasil), equipado com um parafuso de 30 cm de comprimento e 5,5 cm de diâmetro, rotacionado a 50 rpm. A trefila de bronze acoplada à saída do extrusor foi de formato *fusilli* com furo de 1,70 mm de diâmetro. Os macarrões frescos foram coletados sob bandejas de aço inox, com fundo de grade, e foram secados em secador de bandejas de laboratório SL102 (SOLAB, São Paulo, Brasil) a 50°C, a fim de garantir a integridade do produto por meio de uma secagem lenta e gradativa, até alcançar atividades de água em torno de 0,60.

Após a secagem, os macarrões secos foram resfriados a temperatura ambiente e empacotados em sacolas de plástico de alta densidade, hermeticamente fechados, e armazenados sob refrigeração (~7°C) até o momento de sua utilização.

#### 4.3.4 Delineamento experimental para obter macarrões

Os macarrões foram obtidos mediante um experimento fatorial 2<sup>3</sup> com duas repetições, sendo os fatores de estudo:  $X_1$  (adição de farinha extrudada, em %, na farinha base composta de farinha de arroz japonês cru),  $X_2$  (tipo de hidrocoloide usado na formulação), e  $X_3$  (Incorporação de ovo em pó). Os níveis por cada fator são apresentados na Tabela 3.

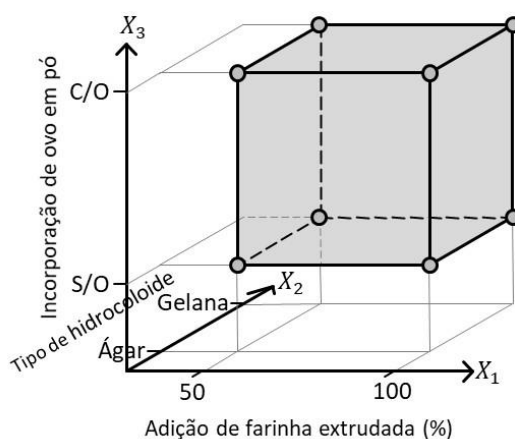
Tabela 3. Fatores de estudo e seus níveis estabelecidos para produzir macarrões

| Fator                       | Unid. | Abrev. | Nível (Versão) |          |
|-----------------------------|-------|--------|----------------|----------|
|                             |       |        | Baixo          | Alto     |
| Adição de farinha extrudada | %     | $X_1$  | 50             | 100      |
| Tipo de hidrocoloide        | -     | $X_2$  | (Ágar)         | (Gelana) |
| Incorporação de ovo em pó   | -     | $X_3$  | (S/O)          | (C/O)    |

S/O: sem ovo; C/O: com ovo. Fonte: Elaborada pela própria autora.

Os níveis estabelecidos para  $X_1$  foram escolhidos, tendo em conta a melhora da rede coesiva da massa para macarrão. As versões estabelecidas para  $X_2$  e  $X_3$  foram escolhidas de acordo com uma exaustiva revisão de literatura. Todas as combinações entre fatores e seus níveis estabelecidos (tratamentos), são apresentadas na Figura 1.

Figura 1 - Tratamentos em base às combinações dos fatores de estudo e seus níveis



Fonte: Elaborada pela própria autora.

As respostas avaliadas nos macarrões foram: testes de cozimento e análise de perfil de textura. A análise sensorial e caracterização físico-química foi realizada para alguns macarrões selecionados.

#### 4.3.5 Análise estatística

Os dados obtidos de acordo com delineamento fatorial  $2^3$  com 2 repetições foram ajustados ao modelo linear com interação da equação (1):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 + \epsilon \quad (1)$$

Onde  $Y$  é a resposta avaliada no macarrão,  $X_i$  e  $X_i X_j$  são os fatores de estudo linear e de interação em níveis codificados,  $\beta_i$  e  $\beta_{ij}$  são os coeficientes linear e de interação do modelo obtidos por análise de variância (ANOVA) e análise de regressão. Estas análises visam minimizar o erro experimental do modelo ( $\epsilon$ ) e foram realizadas com o software *Statística* (StatSoft, Tulsa, EUA).

#### 4.3.6 Testes de cozimento dos macarrões

Os seguintes testes de cozimento: tempo de cozimento ótimo, aumento de massa, aumento de volume, e perda de sólidos solúveis, foram realizados em triplicata segundo o método 16-50 da AACCC (1995), que consiste em cozinhar 10 g de macarrão em 140 mL de água destilada em ebulição. Após 5 minutos de cozimento, a cada 15 s, uma amostra de macarrão cozido foi compactada entre duas lâminas de vidro para verificação de material cru no eixo central da amostra. O tempo de cozimento ótimo ( $TCO$ , min) de um tratamento, foi estabelecido quando não houve vestígios visuais de material cru (gelatinização total do amido).

O aumento de massa ( $AM$ ), do macarrão cozido no tempo de cozimento ótimo, foi calculado com a equação (2):

$$AM = \frac{\text{g amostra cozida durante seu } TCO, \text{ e drenada}}{10 \text{ g}} \times 100\% \quad (2)$$

O volume do macarrão cru e cozido no tempo de cozimento ótimo, foi determinado por deslocamento de hexano. Em uma proveta de 100 mL, foi vertido 50 mL de água destilada, logo foi introduzida a amostra, cujo volume equivale ao deslocamento do volume de água destilada. O aumento de volume ( $AV$ ) do macarrão, foi calculado com a equação (3):

$$AV = \frac{\text{Volume da amostra cozida durante seu } TCO, \text{ e drenada}}{\text{Volume da amostra crua}} \times 100\% \quad (3)$$

A perda de sólidos solúveis (*PS*) foi determinada pela evaporação em estufa a 105 °C de 25 mL da água de cozimento até obter massa constante, e foi calculada com a equação (4):

$$PS = \frac{\text{g de residuo evaporado}}{10 \text{ g}} \left( \frac{140 \text{ mL}}{25 \text{ mL}} \right) \times 100\% \quad (4)$$

Amostras de macarrão controle: de trigo, de farinha de arroz japonês e de farinha de grão-de-bico desenvolvido para celíaco, foram também testadas para efeitos de comparação.

#### 4.3.7 Análise de perfil de textura dos macarrões

Os macarrões cozidos no tempo de cozimento ótimo (*TCO*), foram deformados em dois ciclos de compressão com um analisador de textura TA-XT Plus (Stable Micro Systems, Surrey, Reino Unido), cuja célula de carga acoplada foi de 5 kg e a sonda cilíndrica para deformar um macarrão cozido, teve uma base de 50 mm de diâmetro, a qual desceu a uma velocidade de teste de 1 mm/s. A deformação da amostra em cada ciclo foi até o 50% de sua altura inicial, e o lapso entre ambos ciclos foi de 5 s. As curvas de força foram registradas pelo *software Exponent* versão 6.1.11.0 (Stable Micro Systems, Surrey, Reino Unido) e os parâmetros de textura obtidos delas foram: dureza (*DU*, N), elasticidade (*EL*), coesividade (*CO*), gomosidade (*GO*, N), e mastigabilidade (*MA*, N). Como mínimo, 10 réplicas de análise foram realizadas por cada tratamento.

#### 4.3.8 Análise sensorial dos macarrões

A aceitabilidade dos macarrões cozidos foi testada mediante uma escala hedônica de 9 pontos (1-desgostei extremamente, e 9-gostei extremamente), para os atributos: impressão global, aparência, sabor e textura. As amostras fornecidas ao avaliador foram codificadas por número de três dígitos em ordem aleatório. O projeto foi apresentado ao comitê de ética para a aprovação dos testes sensoriais.

#### 4.3.9 Caracterização físico-química dos macarrões selecionados

O macarrão com as melhores propriedades tecnológicas e atributos sensoriais, foram caracterizados quanto a composição química, seguindo os métodos de análise da AOAC (2010): teor de umidade (método 925,09), teor de cinzas (método 923,03), nitrogênio total (método 2001,11), proteína total (nitrogênio total  $\times$  5,75), e teor de lipídeos (método 945,38). O teor de carboidratos totais foi determinado por diferença dos componentes: umidade, cinzas, proteínas e lipídeos. Também foram avaliados de acordo com os métodos de análise da AACC: teor de fibra alimentar (método 32-05.01) baseado em kits de ensaio da Megazyme International Ireland Ltd (Wicklow, Irlanda).

#### 4.3.10 Distribuição de tamanho de partículas

A distribuição de tamanho das partículas foi determinada no equipamento de difração à laser S3500 (Microtrac Inc., Montgomery Ville, EUA), utilizando a técnica de espalhamento de luz. As amostras foram analisadas em duplicata, seguindo o método AACC 55-40,01.

A partir dos valores obtidos, são calculados mais dois parâmetros, a razão percentual de quebra da parede celular ( $\Phi$ ) e a amplitude de distribuição, conforme equações (5) e (6) abaixo, respectivamente.

$$\Phi = 1 - \left(1 - \frac{10}{D_{50}}\right)^3 \quad (5)$$

$$Amplitude = \frac{D_{90} - D_{10}}{D_{50}} \quad (6)$$

Onde os valores de D10, D50, D90 e D95 representam o tamanho de partícula sob o qual estão 10%, 50%, 90% e 95% da distribuição.

#### 4.3.11 Atividade antioxidante

A atividade antioxidante foi determinada pelo método do radical ABTS $^{\bullet+}$ , conforme descrito por Re *et al.* (1999) e Rufino *et al.* (2007), com adaptações.

Inicialmente, foram preparadas as soluções extratoras de metanol a 50% (v/v) e acetona/água na proporção 70:30 (v/v). A solução estoque de ABTS (7 mM) foi obtida pela dissolução do reagente em água destilada, enquanto a solução estoque de persulfato de potássio (140 mM) foi preparada por dissolução em água destilada sob agitação.

O radical  $ABTS^{\bullet+}$  foi gerado a partir da mistura das soluções estoque de ABTS e persulfato de potássio, mantida em repouso, ao abrigo da luz e à temperatura ambiente, por no mínimo 16 h. Posteriormente, essa solução foi diluída em etanol 95% até atingir absorvância de  $0,700 \pm 0,02$  a 734 nm. A solução padrão de Trolox (2000  $\mu$ M) foi preparada no momento da análise, por dissolução do composto em etanol P.A.

Para a extração dos compostos antioxidantes, massas entre 0,1 e 10 g de amostra foram pesadas em tubos de centrifuga, adicionando-se 10 mL de metanol 50%, seguida de agitação em vortex por 1 min, tratamento em ultrassom por 30 min e centrifugação a 2000 rpm por 20 min. O sobrenadante foi recolhido e o resíduo submetido a uma segunda extração com 10 mL de acetona 70%, repetindo-se as etapas de agitação, ultrassom e centrifugação. Os sobrenadantes foram reunidos em balão volumétrico âmbar e o volume ajustado com água destilada. Os extratos puderam ser armazenados sob congelamento por até 30 dias.

A determinação da atividade antioxidante foi realizada em espectrofotômetro ajustado para 734 nm, utilizando etanol 95% como branco. Alíquotas de 30  $\mu$ L dos extratos foram adicionadas a 3,0 mL da solução de  $ABTS^{\bullet+}$  diluída, homogeneizadas em vortex e a absorvância foi medida após 6 min de reação. As análises foram realizadas em triplicata, sendo preparado um branco para cada amostra, no qual o extrato foi substituído por etanol 95%.

Para o cálculo da atividade antioxidante, foi construída uma curva analítica relacionando a absorvância (Y) em função da concentração da amostra (X, g/L), obtendo-se a equação 7 da reta expressa por:

$$Y = aX + b \quad (7)$$

Em que Y corresponde à absorvância, X à concentração da amostra (g/L), a ao coeficiente angular e b ao coeficiente linear da reta. A absorvância equivalente a 1000  $\mu$ M de Trolox foi então substituída na Equação 8, permitindo o cálculo da concentração da amostra equivalente a esse padrão antioxidante, conforme:

$$X = \frac{(Y-b)}{a} \quad (8)$$

Os resultados finais da atividade antioxidante foram expressos em  $\mu\text{M}$  de Trolox por grama de amostra ( $\mu\text{M}$  Trolox/g).

#### 4.3.12 Digestibilidade *in vitro*

O estudo da digestibilidade *in vitro* começou com o preparo físico das amostras. O macarrão previamente cozido foi amassado em um saco plástico estéril para simular a mastigação. Em seguida, iniciou-se a fase de pesagem e ajuste de pH.

Quatro tubos Falcon foram pesados em balança analítica. Nos tubos A, B e C, foram acrescentadas aproximadamente 5g de amostra. O quarto tubo, o Tubo Branco, permaneceu sem amostra, sendo utilizado como controle de reagentes para verificar traços de nitrogênio nas enzimas e auxiliar no ajuste do pH.

O pH inicial do Tubo Branco da primeira amostra (MT4AC/O) registrou pH 7,05. Para atingir o pH da fase gástrica (que deve variar entre 2,90 a 3,10), foram adicionados gradativamente 40  $\mu\text{L}$  de HCl 2M até atingir o pH de 2,99. A quantidade de HCl 2M gasta foi então subtraída do volume de água estipulado pela metodologia (995  $\mu\text{L}$ ), resultando em 955  $\mu\text{L}$  de água (995  $\mu\text{L}$  - 40  $\mu\text{L}$  = 955  $\mu\text{L}$ ).

O Tubo Controle contendo a amostra MT4AC/O, por sua vez, registrou um pH inicial de 6,37. Para ajustá-lo ao pH da fase gástrica, foram adicionados gradativamente HCl 2M em porções somando 140  $\mu\text{L}$ . Esse volume foi subtraído de 995  $\mu\text{L}$  de água, resultando em 855  $\mu\text{L}$  (995  $\mu\text{L}$  - 140  $\mu\text{L}$  = 855  $\mu\text{L}$ ). Desta forma, identificou-se que os tubos TA, TB e TC deveriam receber 140  $\mu\text{L}$  de HCl 2M e 855  $\mu\text{L}$  de água para o início da digestão gástrica.

Para a segunda amostra (MT4GC/O), o pH inicial do Tubo Branco foi 6,68. O ajuste para pH 3,00 demandou a adição de 20  $\mu\text{L}$  de HCl 2M, estabelecendo 975  $\mu\text{L}$  como o volume de água a ser usado (995  $\mu\text{L}$  - 20  $\mu\text{L}$  = 975  $\mu\text{L}$ ). No Tubo Controle da MT4GC/O, o pH inicial de 6,11 foi ajustado com 100  $\mu\text{L}$  de HCl 2M, definindo que os tubos TA, TB e TC desta amostra receberiam 100  $\mu\text{L}$  de HCl 2M e 895  $\mu\text{L}$  de água (995  $\mu\text{L}$  - 100  $\mu\text{L}$  = 895  $\mu\text{L}$ ).

A análise de digestibilidade foi dividida em três fases: oral, gástrica e intestinal.

**Fase Oral:** O tubo Falcon, previamente pesado com aprox 5 g da amostra, recebeu 4 mL de fluido salivar, 475 µL de água ultrapura, 25 µL de CaCl<sub>2</sub> e 500 µL de solução de amilase (107 mg da enzima diluída em 0,504 mL de água ultrapura). A mistura foi homogeneizada e incubada em banho-maria a 37°C por 2 minutos a 100 pm. A atividade enzimática foi cessada imediatamente após o período, utilizando-se um banho de gelo.

**Fase Gástrica:** Em cada tubo (A, B e C), foram adicionados 8,5 mL de fluido gástrico e 5 µL de CaCl<sub>2</sub>. O pH foi ajustado para aprox 3 com o volume de HCl 2M previamente encontrado para cada amostra (o volume de HCl e o volume de água restante de 995 µL foram adicionados aos tubos, conforme determinado na etapa de Ajuste de pH). Em seguida, foram adicionados 500 µL de solução de pepsina (97 mg da enzima diluída em 0,504 mL). Os tubos foram homogeneizados e incubados em banho-maria a 37°C por 2 horas a 100 rpm. A atividade enzimática foi cessada utilizando-se banho de gelo.

**Fase Intestinal:** A etapa final começou com a adição de 8,5 mL de fluido intestinal e 40 µL de CaCl<sub>2</sub> a cada tubo. O pH foi ajustado para aprox 7 com NaOH 1M. O volume de NaOH utilizado foi anotado e subtraído de 3,960 mL de água, sendo ambos os volumes adicionados em seguida. Foram acrescentados 2,5 mL de solução de bile (328 mg diluída em 2,501 mL de fluido intestinal) e 5 mL de pancreatina (616 mg diluída em 5,005 mL de fluido intestinal). A mistura foi homogeneizada e incubada em banho-maria a 37°C por 2 horas a 100 rpm, e a atividade enzimática foi cessada com banho de gelo. Para o processamento final, os tubos foram pesados e centrifugados a 4500 rpm por 20 minutos a 4°C. O sobrenadante foi imediatamente separado, os tubos com os *pellets* foram pesados novamente, e os volumes necessários do sobrenadante foram aliquotados para análises posteriores.

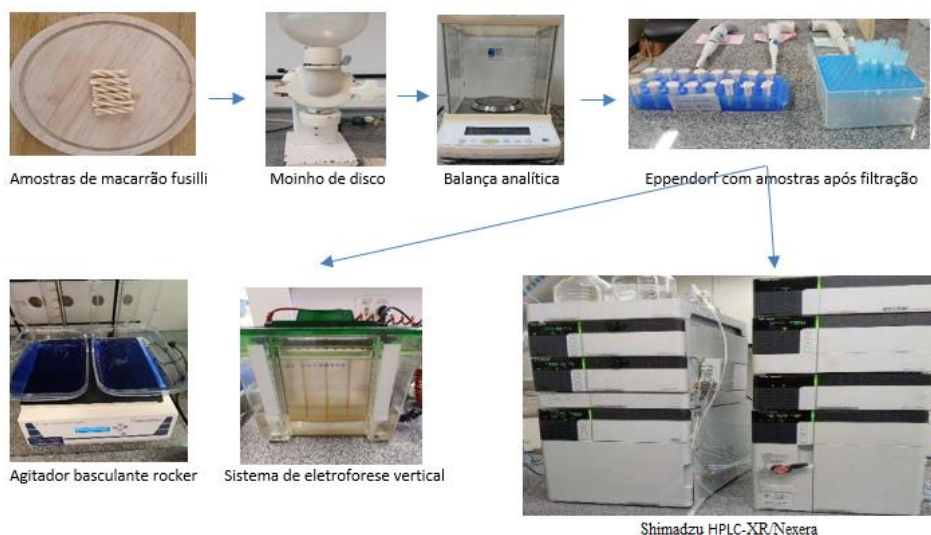
#### 4.3.13 Eletroforese em gel de poliacrilamida

A caracterização proteica das massas alimentícias sem glúten foi realizada a partir de farinhas obtidas de macarrões elaborados com farinha de arroz japonês (*Oryza sativa*, subespécie japônica) e farinha de grão-de-bico tipo kabuli (*Cicer arietinum* L.). A farinha de arroz foi adquirida no comércio local, enquanto o grão-de-bico foi fornecido pela indústria Granfino (Nova Iguaçu, RJ), totalizando cerca de 10 kg de matéria-prima. As formulações foram produzidas por extrusão, considerando

diferentes condições de processamento e composição, incluindo amostras contendo 100% de farinha extrudada a 80 °C e 30% de umidade, bem como misturas com 50% de farinha extrudada e 50% de farinha de arroz cru.

Também foram avaliados os efeitos da adição de hidrocolóides (ágar ou gelana) e da presença ou ausência de ovo desidratado, conforme delineamento experimental. As massas do tipo fusilli foram moídas em moinho de disco até obtenção de partículas homogêneas e, em seguida, alíquotas de 400 mg foram submetidas ao desengorduramento com acetona, seguido de centrifugação a 12.000 rpm por 5 min, para remoção da fração lipídica. O sedimento proteico foi ressuscitado sequencialmente em água destilada e em etanol 70% (v/v), visando à extração de proteínas hidrofílicas e hidrofóbicas potencialmente modificadas pelo processamento por extrusão. Após filtração em ponteiras contendo gaze estéril, os extratos foram destinados às análises por eletroforese em gel de poliacrilamida (SDS-PAGE) e por cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE), conforme o fluxograma metodológico apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Fluxograma metodológico



Fonte: Elaborada pela própria autora.

A análise cromatográfica encontra-se esquematizado na Figura 3.

Figura 3 - Sistema de Cromatografia Líquida de Ultra Eficiência

Sistema de Cromatografia Líquida de Ultra Eficiência (UFLC/HPLC)



Fonte: Elaborada pela própria autora.

A caracterização exploratória do perfil proteico foi realizada por SDS-PAGE em gel de poliacrilamida a 12%, com foco na formulação considerada ótima (T4), composta por 40% de farinha de grão-de-bico e 60% de farinha de arroz japonês, processada a 80 °C e 30% de umidade. Foram analisadas amostras contendo 100% de farinha T4 cozida e misturas com 50% de farinha T4 cozida e 50% de farinha de arroz cru moído, variando-se o tipo de hidrocolóide e a presença ou ausência de ovo desidratado. Marcadores de massa molecular entre 33 e 103 kDa (Bio-Rad®) foram utilizados como padrão, permitindo a estimativa das massas moleculares das bandas observadas, com base na migração diferencial das proteínas na matriz do gel.

O perfil peptídico e polipeptídico por hidrofobicidade foi determinado por CLAE em fase reversa (RP-HPLC), utilizando um cromatógrafo Shimadzu Prominence LC-20A (Shimadzu Corp., Kyoto, Japão), equipado com bomba de gradiente binário e detector de arranjo de diodos, operando na região UV-Vis. A separação foi realizada em coluna C18 Waters X-Terra® (150 × 4,6 mm, 5 µm), sob vazão de 1,0 mL/min e volume de injeção de 25 µL, com detecção a 216 nm, comprimento de onda característico da absorção das ligações peptídicas.

As fases móveis consistiram em água ultrapura com 0,1% de ácido trifluoroacético (TFA) (Fase A) e acetonitrila com 0,1% de TFA (Fase B), sendo o TFA empregado como modificador iônico para melhoria da resolução e reprodutibilidade cromatográfica. O programa de gradiente linear aplicado encontra-se descrito na Tabela 6. Os cromatogramas obtidos foram avaliados quanto aos tempos de retenção, número de picos e áreas relativas, permitindo a comparação do perfil peptídico e polipeptídico entre as diferentes formulações de macarrão sem glúten.

#### 4.3.14 Microscopia eletrônica de varredura

A microestrutura dos macarrões formulados (T4, T4 AJ, com adição de ágar ou gelano) foi analisada em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), modelo TM 3000 Hitachi (Tóquio, Japão), acoplado ao sistema de energia dispersiva de raios-X Quanta EDS (Bruker, Karlsruhe, Alemanha).

Para a preparação da amostra, pequenas peças de macarrão seco foram fraturadas e uma porção foi colocada sobre fita adesiva de carbono, aderida a um disco metálico (*stub*). As amostras assim preparadas foram observadas em microscopia para avaliar a integração da matriz, a presença de fissuras, a porosidade e o grau de gelatinização do amido.

As imagens foram capturadas em diferentes aumentos para detalhamento estrutural: 50x, 100x, 500x e 1000x.

### 4.4 Resultados

#### 4.4.1 Testes de cozimento dos macarrões

Os testes de cozimento dos macarrões são apresentados na Tabela 4, de acordo com o delineamento experimental. As respostas avaliadas foram: tempo de cozimento ótimo (TCO), aumento de massa (AM), aumento de volume (AV) e perda de sólidos solúveis (PS). Os efeitos lineares de cada fator (X1, X2 e X3) para essas respostas são apresentados na Figura 4 (A–D).

Tabela 4. Delineamento experimental para obter macarrão com farinha extrudada e respostas avaliadas.

| Tratamento<br>(repetição) | Fatores             |                |                | Testes de cozimento |         |         |         | Textura instrumental |         |         |         |         |
|---------------------------|---------------------|----------------|----------------|---------------------|---------|---------|---------|----------------------|---------|---------|---------|---------|
|                           | X <sub>1</sub><br>% | X <sub>2</sub> | X <sub>3</sub> | TCO<br>Min          | AM<br>% | AV<br>% | PS<br>% | DU<br>N              | EL<br>- | CO<br>- | GO<br>N | MA<br>N |
| M1(1)                     | 50                  | Ágar           | S/O            | 9                   | 172,95  | 172,73  | 14,25   | 4,94                 | 0,95    | 0,68    | 3,35    | 3,18    |
| M2(1)                     | 100                 | Ágar           | S/O            | 10                  | 169,28  | 160,59  | 2,90    | 8,26                 | 0,73    | 0,35    | 3,29    | 2,65    |
| M3(1)                     | 50                  | Gelana         | S/O            | 10                  | 169,63  | 162,35  | 11,34   | 12,79                | 1,03    | 0,71    | 8,98    | 8,87    |
| M4(1)                     | 100                 | Gelana         | S/O            | 9                   | 169,88  | 160,03  | 8,62    | 8,17                 | 0,95    | 0,67    | 5,45    | 5,15    |
| M5(1)                     | 50                  | Ágar           | C/O            | 10                  | 171,32  | 160,19  | 5,61    | 6,57                 | 0,96    | 0,73    | 4,81    | 4,64    |
| M6(1)                     | 100                 | Ágar           | C/O            | 9                   | 170,65  | 170,29  | 10,49   | 10,97                | 0,82    | 0,58    | 6,39    | 5,21    |
| M7(1)                     | 50                  | Gelana         | C/O            | 10                  | 169,41  | 161,19  | 6,06    | 11,46                | 0,92    | 0,72    | 8,19    | 7,19    |
| M8(1)                     | 100                 | Gelana         | C/O            | 9                   | 167,45  | 159,14  | 10,07   | 11,95                | 0,88    | 0,56    | 6,74    | 5,90    |
| M1(2)                     | 50                  | Ágar           | S/O            | 10                  | 170,42  | 164,15  | 16,03   | 4,79                 | 0,95    | 0,70    | 3,34    | 3,18    |
| M2(2)                     | 100                 | Ágar           | S/O            | 10                  | 170,81  | 163,96  | 1,46    | 7,75                 | 0,85    | 0,49    | 3,91    | 3,32    |
| M3(2)                     | 50                  | Gelana         | S/O            | 9                   | 166,31  | 168,85  | 9,73    | 20,26                | 0,87    | 0,67    | 13,63   | 11,85   |
| M4(2)                     | 100                 | Gelana         | S/O            | 8                   | 168,27  | 168,54  | 3,80    | 8,39                 | 0,93    | 0,68    | 5,55    | 5,17    |

Tabela 4. Continuação.

| Tratamento<br>(repetição) | Fatores    |            |            | Testes de cozimento |           |           |           | Textura instrumental |           |           |           |           |
|---------------------------|------------|------------|------------|---------------------|-----------|-----------|-----------|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                           | $X_1$<br>% | $X_2$<br>- | $X_3$<br>- | $TCO$<br>Min        | $AM$<br>% | $AV$<br>% | $PS$<br>% | $DU$<br>N            | $EL$<br>- | $CO$<br>- | $GO$<br>N | $MA$<br>N |
| M5(2)                     | 50         | Ágar       | C/O        | 10                  | 169,33    | 169,81    | 7,16      | 6,19                 | 1,01      | 0,72      | 4,45      | 4,46      |
| M6(2)                     | 100        | Ágar       | C/O        | 10                  | 169,74    | 160,65    | 13,03     | 10,00                | 0,86      | 0,62      | 6,24      | 5,37      |
| M7(2)                     | 50         | Gelana     | C/O        | 10                  | 172,11    | 171,24    | 7,47      | 7,11                 | 0,95      | 0,73      | 5,06      | 4,77      |
| M8(2)                     | 100        | Gelana     | C/O        | 10                  | 171,89    | 167,39    | 9,51      | 11,95                | 0,93      | 0,60      | 7,07      | 6,54      |

Nota: M: macarrão experimental,  $X_1$ : adição de farinha extrudada, em %, à farinha de arroz japonês cru,  $X_2$ : tipo de hidrocoloide,  $X_3$ : incorporação de ovo em pó. S/O: sem incorporação, C/O: com incorporação.  $TCO$ : tempo de cozimento ótimo,  $AM$ : aumento de massa,  $AV$ : aumento de volume,  $PS$ : perda de sólidos solúveis. Parâmetros de textura do macarrão cozido:  $DU$ , dureza;  $EL$ , elasticidade;  $CO$ , coesividade;  $GO$ , gomosidade;  $MA$ , mastigabilidade. Fonte: Elaborada pela própria autora.

Os resultados obtidos demonstram que a qualidade tecnológica do *fusilli* sem glúten à base de arroz pode ser significativamente otimizada através da modulação da proporção de farinha extrusada, do tipo de hidrocoloide e da incorporação de ovo em pó. O tempo de cozimento ótimo ( $TCO$ ) variou entre 8 e 10 minutos, sendo ligeiramente reduzido nas formulações com 100% de farinha extrusada (8–9 min), especialmente na presença de goma gelana. Esse efeito é atribuído à maior pré-gelatinização do amido extrusado, que facilita a penetração e hidratação da água (Padalino *et al.*, 2013).

Avaliando as propriedades de cozimento, observou-se que a substituição parcial (50% farinha extrusada), resultou em maior intumescimento (aumento de massa,  $AM$ , e volume,  $AV$ ) em comparação com a substituição total. Isso pode indicar que a retenção de grânulos de amido nativo permite uma hidratação mais extensa, enquanto a pré-gelatinização completa limita essa capacidade (Foschia *et al.*, 2015). O conceito de balancear a farinha pré-cozida (extrusada) com a farinha crua é um princípio chave na otimização de produtos sem glúten, garantindo o corpo da massa sem a desintegração total (Guimarães, 2024).

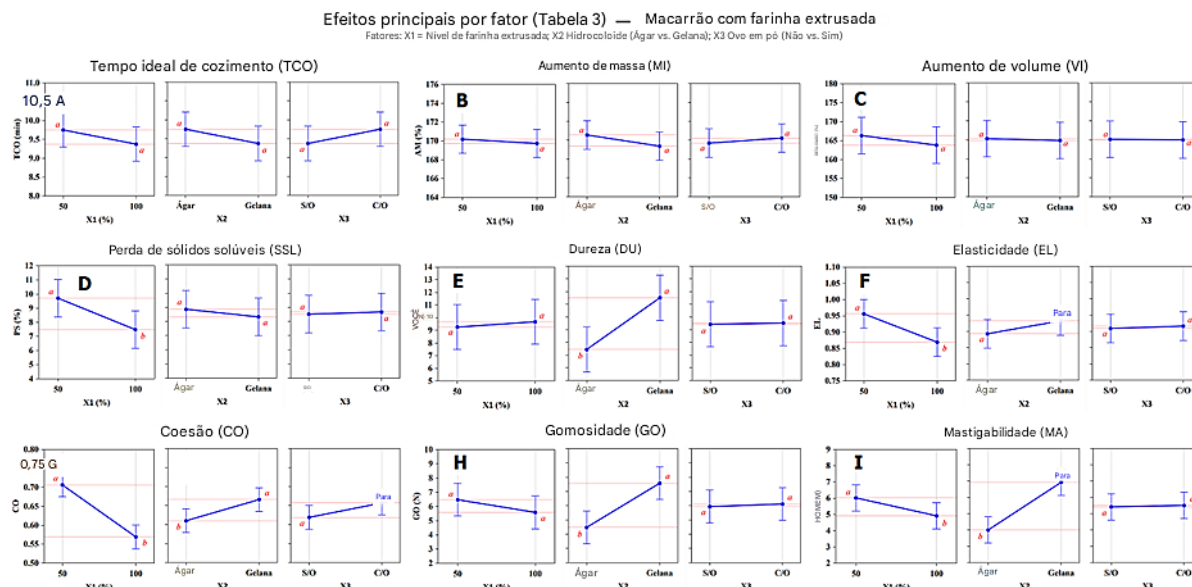
A goma gelana se destacou por promover um intumescimento superior, explicado pela sua capacidade de formação de gel e retenção de água superior. Notavelmente, a gelana resultou em uma menor perda de sólidos ( $PS$ ), um índice crítico de qualidade. A adição de ovo em pó também contribuiu para a redução da  $PS$ , confirmando seu papel na melhoria da integridade da matriz e na minimização da lixiviação de sólidos solúveis (Hou, 2010). O mecanismo de redução da  $PS$  pela gelana e ovo em pó assemelha-se ao papel de um agente ligante ("glue matrix") que forma uma rede coesa encapsulando os sólidos solúveis, similar ao efeito de concentrados proteicos estudados em farinhas extrusadas de arroz (Liu *et al.*, 2015).

Na análise de textura, a goma gelana mostrou-se determinante, conferindo maior dureza (ex. M3 >12 N) e coesividade à massa, provavelmente indicando a formação de uma matriz amido–hidrocoloide–proteína robusta. Formulações à base de ágar, por outro lado, resultaram em menor dureza. Esses achados estão em consonância com estudos anteriores que destacam a contribuição da gelana para massas sem glúten mais firmes e elásticas (Liu *et al.*, 2015). A incorporação de ovo em pó potencializou as propriedades texturais, sinergizando com a gelana para aumentar a coesividade, gomosidade e mastigabilidade. Em particular, a adição de ovo em pó aumentou ainda mais a coesividade e a gomosidade em macarrões contendo gelana, com valores de gomosidade (GO) e mastigabilidade (MA) excedendo 7 N.mm. Esses resultados evidenciam o efeito sinérgico entre a gelana e as proteínas do ovo na construção de uma matriz densa e elástica (Ronda *et al.*, 2011).

Em termos de desempenho tecnológico geral, foi verificado que as formulações mais promissoras combinam substituição parcial, goma gelana e ovo em pó (M3 e M7), sendo que as mais promissoras são aquelas que combinam 50% de farinha extrusada, goma gelana e ovo em pó, proporcionando um equilíbrio ideal entre o desempenho de cozimento e a textura. Este balanço otimiza a estabilidade no cozimento e confere atributos texturais desejáveis (Liu *et al.*, 2015). O uso sinérgico da goma gelana (melhorando a rede de gel) e do ovo em pó (estabilizando a matriz proteica) emerge como a estratégia chave para fechar a lacuna de qualidade entre o *fusilli* sem glúten e a massa convencional à base de trigo (Padalino *et al.*, 2013; Ronda *et al.*, 2011).

Essas descobertas corroboram a importância do enriquecimento com proteínas e do uso de hidrocoloides para reforçar a estrutura de massas sem glúten. Especificamente, o sucesso da substituição parcial (50/50) ressalta que a manutenção de certa quantidade de amido nativo é crucial para garantir uma hidratação adequada (Foschia *et al.*, 2015), enquanto o amido extrusado contribui com a estabilidade da matriz pré-gelatinizada. Esta combinação sinérgica reduz a lacuna entre massas sem glúten e à base de trigo, suportando a viabilidade tecnológica da produção de *fusilli* à base de arroz de alta qualidade.

Figura 4 - Efeitos lineares dos fatores sobre parâmetros de cozimento e textura dos noodles cozidos



Nota: (A) tempo de cocção (TCO), (B) aumento de massa (AM), (C) aumento de volume (AV), (D) perda de sólidos solúveis (PS), (E) dureza (DU), (F) elasticidade (EL), (G) coesividade (CO), (H) gomosidade (GO) e (I) mastigabilidade (MA) dos noodles cozidos. X1: adição de farinha extrusada à farinha de arroz japonês crua; X2: tipo de hidrocolóide; X3: incorporação de pó de ovo. S/O: sem incorporação; C/O: com incorporação. Fonte: Elaborada pela própria autora.

A Figura 4A revela que o aumento da proporção de farinha extrusada elevou significativamente o tempo de cozimento ótimo (TCO). Isso é coerente com a literatura, pois a extrusão pode promover gelatinização parcial do amido, alterando sua estrutura interna. Entretanto, quando essa farinha é reincorporada na formulação, a rede de amido não se recompõe de forma coesa, exigindo mais tempo para gelatinização completa no cozimento (Ren *et al.*, 2024). Além disso, a presença de ovo em pó e de certos hidrocolóides (especialmente ágar) contribuiu para aumento no TCO. Esses ingredientes provavelmente criaram uma matriz mais densa, retardando a penetração da água durante o cozimento (Zhao *et al.*, 2024). As interações entre amido parcialmente gelatinizado e proteínas do ovo ou hidrocolóides aumentam a resistência à difusão de água, exigindo mais tempo para que o amido remanescente gelatinize por completo (Bello-Perez; Flores-Silva, 2023).

A Figura 4B mostra que o aumento de massa foi menor nas proporções de farinha extrusada. Isso pode ser atribuído à capacidade de reidratação dos componentes extrudados, que apresentam porosidade elevada. A Figura 4C provavelmente indica tendência semelhante para o aumento de volume. Contudo, essa absorção de água deve ser equilibrada com a manutenção da integridade do

macarrão. A adição de ovo em pó favoreceu esse equilíbrio, conferindo coesão à massa e minimizando o risco de desintegração. A farinha extrudada apresenta uma matriz mais aberta, com maior capacidade de retenção de água, mas sua combinação com agentes estruturantes (ovo ou gelana) é essencial para manter estabilidade durante o cozimento (Zhao *et al.*, 2024; Delgado-Murillo *et al.*, 2024).

Quanto à perda de sólidos solúveis (Figura 4D), observa-se um aumento com a adição de farinha à base de farinha de arroz japonês cru. Esse comportamento é típico em formulações com baixa retrogradação do amido e baixa formação de rede proteica, como ocorre em massas sem glúten. A extrusão pode causar degradação parcial das macromoléculas (amido e proteínas) (Paulino, 2025), favorecendo a liberação de solúveis na água de cozimento (Ascheri, 2024). O uso de gelana contribuiu para reduzir essas perdas, sugerindo formação de rede tridimensional capaz de reter sólidos durante o cozimento. O ovo também teve efeito positivo, mas em menor escala. A extrusão pode causar degradação parcial das macromoléculas (amido e proteínas), favorecendo a liberação de solúveis na água de cozimento (Ascheri, 2024). O uso de hidrocolóides específicos pode mitigar esse efeito, desempenhando papel de “glue matrix” (Li *et al.*, 2023). Além disso, as propriedades específicas da farinha extrudada de grão-de-bico e arroz também podem influenciar diretamente esse comportamento (Delgado-Murillo *et al.*, 2024).

#### 4.4.2 Análise de perfil de textura dos macarrões

Os parâmetros de textura dos macarrões cozidos são apresentados na Figura 4, de acordo com o delineamento experimental. As respostas avaliadas foram: dureza (DU), elasticidade (EL), coesividade (CO), gomosidade (GO) e mastigabilidade (MA). Os efeitos lineares de cada fator (X1, X2 e X3) para essas respostas são apresentados na Figura 4 (E–I).

A dureza foi diretamente proporcional à adição de FE4 (Figura 4E), com efeito potencializado pelo uso da gelana. Isso provavelmente indica formação de estrutura mais firme, possivelmente pela sinergia entre proteínas desnaturadas e polímeros gelatinizados. A extrusão provavelmente promove alterações nas proteínas do grão-de-bico, potencializando ligações hidrofóbicas e pontes dissulfeto com a gelana e o ovo em pó, o que justifica o aumento de dureza (Zhao *et al.*, 2024; Paulino, 2025).

Na Figura 4F, a elasticidade foi maior com a adição de gelana, um hidrocolóide

com propriedades viscoelásticas superiores ao ágar. Na Figura 4G, a coesividade também seguiu essa tendência, provavelmente indicando que a gelana é mais eficiente em simular a estrutura do glúten. A elasticidade é um atributo desejável em macarrões, principalmente sem glúten, e a escolha de gelana foi acertada por sua capacidade de formar uma matriz resiliente, retendo água e resistindo à ruptura (Li *et al.*, 2023; Zhao *et al.*, 2024). A alta coesividade e elasticidade da gelana são fatores-chave para compensar a ausência da rede de glúten, sendo uma estratégia eficaz no desenvolvimento de massas e pães sem glúten com textura melhorada (Guimarães, 2024).

A gomosidade (Figura 4H) e a mastigabilidade (Figura 4I) não teve influência com a adição de ovo, enquanto que com adição de 50% farinha extrudada à farinha de arroz japonês cru, permitiu estruturas mais compactas e resistente à quebra mecânica. Esses atributos poderiam influenciar na interação da proteína desnaturada do ovo com a matriz de amido-hidrocoloide, contribuindo para uma textura mais próxima ao macarrão convencional de trigo (Zhao *et al.*, 2024). Quanto à mastigabilidade, observa-se que com 50% de adição de farinha extrudada e gelana periaram maiores valores de mastigabilidade, sem influência pela adição de ovo em pó.

#### **4.4.2.1 Discussão integrada dos efeitos dos hidrocoloides e da adição de ovo sobre as propriedades de cozimento e textura do macarrão tipo *fusilli***

A análise conjunta da Tabela 4 e da Figura 4 (A–I) (Quadro 1) evidencia que os hidrocoloides ( $X_2$ ) exercem papel central na modulação das propriedades tecnológicas do macarrão sem glúten, enquanto a adição de ovo ( $X_3$ ) atua predominantemente como fator modulador estrutural, com efeitos dependentes das interações estabelecidas na matriz amido–proteína–hidrocoloide.

##### **4.4.2.1.1 Propriedades de cozimento (Figura 4A–4D)**

O tempo de cozimento ótimo (TCO) (Figura 4A) apresentou efeito linear positivo do hidrocoloide ( $X_2$ ), indicando que o aumento da concentração desse componente promove maior resistência à penetração de água e à gelatinização do amido, prolongando o tempo necessário para atingir o ponto ideal de cozimento. A adição de ovo ( $X_3$ ) mostrou efeito moderador, atenuando parcialmente esse aumento,

possivelmente devido à contribuição das proteínas do ovo na reorganização da matriz durante o aquecimento.

Quadro 1. Efeito dominante por variável (Tabela 4 e Figura 4A–4I)

| Variável resposta              | Fator dominante            | Tipo de efeito observado | Interações relevantes           | Interpretação tecnológica                                                                                                  |
|--------------------------------|----------------------------|--------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tempo de cozimento ótimo (TCO) | Hidrocoloide ( $X_2$ )     | Linear positivo          | $X_2 \times X_3$ (moderador)    | Aumento do hidrocoloide reforça a matriz e retarda a gelatinização, elevando o TCO; o ovo atenua parcialmente esse efeito. |
| Aumento de massa (AM)          | Hidrocoloide ( $X_2$ )     | Linear positivo          | $X_2 \times X_3$ (secundária)   | Hidrocoloides dominam a retenção hídrica da matriz; o ovo tem efeito complementar.                                         |
| Aumento de volume (AV)         | Hidrocoloide ( $X_2$ )     | Linear positivo          | Associado à AM                  | AV reflete a expansão por hidratação, não devendo ser interpretado como sinônimo de estabilidade estrutural.               |
| Perda de sólidos (PS)          | Hidrocoloide ( $X_2$ )     | Quadrático               | —                               | Existe região ótima de $X_2$ : níveis moderados reduzem PS; excesso promove lixiviação por enfraquecimento estrutural.     |
| Dureza (DU)                    | Interação $X_2 \times X_3$ | Não monotônico           | $X_2 \times X_3$                | A dureza depende do balanço entre rede amido–hidrocoloide e proteínas do ovo, não do efeito isolado de um único fator.     |
| Elasticidade (EL)              | Hidrocoloide ( $X_2$ )     | Positivo                 | $X_2 \times X_3$ (complementar) | A continuidade da matriz amido–hidrocoloide é o principal determinante da recuperação elástica.                            |

Quadro 1. Continuação.

| Variável resposta    | Fator dominante             | Tipo de efeito observado | Interações relevantes           | Interpretação tecnológica                                                                               |
|----------------------|-----------------------------|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Coesividade (CO)     | Hidrocoloide ( $X_2$ )      | Positivo                 | $X_3$ isolado (neutro/negativo) | Hidrocolóides controlam a coesão interna; o ovo atua mais na plasticidade do que na coesão.             |
| Gomosidade (GO)      | Derivada ( $DU \times CO$ ) | Dependente               | —                               | GO não é independente; reflete diretamente as variações de dureza e coesividade.                        |
| Mastigabilidade (MA) | Interação $X_2 \times X_3$  | Condicional              | $X_2 \times X_3$                | Aumento de MA não implica melhoria automática da qualidade; pode indicar produto excessivamente rígido. |

Fonte: Elaborada pela própria autora.

O aumento de massa (AM) (Figura 4B) foram predominantemente influenciadas pelo hidrocoloide ( $X_2$ ), confirmando sua elevada capacidade de retenção hídrica, característica amplamente associada à presença de grupos hidrofílicos capazes de imobilizar água na matriz. O efeito do ovo ( $X_3$ ), embora presente, mostrou-se secundário e dependente das interações com  $X_2$ , reforçando que a hidratação do sistema é governada principalmente pelo hidrocoloide.

De forma coerente, o aumento de volume (AV) (Figura 4C) acompanhou a tendência observada para AM, evidenciando que essa variável reflete essencialmente a hidratação e expansão da matriz, e não necessariamente uma maior estabilidade estrutural. Assim, AV deve ser interpretado como consequência direta da incorporação de água durante o cozimento.

A perda de sólidos (PS) (Figura 4D) revelou um comportamento quadrático em relação ao hidrocoloide ( $X_2$ ), indicando a existência de uma região ótima de concentração. Em níveis moderados, o hidrocoloide contribui para a integridade da matriz e reduz a lixiviação de sólidos; entretanto, concentrações excessivas favorecem a formação de estruturas menos coesas, aumentando a liberação de material solúvel para a água de cozimento.

#### 4.4.2.1.2 Propriedades de textura (Figura 4E–4I)

A dureza (DU) (Figura 4E) não apresentou comportamento monotônico em função do hidrocoloide, sendo claramente dependente da interação entre  $X_2$  e  $X_3$ . (Comportamento monotônico significa que uma variável sempre varia em uma única direção quando outra variável muda). O aumento da dureza ocorreu apenas em regiões específicas do modelo, sugerindo que o equilíbrio entre a rede formada pelo hidrocoloide e as proteínas do ovo é determinante para a resistência mecânica do produto.

A elasticidade (EL) (Figura 4F) foi influenciada positivamente pela continuidade da matriz amido–hidrocoloide, com o ovo atuando como componente complementar. Embora  $X_3$  contribua para a recuperação elástica, os resultados indicam que a organização estrutural promovida pelo hidrocoloide é o fator dominante para essa propriedade.

A coesividade (CO) (Figura 4G) mostrou-se fortemente associada ao hidrocoloide, enquanto o efeito isolado do ovo foi neutro ou levemente negativo. Esse comportamento sugere que o ovo contribui mais para a plasticidade da massa do que para a coesão interna da estrutura após o cozimento.

A gomosidade (GO) (Figura 4H), por ser uma variável derivada da dureza  $\times$  coesividade, refletiu diretamente as tendências observadas para essas propriedades primárias. Assim, sua interpretação deve ser feita de forma integrada, evitando tratá-la como um parâmetro independente.

Por fim, a mastigabilidade (MA) (Figura 4I) aumentou em determinadas combinações de hidrocoloide e ovo; contudo, esse aumento não deve ser interpretado automaticamente como melhoria da qualidade. Valores elevados de MA podem indicar um produto excessivamente rígido, ressaltando a necessidade de otimização das formulações em função do equilíbrio entre resistência e aceitabilidade sensorial.

#### 4.4.3 Análise sensorial dos macarrões selecionados

Os macarrões foram selecionados em base a testes sensoriais preliminares e são apresentados na Tabela 5. Os atributos avaliados foram: *IG* (impressão global), *AP* (aparência), *SA* (sabor), e *TX* (textura).

Tabela 5. Resultados da análise sensorial dos macarrões selecionados

| Macarrão experimental | Atributos sensoriais |                     |                    |                     |
|-----------------------|----------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
|                       | Impressão global IG  | Aparência AP        | Sabor AS           | Textura TX          |
| M5                    | 5,40±2,47 <i>b</i>   | 5,70±2,57 <i>b</i>  | 5,81±2,39 <i>a</i> | 5,01±2,57 <i>c</i>  |
| M6                    | 5,77±2,24 <i>b</i>   | 5,80±2,53 <i>b</i>  | 5,88±2,07 <i>a</i> | 5,35±2,33 <i>bc</i> |
| M7                    | 6,72±2,01 <i>a</i>   | 7,01±1,91 <i>a</i>  | 6,55±2,12 <i>a</i> | 6,38±2,26 <i>a</i>  |
| M8                    | 6,25±2,10 <i>ab</i>  | 6,51±2,09 <i>ab</i> | 6,19±2,20 <i>a</i> | 6,13±2,36 <i>a</i>  |

Nota: M: macarrão experimental; 5, 6, 7, 8: número de tratamento no delineamento experimental. Diferentes letras numa mesma coluna diferem as médias entre si pelo teste de Tukey. Fonte: Elaborada pela própria autora.

Os macarrões M7 e M8 se destacaram nos atributos sensoriais, especialmente em sabor e textura. Isso corrobora os dados instrumentais, mostrando que os tratamentos com níveis adequados de FE4, gelana e ovo produziram massas mais próximas das expectativas dos consumidores. O equilíbrio entre textura, aparência e palatabilidade é fundamental em produtos sem glúten. A formulação M7, por exemplo, conciliou firmeza com maciez e baixa perda de sólidos, atingindo alta aceitação (Li *et al.*, 2023; Zhao *et al.*, 2024).

#### 4.4.4 Caracterização físico-química dos macarrões selecionados e ingredientes

A composição aproximada (em base seca) dos ingredientes usados para produzir macarrões e dos macarrões experimentais selecionados são apresentados na Tabela 6. Para efeitos de comparação, também foi apresentado a composição da farinha de arroz polido comercial e a de um macarrão comercial de arroz japonês. As respostas avaliadas foram: *CIN* (cinzas), *PRO* (proteínas), *LIP* (lipídeos), *CHO* (carboidratos totais), e *FA* (fibra alimentar).

Table 6. Composição química proximal de diferentes tratamentos de macarrão com farinha extrudada

| Amostra | Cinzas (%)        | Proteína (%)       | Lipídios (%)      | Carboidratos (%)   | Fibra alimentar (%) |
|---------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|---------------------|
| AC      | 0.52 <sup>d</sup> | 7.58 <sup>f</sup>  | 0.49 <sup>c</sup> | 80.40 <sup>b</sup> | 11.01 <sup>e</sup>  |
| AJ      | 0.48 <sup>d</sup> | 7.88 <sup>f</sup>  | 0.45 <sup>c</sup> | 79.91 <sup>b</sup> | 11.28 <sup>e</sup>  |
| GB      | 2.82 <sup>b</sup> | 19.63 <sup>b</sup> | 6.08 <sup>a</sup> | 61.12 <sup>e</sup> | 10.35 <sup>e</sup>  |
| MA4     | 1.51 <sup>c</sup> | 10.41 <sup>e</sup> | 1.45 <sup>b</sup> | 76.12 <sup>c</sup> | 10.51 <sup>e</sup>  |
| FE4     | 1.56 <sup>c</sup> | 10.35 <sup>e</sup> | 1.43 <sup>b</sup> | 76.65 <sup>c</sup> | 10.01 <sup>e</sup>  |
| MC      | 2.52 <sup>c</sup> | 11.32 <sup>d</sup> | 1.02 <sup>b</sup> | 74.12 <sup>d</sup> | 13.56 <sup>d</sup>  |
| M5      | 2.65 <sup>c</sup> | 13.52 <sup>c</sup> | 2.15 <sup>b</sup> | 71.22 <sup>d</sup> | 14.46 <sup>c</sup>  |
| M6      | 2.71 <sup>c</sup> | 13.68 <sup>c</sup> | 2.20 <sup>b</sup> | 71.00 <sup>d</sup> | 15.03 <sup>b</sup>  |
| M7      | 2.84 <sup>b</sup> | 14.22 <sup>b</sup> | 2.45 <sup>b</sup> | 70.05 <sup>d</sup> | 15.21 <sup>b</sup>  |
| M8      | 3.01 <sup>a</sup> | 15.25 <sup>a</sup> | 2.88 <sup>a</sup> | 69.40 <sup>e</sup> | 16.32 <sup>a</sup>  |

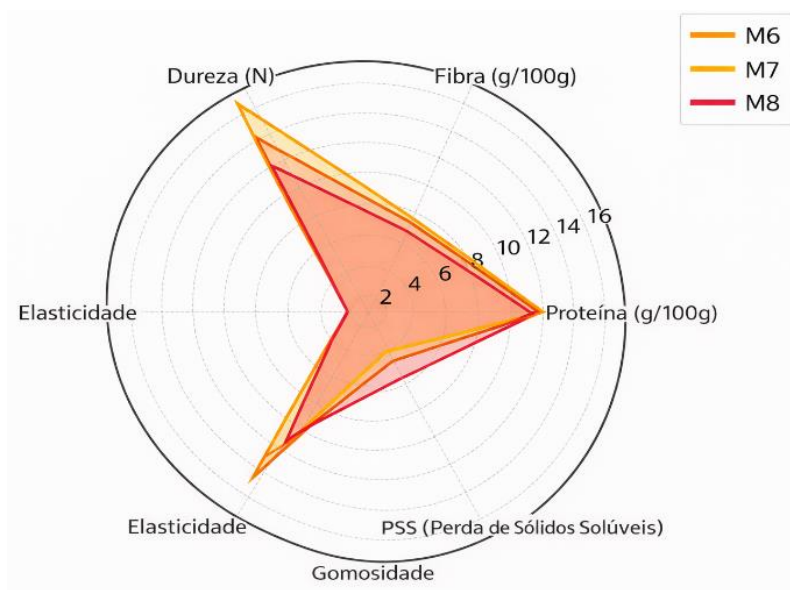
Nota: AC: arroz comercial; AJ: arroz japonês; GB: grão-de-bico. MA4: material de alimentação ao extrusor; FE4: farinha extrudada a partir de MA4. MC: macarrão comercial; M5, M6, M7 E M8:

macarrões experimentais selecionados. Diferentes letras numa mesma coluna diferem as médias entre si pelo teste de Tukey. Fonte: Elaborada pela própria autora.

A adição de farinha de grão-de-bico (via FE4) contribuiu significativamente para o aumento de proteínas, cinzas e fibras alimentares, com destaque para os macarrões M7 e M8. Isso revela o potencial da formulação como alternativa nutricionalmente superior aos macarrões comerciais de arroz. A elevação do conteúdo de proteína e fibra, sem comprometer as propriedades tecnológicas e sensoriais, provavelmente indica sucesso no desenvolvimento de um produto funcional para o público celíaco ou consumidor consciente (Delgado-Murillo *et al.*, 2024; Bello-Perez; Flores-Silva, 2023; Zhao *et al.*, 2024).

O Gráfico 1 apresenta a comparação entre os macarrões avaliados quanto aos parâmetros tecnológicos e nutricionais, permitindo uma análise integrada do desempenho das formulações.

Gráfico 1: Comparação tecnológica e nutricional dos macarrões



Fonte: Elaborada pela própria autora.

A partir da análise gráfica comparativa dos tratamentos M6, M7 e M8, foi possível estabelecer uma avaliação integrada dos parâmetros nutricionais e tecnológicos relevantes para a formulação de macarrões sem glúten elaborados com farinha extrudada de arroz japonês e grão-de-bico. O tratamento M8 destacou-se em praticamente todos os critérios avaliados no gráfico radar expandido, consolidando-se como a formulação de melhor desempenho global. Em termos nutricionais,

apresentou o maior teor de proteínas (15,25 g/100g) e fibras alimentares (16,32 g/100g), refletindo diretamente a contribuição do grão-de-bico na farinha extrudada. Esses componentes são essenciais na formulação de produtos funcionais e voltados para públicos com restrições alimentares, como celíacos e indivíduos em dietas proteicas ou de controle glicêmico (Delgado-Murillo *et al.*, 2024; Bello-Perez; Flores-Silva, 2023).

Do ponto de vista tecnológico, M8 apresentou também os melhores resultados de dureza, elasticidade e gomosidade, atributos que provavelmente indicam a formação de uma matriz viscoelástica coesa e resistente. A dureza elevada pode ser atribuída à sinergia entre as proteínas desnaturadas do ovo em pó e os polímeros parcialmente gelatinizados durante a extrusão. Já a elasticidade superior observada nos tratamentos M7 e M8, especialmente com o uso de gelana como hidrocolóide, confirma sua eficácia na simulação das propriedades do glúten, proporcionando maior resiliência mecânica à massa (Li *et al.*, 2023; Zhao *et al.*, 2024). Outro aspecto relevante foi a alta perda de sólidos solúveis em média de 11.76% no tratamento M6, quando comparado a M7 e M8. Esse dado provavelmente indica melhor estabilidade térmica da massa durante o cozimento, com menor liberação de amido e outras substâncias solúveis na água. Tal comportamento está diretamente relacionado à integridade da rede estrutural formada durante o processamento, que foi potencializada pela ação combinada da gelana, do ovo e da farinha extrudada (Ascheri, 2024; Ren *et al.*, 2024).

#### **4.4.5 Análise de granulometria**

##### **4.4.5.1 Correlação entre granulometria, propriedades de hidratação (IAA/ISA), RVA e textura**

A análise granulométrica das farinhas formuladas evidenciou diferenças estruturais importantes entre as condições estudadas (MT4 G (so), MT4-A(so), MT4-AJ A(co), MT4-AJ G(so) e MT4 G(co)), as quais se refletem diretamente na hidratação, gelatinização, comportamento reológico e, finalmente, na qualidade tecnológica das massas extrudadas tipo *fusilli*. De modo geral, observou-se que as curvas monomodais e estreitas, típicas de MT4 G (so) e MT4-A (so), provavelmente indicam uma matriz farinácea com menor presença de partículas finas e ausência de fragmentos grosseiros, comportamento compatível com farinhas de maior estabilidade

térmica e menor fragilidade mecânica. Em contrapartida, as formulações com arroz japonês (“AJ”), especialmente MT4-AJ G (so), apresentaram marcada redução do diâmetro médio (D50 visual) e maior contribuição de partículas abaixo de 100 µm, enquanto amostras “co” (MT4 G (co) e MT4-AJ A (co)) mostraram distribuições amplas ou bimodais, sugerindo coesão interna heterogênea e maior propensão à fragmentação (Tabela 7 e 8, figura 5).

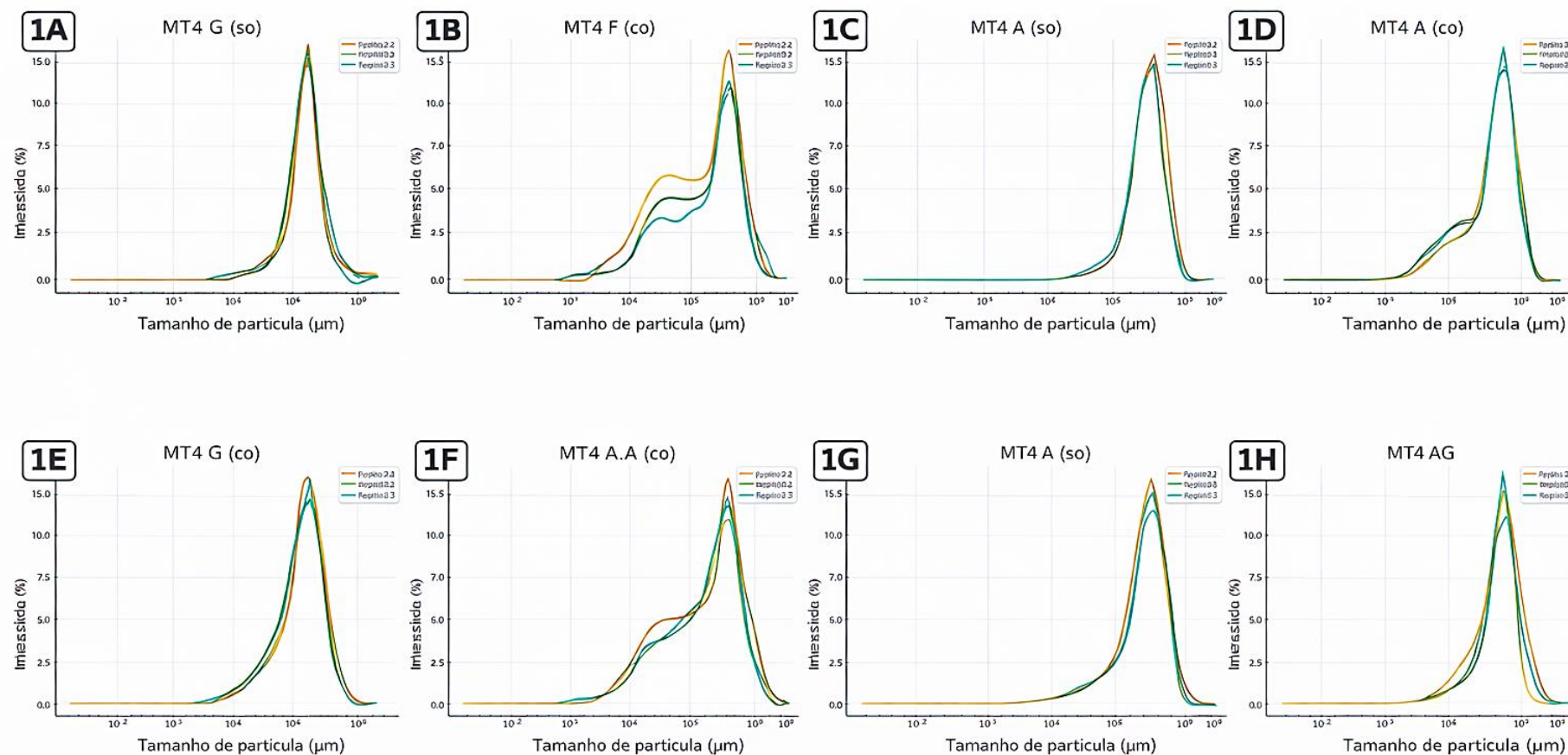
Essas diferenças granulométricas impactam diretamente os parâmetros IAA (Índice de Absorção de Água) e ISA (Índice de Solubilidade em Água). A maior presença de finos, como observado em MT4-AJ A(co) e MT4-AJ G (so), aumenta a área superficial específica, favorecendo maior capacidade de absorção de água, gelatinização mais rápida e elevação do IAA. Além disso, partículas menores tendem a liberar maior fração de sólidos solúveis pela ruptura estrutural mais pronunciada do amido, justificando aumentos de ISA (Azeem, Mu e Zhang, 2021). Esse comportamento é coerente com a natureza cerosa do arroz japonês, rico em amilopectina e mais suscetível à gelatinização e à fragmentação durante moagem ou processamento térmico. Assim, formulações “AJ” tendem a formar massas mais macias, com maior coesão interna e menor firmeza após cocção, efeito já amplamente reconhecido na literatura para sistemas com maior teor de amilopectina.

As curvas RVA reforçam essa interpretação. Formulações com maior proporção de partículas finas apresentam menor viscosidade de pico (provavelmente indicando amido mais danificado ou pré-gelatinizado), maior viscosidade final, e menor tendência à retrogradação, efeitos coerentes com o comportamento de amidos cerosos ou parcialmente desestruturados (Boakye *et al.*, 2023; Ajita, 2018). As amostras com distribuição granulométrica mais grossa e monomodal (MT4 G (so), MT4-A(so)) usualmente exibem picos de viscosidade mais altos, maior resistência ao cisalhamento, e tendência à maior retrogradação, favorecendo a firmeza da massa e melhor textura após cozimento, atributos desejáveis em macarrões glúten-free.

No contexto do processamento do *fusilli*, a granulometria também afeta diretamente compactação, plasticidade da massa, preenchimento da matriz da extrusora e estabilidade mecânica da forma helicoidal (Pismag *et al.*, 2024). Misturas mais finas (como MT4-AJ G (so)) reduzem a resistência mecânica da massa durante o corte e conformação, podendo gerar produtos com menor definição do formato, maior pegajosidade e maior perda de sólidos na água de cozimento. Já distribuições bimodais, como em MT4 G (co), tendem a melhorar o empacotamento das partículas

e reduzir a porosidade, possibilitando massas mais densas e resistentes, embora possam apresentar menor expansão e menor elasticidade devido à menor mobilidade da água entre partículas.

Figura 5 - Perfil granulométrico por difração a laser das diferentes formulações para macarrão tipo *fusilli*



Nota: (1A – MT4 G (so), 1B – MT4 G (co), 1C – MT4-A (so), 1D – MT4-A (co), 1E – MT4-AJ G(so), 1F – MT4-AJ A (co), 1G – MT4-AJ (so), 1H – MT4AJG).  
 Fonte: Elaborada pela própria autora.

Portanto, a integração dos resultados demonstra que a granulometria não é apenas um atributo físico isolado, mas um modulador direto: da hidratação (IAA), da solubilização de sólidos (ISA), do perfil de gelatinização e viscosidade (RVA), da coerência estrutural da massa, e da qualidade sensorial e tecnológica do *fusilli*.

Formulações com maior presença de amido ceroso e partículas finas favorecem massas mais coesas e macias, mas tendem a menor resistência mecânica. Já formulações com distribuição mais uniforme e partículas maiores favorecem textura firme, menor pegajosidade e melhor resistência após cocção, características essenciais para massas sem glúten de alta qualidade.

Assim, a escolha da granulometria ideal deve equilibrar hidratação controlada, integridade estrutural e comportamento reológico, de modo a otimizar tanto o processamento quanto a qualidade final do macarrão *fusilli* glúten-free.

#### **4.4.5.2 Análise da correlação entre granulometria, hidratação, RVA e textura do *fusilli***

A análise integrada dos resultados de difração a laser, hidratação (IAA/ISA), perfil viscoamilográfico (RVA) e propriedades texturais do *fusilli* evidencia relações diretas entre a estrutura física das farinhas formuladas e o desempenho funcional das massas sem glúten (Sotelo-Díaz *et al.*, 2023). Entre as amostras avaliadas, observou-se que formulações com distribuição granulométrica monomodal e estreita, como MT4 G(so) e MT4-A(so), apresentaram tamanhos médios na faixa de 200–300  $\mu\text{m}$ , baixa fração de finos e ausência de partículas grosseiras. Esse padrão físico se traduziu em hidratação mais controlada (IAA moderado), baixa solubilidade (ISA reduzido) e curvas RVA com maior viscosidade de pico e maior tendência à retrogradação, provavelmente indicando que a integridade dos grânulos de amido foi relativamente preservada. Consequentemente, os *fusilli* produzidos com essas farinhas exibiram maior firmeza, menor adesividade e menor perda de sólidos no cozimento, resultando em produtos estruturalmente estáveis e com boa definição do formato helicoidal (Pessanha *et al.*, 2021).

Em contraste, formulações contendo arroz japonês (AJ), como MT4-AJ A (co) e MT4-AJ G (so), apresentaram granulometria mais fina, maior proporção de partículas abaixo de 100  $\mu\text{m}$  e, em alguns casos, deslocamento do D50 para valores inferiores a 150–180  $\mu\text{m}$ . A maior fragmentação da matriz pode estar associada à

predominância de amilopectina no arroz ceroso e ao maior grau de gelatinização observado durante o processamento, o que possivelmente resultou em maior área superficial disponível para interação com a água, podendo influenciar os valores de IAA e, sobretudo, de ISA.

Paralelamente, as curvas RVA dessas amostras exibiram redução da viscosidade de pico, menor resistência ao cisalhamento (*breakdown* reduzido), maior viscosidade final e menor tendência à retrogradação. Tal comportamento é típico de amidos parcialmente danificados ou pré-gelatinizados, nos quais a estrutura granular já se encontra comprometida antes do ensaio viscoamilográfico (Azeem, Mu e Zhang, 2021).

Essas modificações estruturais influenciaram diretamente a textura do *fusilli*. A maior disponibilidade de finos e a ruptura prévia da estrutura do amido resultaram em massas mais coesas, porém menos resistentes, com redução da firmeza, aumento da adesividade e maior perda de sólidos durante a cocção. A gelatinização acelerada e a rápida hidratação superficial levaram à formação de uma matriz mais pegajosa e suscetível à lixiviação, o que compromete a integridade da massa sem glúten, especialmente em formatos helicoidais, nos quais a estabilidade mecânica é fundamental (Pessanha *et al.*, 2021; Sotelo-Díaz *et al.*, 2023).

As formulações com distribuição bimodal, particularmente MT4 G(co), apresentaram uma combinação de partículas finas (10–80  $\mu\text{m}$ ) e aglomerados maiores (200–400  $\mu\text{m}$ ). Essa heterogeneidade granulométrica favoreceu o empacotamento das partículas, aumentando a densidade da massa e conferindo maior resistência mecânica ao *fusilli* (Pismag *et al.*, 2024). No entanto, a presença simultânea de frações muito finas e partículas mais grossas pode estar associada a um padrão de hidratação desigual, o que possivelmente se refletiu em valores intermediários de IAA e ISA e em um perfil RVA com maior variabilidade, apresentando viscosidades moderadas. Do ponto de vista tecnológico, essa estrutura resultou em massas firmes e resistentes, porém com menor elasticidade e maior propensão à textura mais compacta.

De forma geral, os resultados demonstram que a granulometria atua como um modulador central das propriedades funcionais e viscoamilográficas das farinhas, influenciando diretamente a formação da estrutura do *fusilli* (Azeem, Mu e Zhang, 2021; Boakye *et al.*, 2023). Farinhas mais grossas ou com baixa fração de finos tendem a preservar melhor a arquitetura do amido, promovendo firmeza, menor

adesividade e menor perda de sólidos. Por outro lado, farinhas mais finas, especialmente aquelas com características cerosas, favorecem hidratação rápida, maior solubilização e redução da resistência estrutural, resultando em massas mais macias, porém menos estáveis.

Assim, a otimização das formulações sem glúten para produção de *fusilli* deve considerar não apenas a composição dos ingredientes, mas também a distribuição granulométrica final, que determina a interação água–amido durante o processamento e a cocção. O equilíbrio entre partículas finas e grossas, associado ao controle do grau de gelatinização do amido, é essencial para atingir a combinação desejada de textura, firmeza e estabilidade, assegurando a qualidade tecnológica do produto final (Ajita, 2018; Sotelo-Díaz *et al.*, 2023).

Tabela 7. Correlações entre parâmetros granulométricos e propriedades funcionais (IAA/ISA) e viscoamilográficas (RVA)

| Componente avaliado                          | Condição granulométrica                                                            | Impacto esperado no IAA (absorção de água)                     | Impacto esperado no ISA (solubilidade)                | Efeitos correlacionados no RVA                                                                                                                   | Implicações tecnológicas em massas tipo <i>fusilli</i>                                                              |
|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tamanho médio elevado (D50 > 200–300 µm)     | Distribuição monomodal e estreita (ex.: MT4 G(so), MT4-A(so))                      | IAA moderado; hidratação mais lenta e controlada               | ISA reduzido                                          | Maior viscosidade de pico; maior tendência à retrogradação; curva RVA mais “forte”                                                               | Massa mais firme, menor pegajosidade, melhor resistência após cocção                                                |
| Tamanho médio reduzido (D50 < 150–180 µm)    | Maior proporção de finos (ex.: MT4-AJ G(so))                                       | IAA elevado; rápida captação de água                           | ISA aumentado                                         | Redução da viscosidade de pico; maior viscosidade final; menor retrogradação                                                                     | Massa mais macia, maior coesão interna, porém risco de perda de forma e maior pegajosidade                          |
| Alta fração de partículas finas (<100 µm)    | Resultante de maior fragilidade da matriz ou pré-gelatinização (ex.: MT4-AJ A(co)) | Aumento significativo do IAA                                   | ISA elevado devido à liberação de sólidos e dextrinas | Redução da quebra de viscosidade ( <i>breakdown</i> ); aumento do vale ( <i>trough</i> ); comportamento típico de amido parcialmente danificado. | Maior hidratação superficial, massas mais coesas, porém menor resistência mecânica                                  |
| Distribuição bimodal (10–80 µm + 200–400 µm) | Mistura de partículas finas e aglomerados maiores (ex.: MT4 G(co))                 | IAA intermediário a elevado (dependendo da proporção de finos) | ISA moderado                                          | Perfil RVA híbrido: viscosidade de pico moderada; curva menos previsível                                                                         | Melhor empacotamento das partículas, maior densidade da massa, resistência mecânica aumentada, porém menor expansão |
| Baixa fração de finos (<5%)                  | Amostras pouco fragmentadas e com estrutura interna íntegra                        | IAA menor, hidratação mais lenta                               | ISA reduzido                                          | Alta viscosidade de pico, maior Setback                                                                                                          | Massa firme, boa textura e menor perda de sólidos                                                                   |
| Elevada área superficial específica          | Característica de farinhas com moagem fina; comum em formulações com arroz japonês | IAA alto                                                       | ISA alto                                              | Redução da viscosidade de pico ( <i>peak viscosity</i> ); maior viscosidade final.                                                               | Massa mais uniforme, coesiva, porém maior adesividade                                                               |
| Presença de partículas >600–800 µm           | Cauda grossa da distribuição (pouco observada nos seus gráficos)                   | Não afeta muito o IAA global, mas hidratação mais heterogênea  | Leve redução do ISA                                   | Mayor tendência a curvas RVA com comportamento heterogêneo                                                                                       | Pode gerar grânulos não hidratados, defeitos de forma e textura irregular                                           |

Fonte: Tiwari (2018); Pessanha *et al.* (2021); Azeem, Mu e Zhang (2021); Sotelo-Díaz *et al.* (2023); Boakye *et al.* (2023); Pismag *et al.* (2024).

Uma forma de resumir esta interpretação: Mais finos, resulta em maior IAA, e maiores valores de ISA, RVA mostrando pré-gelatinização e menor pico implica em massas mais macias e pegajosas. Partículas maiores resulta em IAA menor, e ISA menor, RVA mais forte resulta em massas firmes, estáveis e com menor perda de sólidos. Distribuição bimodal implica empacotamento eficiente resultando em maior densidade e resistência mecânica, porém menor elasticidade. Arroz japonês (AJ) tende a produzir farinhas mais finas e mais propensas ao aumento de IAA/ISA e redução da viscosidade de pico.

Tabela 8. Relações entre características granulométricas e atributos de textura de macarrão tipo *fusilli* sem glúten

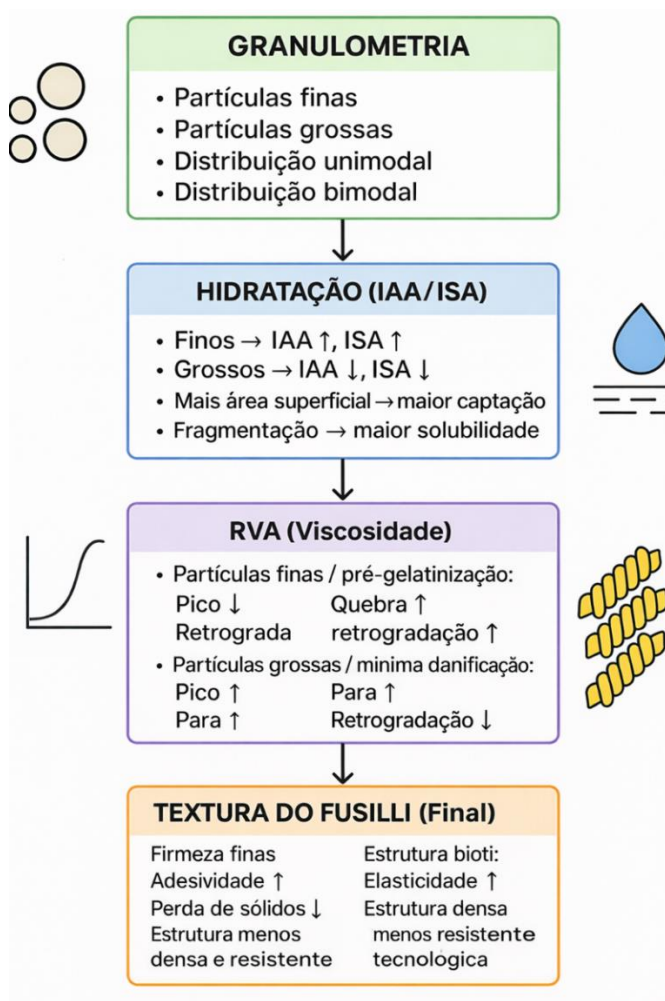
| Parâmetro granulométrico                                            | Comportamento típico                              | Impacto na Firmeza do <i>fusilli</i>           | Impacto na Adesividade         | Impacto na Perda de Sólidos (Cooking Loss) | Interpretação tecnológica                                                                |
|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| D50 elevado (>200–300 $\mu\text{m}$ )                               | Partículas maiores; hidratação lenta              | Firmeza $\uparrow$ (estrutura mais resistente) | Adesividade $\downarrow$       | Cooking loss $\downarrow$                  | A massa mantém integridade estrutural; melhora textura al dente e reduz pegajosidade     |
| D50 reduzido (<150–180 $\mu\text{m}$ )                              | Farinha mais fina; maior área superficial         | Firmeza $\downarrow$                           | Adesividade $\uparrow$         | Cooking loss $\uparrow$                    | Estrutura mais frágil; tendência à gelatinização excessiva; mais suscetível à lixiviação |
| Alta fração de finos (<100 $\mu\text{m}$ )                          | Fragmentação intensa ou amido pré-gelatinizado    | Firmeza $\downarrow\downarrow$                 | Adesividade $\uparrow\uparrow$ | Cooking loss $\uparrow\uparrow$            | Massa colante, com ruptura da estrutura e baixa resistência pós-cozimento                |
| Distribuição monomodal estreita (poucos finos e poucos grossos)     | Homogeneidade granulométrica                      | Firmeza moderada a alta                        | Adesividade baixa              | Cooking loss baixo                         | Textura mais uniforme; hidratação equilibrada, sem zonas de excesso de água              |
| Distribuição bimodal (10–80 $\mu\text{m}$ + 200–400 $\mu\text{m}$ ) | Mistura de partículas finas e aglomerados grandes | Firmeza $\uparrow$ (empacotamento eficiente)   | Adesividade moderada           | Cooking loss moderado                      | Estrutura mais densa; resistência mecânica aumentada; porém menor elasticidade           |
| Alta área superficial específica                                    | Comum em formulações com arroz japonês (AJ)       | Firmeza $\downarrow$                           | Adesividade $\uparrow$         | Cooking loss $\uparrow$                    | Hidratação muito rápida favorece massa macia e mais suscetível à solubilização           |
| Presença de partículas >600–800 $\mu\text{m}$                       | Cauda grossa na distribuição                      | Firmeza heterogênea                            | Adesividade variável           | Cooking loss moderado a alto               | Partículas grandes podem ficar sub-hidratadas, criando defeitos estruturais              |
| Baixa fração de partículas finas                                    | Moagem eficiente e controlada                     | Firmeza $\uparrow$                             | Adesividade $\downarrow$       | Cooking loss $\downarrow$                  | Contribui para maior estabilidade mecânica e bom comportamento no cozimento              |

Fonte: Ajita (2018); Pessanha *et al.* (2021); Azeem; Mu e Zhang (2021); Sotelo-Díaz *et al.* (2023); Boakye *et al.* (2023); Pismag *et al.* (2024).

De forma sintetizada, a correlação das farinhas finas ou com muitos finos tende a se obter *fusilli* mais macio, mais pegajoso e com maior perda de sólidos. Farinhas grossas ou com baixa fração de finos se obtém *fusilli* mais firme, menos pegajoso e com melhor estabilidade. Distribuições bimodais favorecem estrutura densa e resistência mecânica, mas reduzem elasticidade e aumentam a compactação. Formulações com arroz japonês (AJ) tendem a maior adesividade e menor firmeza devido à maior proporção de amilopectina e maior fragilidade da matriz após extrusão seguida secagem e moagem.

A Figura 6 apresenta a análise integrada entre a granulometria das matérias-primas, as propriedades de hidratação, expressas pelo índice de absorção de água (IAA) e índice de solubilidade em água (ISA), e os parâmetros de textura do fusilli sem glúten.

Figura 6 - Integração entre granulometria, propriedades de hidratação (IAA/ISA) e textura de fusilli sem glúten.



Fonte: Elaborada pela própria autora.

#### 4.4.6 Atividade antioxidante

A Tabela 9 apresenta os resultados da atividade antioxidante das amostras analisadas, permitindo a comparação entre as diferentes formulações avaliadas.

Tabela 9. Resultados da Atividade antioxidante

| Amostra                | Ativ. Antioxidante ( $\mu\text{mol Trolox/g amostra}$ ) | Desv. Pad |
|------------------------|---------------------------------------------------------|-----------|
| MT4 A C/0 1            | 8.58                                                    | 0.34      |
| MT4/AJA C/0 1          | 3.80                                                    | 0.07      |
| FARINHA T4 ANTES EXT 1 | 6.68                                                    | 0.23      |
| MT4/AJ G S/0 1         | 3.18                                                    | 0.29      |
| MT4 G C/0 1            | 3.65                                                    | 0.25      |
| FARINHA T4 APOS EXT 1  | 9.48                                                    | 0.86      |
| MT4/AJ G C/0 1         | 4.77                                                    | 0.09      |
| MT4 A S/0 1            | 3.20                                                    | 0.06      |
| MT4/AJ A/S0 1          | 5.01                                                    | 0.00      |
| MT4 G S/0 1            | 6.01                                                    | 0.03      |

Fonte: Elaborada pela própria autora.

A farinha T4 após a extrusão (FARINHA T4 APOS EXT 1) apresentou o maior valor de atividade antioxidante ( $9,48 \mu\text{mol Trolox/g}$ ), superando significativamente a farinha T4 antes da extrusão (FARINHA T4 ANTES EXT 1) ( $6,68 \mu\text{mol Trolox/g}$ ). A extrusão termoplástica pode aumentar a extração e a biodisponibilidade dos compostos fenólicos devido à ruptura das ligações entre esses compostos e a matriz alimentar (Paulino, 2025). Assim, o processamento não apenas preservou, mas também intensificou a capacidade antioxidante da farinha resultante da mistura arroz japonês/grão-de-bico.

Nas formulações de macarrão elaboradas exclusivamente com farinha T4 extrusada, verificou-se variação importante dos valores em função do hidrocolóide utilizado e da presença ou não de ovo. A amostra MT4 A C/0 1, contendo ágar e ovo, apresentou atividade antioxidante elevada ( $8,58 \mu\text{mol Trolox/g}$ ), enquanto a versão sem ovo MT4 A S/0 1 mostrou uma redução ( $3,20 \mu\text{mol Trolox/g}$ ). Esse comportamento pode indicar que o ovo contribuiu para a maior atividade antioxidante da matriz, possivelmente devido à presença de aminoácidos sulfurados e fosfolípidios com reconhecido potencial antioxidante, como evidenciado por Betrouche *et al.* (2022), ao estudarem massas enriquecidas com compostos bioativos. Além disso, o ágar, por formar géis mais hidratados e menos rígidos, pode favorecer a liberação de fenólicos para o meio extrator, aumentando a reatividade no ensaio ABTS.

As formulações contendo gelano apresentaram tendência a valores intermediários ou reduzidos, como observado em MT4 G S/0 1 (6,01  $\mu\text{mol Trolox/g}$ ) e MT4 G C/0 1 (3,65  $\mu\text{mol Trolox/g}$ ). Esse comportamento pode estar associado às propriedades estruturais do gelano, que forma géis mais firmes e menos permeáveis, limitando a difusão dos compostos fenólicos. Palavecino *et al.* (2017) relatam comportamento semelhante em sistemas alimentares nos quais estruturas rígidas diminuem a liberação de compostos antioxidantes para o solvente extrator, reduzindo a capacidade antioxidante medida.

Nas formulações que combinaram farinha extrusada T4 com farinha crua de arroz japonês (T4 + AJ crua), os valores de atividade antioxidante foram, de forma geral, inferiores às formulações feitas exclusivamente com farinha extrusada. A amostra MT4/AJ A/S0 1 (5,01  $\mu\text{mol Trolox/g}$ ) apresentou o maior valor dentro desse grupo, reforçando que o ágar mantém melhor desempenho do que o gelano na retenção e posterior liberação de compostos bioativos. A redução geral nesses valores é consistente com os achados de Sofi *et al.* (2020), que destacam que grãos e farinhas não submetidos ao tratamento térmico possuem compostos fenólicos mais fortemente ligados à matriz, resultando em menor disponibilidade para extração e reação com o radical ABTS+. Assim, a presença de farinha crua na formulação limita a acessibilidade dos compostos antioxidantes, mesmo quando associada a hidrocolóides mais favoráveis, como o ágar.

O padrão observado nas diferentes combinações revela que a atividade antioxidante é modulada pela interação entre processamento térmico, estrutura da matriz formada pelo hidrocolóide e composição proteica da fórmula. O processamento térmico, mostrou-se determinante, maximizando a liberação de compostos bioativos. Por sua vez, o ágar demonstrou favorecer a difusão e liberação desses compostos, enquanto o gelano, ao formar redes tridimensionais mais rígidas, exerceu efeito contrário. Ademais, a presença de ovo contribuiu positivamente para os valores obtidos, reforçando sua importância funcional para produtos derivados de massa.

Esses resultados convergem com o observado por Silva (2024), ao analisar massas integrais de sorgo fermentado, e por Betrouche *et al.* (2022), ao desenvolver massas enriquecidas com ingredientes vegetais, processos e ingredientes capazes de promover ruptura da matriz e facilitar a liberação de compostos fenólicos tendem a elevar a atividade antioxidante. Assim, no presente estudo, a formulação que integra

farinha totalmente extrusada, ágar e ovo mostrou-se a mais eficiente no ponto de vista funcional.

De forma geral, os achados podem indicar que a tecnologia de extrusão aliada à seleção adequada de hidrocolóides e à adição de ingredientes funcionais, como ovo e grão-de-bico, constitui uma estratégia eficaz para o desenvolvimento de massas sem glúten com maior valor funcional.

#### 4.4.7 Digestibilidade *in vitro*

A Tabela 10 apresenta os valores de recuperação de nitrogênio e o teor de proteína estimado ( $N \times 6,25$ ) das amostras avaliadas, considerando os resultados obtidos em triplicata independente (A, B e C) para cada formulação. A apresentação individual das triplicatas permite uma análise mais robusta da variabilidade intrínseca de cada matriz alimentar e de sua influência sobre a digestibilidade proteica *in vitro*.

Tabela 10. Taxa de recuperação de nitrogênio e teor de proteína estimado das amostras

| Amostra          | Triplicata | Recuperação de nitrogênio (%) | Teor de proteína (%) ( $N \times 6,25$ ) |
|------------------|------------|-------------------------------|------------------------------------------|
| Controle (trigo) | A          | 60,22 $\pm$ 2,69              | 9,64 $\pm$ 0,43                          |
|                  | B          | 63,89 $\pm$ 1,92              | 10,23 $\pm$ 0,30                         |
|                  | C          | 63,99 $\pm$ 4,16              | 10,24 $\pm$ 0,66                         |
| MT4 AJ AC/0      | A          | 57,02 $\pm$ 0,71              | 9,12 $\pm$ 0,11                          |
|                  | B          | 66,18 $\pm$ 2,10              | 10,59 $\pm$ 0,34                         |
|                  | C          | 64,78 $\pm$ 2,52              | 10,36 $\pm$ 0,40                         |
| MT4 AJ GC/0      | A          | 53,91 $\pm$ 1,24              | 8,63 $\pm$ 0,21                          |
|                  | B          | 62,17 $\pm$ 9,53              | 9,95 $\pm$ 1,52                          |
|                  | C          | 58,77 $\pm$ 3,13              | 9,41 $\pm$ 0,50                          |
| MT4 GC/0         | B          | 25,85 $\pm$ 4,33              | 4,14 $\pm$ 0,69                          |
|                  | C          | 35,67 $\pm$ 0,00              | 5,71 $\pm$ 0,00                          |
| MT4 AC/0         | A          | 33,09 $\pm$ 1,36              | 5,30 $\pm$ 0,22                          |
|                  | B          | 48,25 $\pm$ 11,31             | 7,72 $\pm$ 1,80                          |
|                  | C          | 40,79 $\pm$ 1,52              | 6,53 $\pm$ 0,25                          |

Nota: Valores expressos como média  $\pm$  desvio-padrão. O teor de proteína foi estimado utilizando o fator de conversão 6,25. Fonte: Elaborada pela própria autora.

De modo geral, observa-se que a recuperação de nitrogênio variou amplamente entre as amostras, tanto entre diferentes formulações quanto entre as triplicatas de uma mesma amostra, evidenciando que a digestibilidade proteica foi fortemente modulada pela composição e pela organização estrutural da matriz alimentar, e não

apenas pelo teor total de proteína. Esses resultados reforçam que a digestibilidade proteica depende da acessibilidade enzimática às proteínas, a qual é diretamente influenciada pelo processamento e pelas interações macromoleculares estabelecidas no produto final.

As amostras controle de trigo (A, B e C) apresentaram valores elevados e relativamente consistentes de recuperação de nitrogênio, variando aproximadamente entre 60 e 64%. A menor dispersão entre as triplicatas provavelmente indica uma matriz estrutural mais homogênea, característica dos macarrões de trigo, cuja rede proteica de glúten, embora resistente, apresenta digestibilidade bem descrita e reproduzível em protocolos *in vitro* do tipo INFOGEST (Brodkorb *et al.*, 2019). Essa homogeneidade contrasta com o comportamento observado nos macarrões sem glúten.

Nas formulações sem glúten à base de arroz japonês associadas ao grão-de-bico (MT4 AJ AC/0 e MT4 AJ GC/0), os valores de recuperação de nitrogênio apresentaram maior dispersão entre as triplicatas, variando aproximadamente de 54 a 66%. Essa variabilidade reflete a heterogeneidade estrutural da matriz proteica, típica de sistemas sem glúten, nos quais proteínas de diferentes origens vegetais coexistem e interagem de maneira menos ordenada (Berti *et al.*, 2004; Marti *et al.*, 2018). A presença do grão-de-bico contribuiu para o aumento do teor proteico estimado, porém não resultou, de forma consistente, em maior digestibilidade em todas as triplicatas.

Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que proteínas de leguminosas, quando submetidas a processamento térmico e mecânico, tendem a formar interações proteína-proteína e proteína-amido mais intensas, resultando em agregados estruturais que reduzem a acessibilidade das enzimas digestivas (Suo *et al.*, 2022). Assim, os valores intermediários observados para essas formulações provavelmente indicam um equilíbrio entre maior teor proteico e limitação parcial da digestão enzimática, dependente da organização microestrutural estabelecida em cada repetição.

As formulações MT4 GC/0, constituídas exclusivamente por grão-de-bico, apresentaram os menores valores de recuperação de nitrogênio, variando aproximadamente entre 26 e 36%. Esses resultados provavelmente indicam baixa digestibilidade proteica *in vitro*, associada a uma matriz altamente compacta e menos permeável à ação enzimática. A ausência de uma matriz amilácea mais gelatinizada,

aliada à elevada concentração de proteínas de leguminosas, provavelmente limitou a difusão das enzimas digestivas. Achados semelhantes foram reportados por Chamone *et al.* (2023), que demonstraram que a digestibilidade proteica de leguminosas é fortemente dependente da intensidade e do tipo de processamento termomecânico aplicado.

As amostras MT4 AC/0, por sua vez, apresentaram valores intermediários de recuperação de nitrogênio, com variação entre aproximadamente 33 e 48% entre as triplicatas. Esses resultados podem indicar que a combinação de arroz japonês com outros componentes, na ausência do grão-de-bico, resulta em uma matriz com digestibilidade proteica moderada, inferior às formulações mistas com leguminosas, porém superior às formulações exclusivamente à base de grão-de-bico. Essa observação reforça que formulações multicomponentes podem modular positivamente a digestibilidade, embora também aumentem a variabilidade estrutural, conforme discutido por Marti *et al.* (2017).

Do ponto de vista nutricional integrado, os resultados obtidos corroboram estudos que demonstram que a digestibilidade proteica não necessariamente acompanha a digestibilidade do amido. Sofi *et al.* (2020) evidenciaram que determinadas estratégias tecnológicas podem simultaneamente favorecer a biodisponibilidade proteica e reduzir a fração de amido rapidamente digestível, promovendo benefícios metabólicos. Nesse contexto, a variabilidade observada entre as triplicatas pode provavelmente indicar que as formulações contendo arroz japonês e grão-de-bico apresentam potencial para equilibrar digestibilidade proteica e controle glicêmico, desde que o processamento e a composição sejam adequadamente ajustados.

#### **4.4.8 Eletroforese em gel de poliacrilamida e cromatografia líquida em coluna de fase reversa**

A Figura 7 ilustra o perfil eletroforético em gel de poliacrilamida a 10% das amostras de macarrão sem glúten, submetidas a diferentes tratamentos em função das proporções de farinha de arroz e de grão-de-bico. Na figura estão apresentados os padrões de bandas proteicas correspondentes a cada formulação avaliada, permitindo a visualização comparativa das frações polipeptídicas presentes nas amostras.

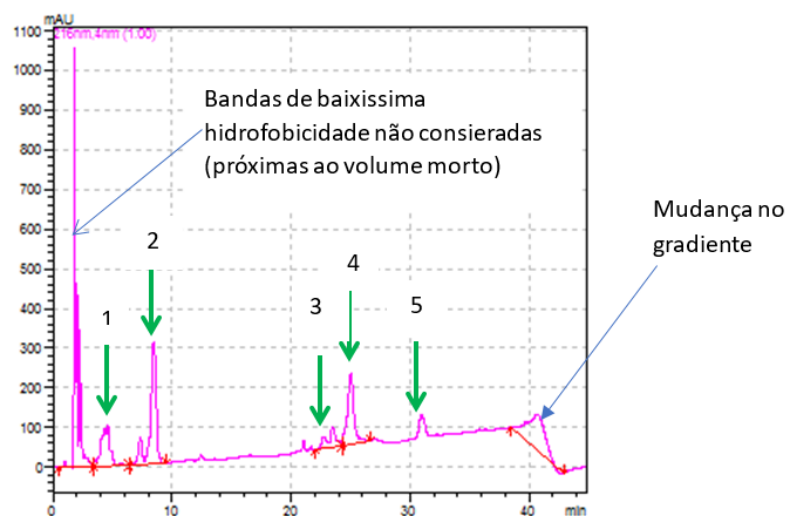
Figura 7 - Perfil de identidade eletroforético (10% acrilamida) das amostras de macarrão, sem glúten, submetidas a diferentes tratamentos em relação às proporções de arroz e grão de bico, após extração de suas proteínas hidrofóbicas com álcool 70%



Fonte: Alessandro dos Santos e Tatiana Azevedo.

A Figura 8 apresenta o padrão de identidade da amostra de macarrão que apresentou os melhores parâmetros tecnológicos. O perfil obtido por cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC) evidencia a separação de cinco cadeias polipeptídicas com boa magnitude, caracterizadas por picos bem definidos, provavelmente indicando adequada resolução cromatográfica e organização do perfil peptídico da amostra.

Figura 8 - Padrão de identidade da amostra de macarrão com melhores parâmetros tecnológicos obtido por HPLC



Nota: Padrão de identidade cromatográfico das amostras de macarrão, sem glúten, submetidas a diferentes tratamentos em relação às proporções de arroz e grão de bico, relativo tratamento do poço 8

das eletroforese e separadas por HPLC, quando solubilizadas em extrato aquoso pH 9,0, pós extração em álcool 70%. Fonte: Elaborada pela própria autora.

Os perfis polipeptídicos obtidos por HPLC (hidrofobicidade – fase reversa) foram bastante reprodutivos de forma geral, diferenciando-se apenas nas magnitudes de bandas, especialmente nas de média e alta hidrofobicidade. As amostras referentes aos tratamentos 5, 6, 7 e 8 apresentam maior número de bandas relevantes (5 bandas). A figura 8 mostra o padrão de identidade da amostra referente ao poço 8 da eletroforese, correspondente ao de melhor propriedade tecno-funcional, como descrito na Tabela 11.

Tabela 11: Correlação da intensidade de coloração das bandas obtidas na eletroforese SDS-PAGE com as melhores propriedades tecnológicas em diversos tratamentos de formulação de macarrão sem glúten feito com grão de bico e arroz

| Poço da eletroforese | Formulação               | Perfil proteico | Solubilidade proteica | Textura         | Cozimento                    |
|----------------------|--------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|------------------------------|
| 1                    | M1(50%)/sem ovo/ágar     | *               | Muito baixa           | Macia           | TCO↑<br>AM↓<br>AV↓<br>PS↑    |
| 2                    | M2(50%)/sem ovo/ágar     | 0               | Nenhuma               | Firmeza*        | TCO↓<br>AM↑<br>AV↑<br>PS↓    |
| 3                    | M3(50%)/ sem ovo /gelana | 0               | Nenhuma               | Flexível/ coesa | TCO→<br>AV↑<br>PS→           |
| 4                    | M4(50%)/sem ovo/gelana   | 0               | Nenhuma               | Firmeza**       | TCO↓<br>AM↑<br>AV↑<br>PS↓    |
| 5                    | M5(100%),/ sem ovo/ágar) | *               | Muito baixa           | Firmeza*        | TCO↓<br>AM↑<br>AV↑<br>PS↓    |
| 6                    | M6(100%), com ovo/ágar   | ****            | Alta                  | Muito firme     | TCO↓<br>AM↑<br>AV↑<br>PS↓↓   |
| 7                    | M7(100%) sem ovo/gelana  | **              | Intermediária         | Elasticidade    | TCO↓<br>AM↑<br>AV↑<br>PS↓    |
| 8                    | M8(100%)/com ovo/gelana  | *****           | Muito alta            | Melhor textura  | TCO↓<br>AM↑↑<br>AV↑↑<br>PS↓↓ |

Nota: M: TCO: tempo de cozimento ótimo; AM: aumento de massa; AV: Aumento de volume. PS: perda de sólidos solúveis. Fonte: Elaborada pela própria autora.

A Tabela 11 apresenta a correlação da intensidade de coloração das cadeias polipeptídicas obtidas na eletroforese com as melhores propriedades tecnológicas dos diferentes formulações de macarrão sem glúten, elaborados com farinha de grão-de-bico e arroz. A tabela permite comparar os tratamentos avaliados, evidenciando como a intensidade de colorações (maior solubilidade das proteínas) das frações proteicas hidrofóbicas se associa ao desempenho tecnológico do produto final, como textura, estabilidade estrutural e qualidade de cozimento.

Na eletroforese SDS-PAGE (Figura 7) as cadeias polipeptídicas foram classificadas pela intensidade e diversidade de coloração, sendo representadas por quatro diferentes graus, representados pela simbologia: \*, \*\*, \*\*\*, \*\*\*\*, Tabela 11. O solvente utilizado para a extração foi álcool, 70%, que solubiliza as proteínas com baixa, média solubilidade. Este também foi utilizado para análise também por HPLC, fase reversa. Entretanto, as amostras apresentaram turbidez o que impediu que o extrato de álcool 70% fosse aplicado direto na coluna. Para tal, foi feita uma centrifugação e os resultados da Figura 8 foram obtidos após solubilização do “pellet” em solução aquosa alcalinizada com NaOH para pH 9,0. Um quádruplo aparecimento de picos com diferentes tempos de retenção foi obtido por HPLC. Só desta forma pode-se observar o mesmo total de picos em relação ao obtido com álcool 70%, observado por eletroforese SDS-PAGE. Portanto, a Figura 7 (eletroforese) e a Figura 8 (HPLC fase reversa) mostram um padrão de identidade similares em quantidades de cadeias polipeptídica, no que diz respeito ao número destas, cinco picos e cinco bandas. A distribuição das cadeias polipeptídicas observadas na Figura 7 mostrou similaridade com observado para grão de bico por Hammed *et al.* (2009), nos poços de 6 a 8. O perfil das cadeias polipeptídicas dos genótipos Noor 91 e CM 200 mostrou um quádruplo bandejamento similar ao observado na separação das cadeias polipeptídicas, como evidenciado no gel da Figura 7, com valores de 51, 57, 95, 85 e 73 kDa, um pouco aumentados em relação ao obtido por Hammed *et al.* (2009). Estes obtiveram um triplo bandejamento em torno de 33 kDa e outro de dupla cadeia polipeptídica em torno de 27 kDa. Isto pode ser explicado pelo fato da extrusão ter causado modificações nestas proteínas afetando as cadeias polipeptídicas de forma estrutural, aumentando o agregamento das mesmas o que gera consequentemente uma massa mais acentuada.

Só apareceram cadeias polipeptídicas nos poços do decorrentes do grão-de-bico. Nos tratamentos em que houve incremento na quantidade de arroz adicionado

não houve bandejamento proteico. O fato do grão-de-bico apresentar, em base seca, aproximadamente 27% de proteína e o arroz 10% (Tabela Taco 11) mostra que pode-se explicar a falta de aparecimento de cadeias polipeptídicas nos poços de 1 a 4,

As interações entre proteínas e polissacarídeos são fundamentais para determinar as propriedades tecnofuncionais dos sistemas alimentares, neste trabalho é mostrado que as proteínas de grão apresentam melhor característica de solubilização quando utilizadas junto com proteínas de ovo, poço 6 e 8, figura 7. Deve-se ressaltar que as proteínas observadas nas análises por eletroforese SDS-PAGE e HPLC não são provenientes do ovo, uma vez que as principais proteínas do ovo, como a ovoalbumina da clara (~45 kDa) e a lipovitelina (~120 kDa), não foram detectadas nos géis de eletroforese. Proteínas e polissacarídeos podem formar complexos intermoleculares, os quais podem influenciar de forma significativa os mecanismos de solubilização. Os polissacarídeos podem reduzir a disponibilidade das proteínas ao alterar sua conformação, aumentar a viscosidade do meio digestivo, inibir enzimas digestivas e/ou favorecer ou dificultar interações com componentes fisiológicos, como sais biliares e fosfolipídios, tudo isto causado por formação de agregados pouco solúveis. Espera-se que esses efeitos modifiquem o processo de transporte intestinal e a biodisponibilidade dos nutrientes. Portanto, compreender o mecanismo e o impacto das interações proteína-polissacarídeo é essencial para desenvolver estratégias de processamento eficientes que prever o impacto nutricional dos alimentos (Fontes-Candia *et al.*, 2025).

No campo dos polissacarídeos-proteínas, pesquisas mostram como o processamento térmico e não térmico, como o tratamento hidrotérmico e o “*cavitation jet*”, afetam a estrutura secundária e terciária, influenciando solubilidade, emulsificação e estabilidade. Proteínas de soja e quinoa, por exemplo, tiveram suas funcionalidades melhoradas mediante tratamentos controlados. Além disso, interações entre proteínas e polissacarídeos, como o arabinoxilano não extraível em água, demonstraram capacidade de modificar significativamente a rede do glúten, impactando a qualidade de produtos farináceos (Fontes-Candia *et al.*, 2025).

O processamento por extrusão parece estar associado a modificações no perfil eletroforético das farinhas de grão-de-bico e arroz japonês. As amostras extrudadas aumento das frações proteicas de alto peso molecular (>73 kDa). Concomitantemente, observou-se intensificação de bandas na região de alta peso molecular (102 a 73 kDa), valores estes maiores do que observados em grão-de-bico sem tratamento por

extrusão, que foram de 33 a 27 kDa, provavelmente indicativa de formação de agregados proteicos com hidrofobicidade aumentada decorrente do processo de extrusão.

A presença de bandas difusas e regiões de “*smear*” entre 50–102 kDa reforça a ocorrência de agregação proteica parcial, fenômeno atribuído à exposição de grupos hidrofóbicos, oxidação e formação de ligações dissulfeto durante o cisalhamento térmico, conforme demonstrado em análises estruturais de proteínas extrusadas. A diminuição de bandas bem definidas entre 30–40 kDa provavelmente indica a desnaturação irreversível das globulinas de reserva, que são altamente sensíveis ao calor e tendem a se redistribuir em polipeptídeos menores ou complexos insolúveis (Loveday, 2021).

Essas alterações estruturais são coerentes com a literatura contemporânea sobre extrusão de proteínas vegetais, que descreve simultaneamente a formação de polipeptídeos de baixo peso molecular, agregados proteicos e perda de solubilidade funcional (Loveday, 2021; Yang *et al.*, 2023). Assim, o perfil observado no SDS-PAGE confirma que a extrusão modificou profundamente a estrutura das proteínas do grão-de-bico e do arroz japonês, com impactos tecnológicos e funcionais relevantes, especialmente na digestibilidade, solubilidade e na geração de compostos bioativos.

A correlação entre o perfil eletroforético de proteínas e os parâmetros tecnológicos do alimento evidencia que amostras com maior intensidade de bandas proteicas, especialmente aquelas com presença de frações mais estruturadas, similares a as encontradas em proteínas inteiras ou parcialmente hidrolisadas, apresentam melhor desempenho textura I. Estudos recentes com isolado proteico de ervilha (PPI) demonstraram que tratamentos térmicos modificam a conformação molecular, resultando em partículas proteicas menores, mais solúveis e mais flexíveis, o que favorece interações proteína–proteína e formação de géis mais elásticos (Liu *et al.*, 2024).

Essa maior “intensidade proteica” associada a frações intactas ou pouco degradadas contribui para uma rede estrutural mais organizada, aumentando firmeza, elasticidade e coesão da matriz, e reduzindo a lixiviação de sólidos solúveis durante a cocção, ou seja, menor perda de sólidos solúveis. Por outro lado, perfis eletroforéticos com menor intensidade (provavelmente indicando menor quantidade ou degradação proteica) tendem a gerar matrizes mais frágeis, com textura mais

macia e maiores perdas de sólidos solúveis, provavelmente devido à menor formação de ligações proteína-proteína e a matriz estrutural menos coesa.

Adicionalmente, revisões sobre interações proteína-polissacarídeo e agregados em formulações alimentícias têm destacado que a combinação dessas moléculas, sob variação de pH, força iônica, temperatura e tratamento mecânico, pode impactar fortemente a estrutura e textura final dos alimentos (Gentile, 2022).

Esse conjunto de evidências pode indicar fortemente que a presença de proteínas intactas ou sem hidrólise, associadas à preservação da capacidade de formar interações moleculares (proteína-proteína ou proteína-polissacarídeo), influencia diretamente a organização da matriz estrutural do alimento, contribuindo para menor solubilização no cozimento e melhor desempenho textural.

A correlação entre o padrão eletroforético e os parâmetros tecnológicos demonstra que amostras com maior intensidade de bandas proteicas, especialmente aquelas contendo gelatina e ovo (M6 e M8), apresentaram maior firmeza, elasticidade e gomosidade, além de menores perdas de sólidos solúveis durante a cocção. Isso provavelmente indica que a presença de proteínas intactas ou não hidrolisadas e sem formação de peptídeos podem influenciar diretamente a organização da matriz estrutural, contribuindo para menor solubilização no cozimento e melhor desempenho textural. Por outro lado, perfis de eletroforese com menor intensidade (ex.: M1) correlacionaram-se com texturas mais macias e maiores perdas de sólidos, caracterizando matrizes menos coesas e mais suscetíveis à hidrólise térmica, não observadas no perfil eletroforético destas amostras.

#### **4.4.9 Microscopia eletrônica de varredura**

A Figura 9 demonstra as imagens da microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos macarrões avaliados conforme a sua composição (T4 ou T4AJ), presença de ágar ou gelatina e aumentos (50, 100, 500 e 1000 vezes). A composição do macarrão foi: T4 (macarrão elaborado com farinha cozida com 40% de grão-de-bico e 60% de arroz japonês) e T4AJ (macarrão elaborado com 50% da farinha cozida, similar a T4, e 50% de farinha crua de arroz japonês), ambas as formulações contendo ovo e adicionadas de ágar ou gelatina.

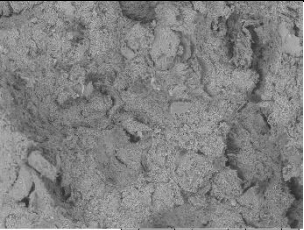
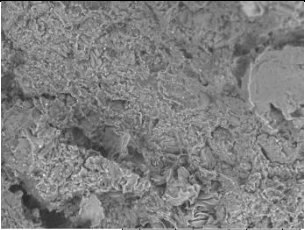
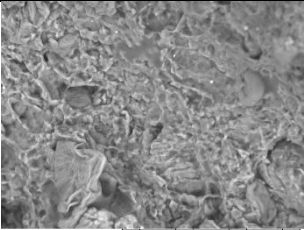
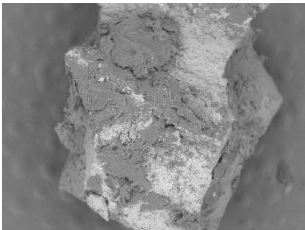
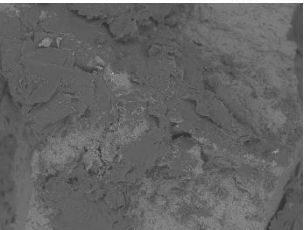
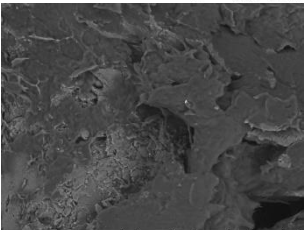
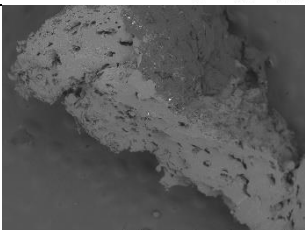
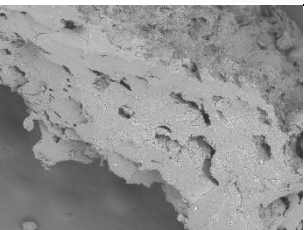
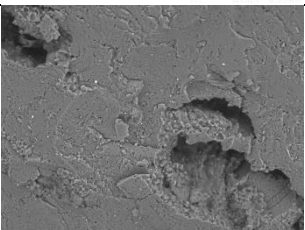
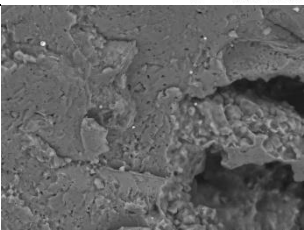
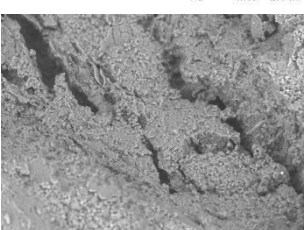
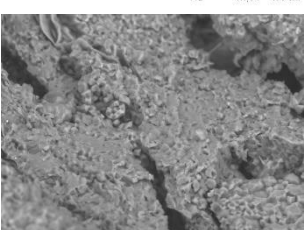
Quanto à integração da matriz, presença de fissuras, porosidade e grau de gelatinização do amido, o macarrão T4AJ ágar apresentou os melhores resultados,

visto que a MEV demonstrou baixa incidência de fissuras, porosidade intermediária e elevada gelatinização do amido, características associadas à obtenção de macarrões com textura adequada, conforme descrito na literatura para massas sem glúten processadas por extrusão e secagem controlada (Bouasla e Wójtowicz, 2021; Marti *et al.*, 2017).

Outro macarrão que também apresentou resultados favoráveis foi o T4 ágar, o qual apresentou boa integração da matriz e gelatinização do amido semelhante ao T4AJ ágar, com poucas fissuras e baixa porosidade, favorecendo elasticidade e firmeza da massa. Estruturas compactas e contínuas, como as observadas nessas formulações, têm sido associadas a menores perdas no cozimento e melhor desempenho textural em massas sem glúten (Yalcin e Basman, 2008; Bouasla e Wójtowicz, 2021).

O macarrão T4AJ gelano apresentou poucas fissuras e porosidade intermediária, porém menor grau de gelatinização do amido, o que pode resultar em uma textura apenas aceitável. Em contraste, o T4 gelano apresentou elevada incidência de fissuras, alta porosidade e baixa gelatinização do amido, resultando em uma matriz estruturalmente frágil, com tendência à quebra e baixa firmeza, configurando o pior desempenho entre as amostras avaliadas. Resultados semelhantes foram descritos em estudos que associam alta porosidade e descontinuidade estrutural à redução da resistência mecânica e da qualidade tecnológica de massas sem glúten (Raungrusmee *et al.*, 2020).

Figura 9 - Microscopia eletrônica de varredura dos macarrões.

| Identificação |        | Aumentos                                                                            |                                                                                      |                                                                                       |                                                                                       |
|---------------|--------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|               |        | 50X                                                                                 | 100X                                                                                 | 500X                                                                                  | 1000X                                                                                 |
| T4            | Ágar   |    |    |    |    |
|               | Gelano |    |    |    |    |
| T4 AJ         | Ágar   |   |   |   |   |
|               | Gelano |  |  |  |  |

Fonte: Elaborada pela própria autora.

Foi observado que o macarrão que apresentou os melhores achados microestruturais foi o T4AJ ágar. Essa formulação foi elaborada com 50% de farinha cozida (40% de grão-de-bico e 60% de arroz japonês), proveniente da extrusão a 80 °C e 30% de umidade, e 50% de farinha crua de arroz japonês. Essa combinação favoreceu a formação de uma matriz coesa, com poucas fissuras, porosidade moderada e elevado grau de gelatinização do amido, em consonância com estudos que demonstram que a combinação de amido parcialmente gelatinizado e amido nativo contribui para melhor organização estrutural e desempenho tecnológico (Marti *et al.*, 2018; Bouasla e Wójtowicz, 2021).

O arroz japonês é caracterizado por elevado teor de amilopectina, formando uma rede amilácea mais aberta, que favorece a absorção de água, promove maior gelatinização do amido e reduz a retrogradação, contribuindo para uma textura mais macia, elástica e com melhor mastigabilidade (Ma *et al.*, 2025; Chung *et al.*, 2012; Raungrusmee *et al.*, 2020). No presente estudo, observou-se que as formulações com maior proporção de arroz japonês apresentaram melhor desempenho estrutural, confirmando a importância desse ingrediente na qualidade final do macarrão.

Apesar disso, o T4AJ gelano apresentou apenas gelatinização intermediária, mesmo com elevada proporção de arroz japonês, evidenciando que o tipo de hidrocolóide exerce papel decisivo na organização da matriz. O ágar apresentou maior sinergia com o amido do arroz japonês, favorecendo retenção de água e gelatinização, enquanto o gelano pode competir com o amido pela água disponível, formando estruturas mais rígidas e frágeis. Além disso, a presença de íons metálicos pode afetar significativamente a estrutura dos géis de gelano (Nishinari e Fang, 2017; Zia *et al.*, 2018; Raungrusmee *et al.*, 2020).

Assim, os melhores resultados observados para as formulações com ágar podem ser atribuídos à sua capacidade de promover retenção hídrica sem bloquear a difusão da água, favorecendo uma matriz elástica, coesa e com elevado grau de gelatinização do amido, características essenciais para a obtenção de macarrões sem glúten com boa firmeza e mastigabilidade (Yalcin *et al.*, 2020; Bouasla e Wójtowicz, 2021).

## 4.5 Conclusão

Os resultados obtidos no presente capítulo demonstram que o desempenho tecnológico, nutricional e funcional de macarrões tipo fusilli sem glúten à base de arroz japonês pode ser significativamente aprimorado por meio da combinação estratégica de farinha pré-cozida por extrusão, hidrocoloides estruturantes e ingredientes proteicos coadjuvantes, em especial o ovo em pó. A abordagem multifatorial adotada permitiu compreender, de forma integrada, como a interação entre composição, processamento e microestrutura governa a qualidade final do produto.

A substituição parcial (50%) da farinha crua por farinha extrusada mostrou-se superior à substituição total, evidenciando que a coexistência de amido nativo e amido parcialmente gelatinizado é essencial para o equilíbrio entre hidratação, integridade estrutural e estabilidade durante o cozimento. Essa estratégia favoreceu maior intumescimento controlado, menor perda de sólidos solúveis e melhor desempenho textural, confirmando que a farinha extrusada atua como componente funcional, enquanto a fração crua contribui para a manutenção da estrutura e das características sensoriais desejáveis.

Entre os hidrocoloides avaliados, a gelana destacou-se por sua elevada capacidade de estruturar a matriz, promovendo aumento significativo da firmeza, coesividade, gomosidade e mastigabilidade dos macarrões, aproximando o comportamento mecânico do fusilli sem glúten daquele observado em massas convencionais de trigo. Contudo, a interação da gelana com o amido ceroso do arroz japonês, especialmente em formulações com maior teor de farinha crua, mostrou-se mais restritiva à difusão de água, o que, em determinados casos, limitou a gelatinização do amido e impactou negativamente a microestrutura. Por outro lado, o ágar apresentou maior compatibilidade com o amido do arroz japonês, favorecendo gelatinização mais homogênea, menor ocorrência de fissuras e microestruturas mais contínuas, especialmente nas formulações com mistura de farinhas crua e extrusada.

A incorporação de ovo em pó exerceu papel decisivo na melhoria da qualidade global do produto, atuando de forma sinérgica com os hidrocoloides e a farinha extrusada. As proteínas do ovo contribuíram para o reforço da matriz estrutural, reduziram a perda de sólidos solúveis durante o cozimento, intensificaram os parâmetros de textura e elevaram a aceitação sensorial, além de influenciarem positivamente a digestibilidade proteica e a atividade antioxidante das formulações.

Do ponto de vista nutricional, a incorporação de grão-de-bico por meio da farinha extrusada resultou em macarrões com maior teor de proteínas, fibras alimentares e cinzas minerais, sem comprometer a qualidade tecnológica e sensorial. A extrusão termoplástica mostrou-se uma ferramenta eficaz não apenas para a melhoria da processabilidade, mas também para o aumento da atividade antioxidante, evidenciando maior biodisponibilidade de compostos fenólicos após o processamento, particularmente nas formulações com 100% de farinha extrusada.

As análises de granulometria, hidratação (IAA/ISA), RVA e textura confirmaram que a distribuição de tamanho de partículas atua como um modulador central da qualidade do fusilli sem glúten. Farinhas com distribuição monomodal e baixa fração de finos favoreceram maior firmeza, menor adesividade e menor perda de sólidos, enquanto distribuições excessivamente finas, especialmente associadas ao arroz japonês, resultaram em massas mais macias e pegajosas. Distribuições bimodais, por sua vez, melhoraram o empacotamento das partículas e a resistência mecânica, porém reduziram a elasticidade, reforçando a necessidade de equilíbrio granulométrico na formulação.

As análises realizadas por SDS-PAGE, HPLC em fase reversa e microscopia eletrônica de varredura provavelmente indicam a ocorrência de alterações no perfil proteico do grão-de-bico após a extrusão. Tais alterações podem estar relacionadas a processos de desnaturação, agregação e geração de peptídeos de menor massa molecular. Essas alterações estiveram diretamente associadas à melhoria das propriedades tecnológicas e à organização da matriz estrutural, sobretudo nas formulações contendo gelana e ovo, nas quais se observou maior intensidade de bandas proteicas e microestruturas mais densas e coesas.

Finalmente, a otimização por desejabilidade indicou que a formulação composta por 50% de farinha extrusada, gelana e ovo em pó apresentou o melhor equilíbrio entre estabilidade de cozimento, propriedades mecânicas, aceitação sensorial e valor nutricional, configurando-se como a alternativa mais promissora para aplicação industrial. Os resultados obtidos demonstram que a combinação racional de processamento por extrusão, seleção adequada de hidrocoloides e uso de ingredientes proteicos permite superar limitações estruturais inerentes às massas sem glúten, viabilizando a produção de macarrões tipo fusilli com desempenho tecnológico elevado e perfil nutricional superior.

Em síntese, este capítulo confirma que o desenvolvimento de massas sem glúten de alta qualidade depende de uma abordagem sistêmica, na qual matéria-prima, processamento, microestrutura e funcionalidade são tratadas de forma integrada. Os achados fornecem subsídios científicos consistentes para o avanço tecnológico de produtos sem glúten à base de arroz e leguminosas, com potencial de aplicação industrial e contribuição relevante para a diversificação e melhoria nutricional desse segmento de mercado.

## REFERÊNCIAS

AJITA, Tiwari. Extrusion cooking technology: an advance skill for manufacturing of extrudate food products. In: **Extrusion of metals, polymers and food products**. 2018.

ALJADA, B.; ZOHNI, A.; EL-MATARY, W. The gluten-free diet for celiac disease and beyond. **Nutrients**, v. 13, p. 3993, 2021.

ALVAREZ-JUBETE, Laura; ARENDT, Elke K.; GALLAGHER, Eimear. Nutritive value of pseudocereals and their increasing use as functional gluten-free ingredients. **Trends in Food Science & Technology**, v. 21, n. 2, p. 106–113, 2010.

AOAC. **Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists**. 18. ed. Washington, DC: AOAC, 2010.

ASCHERI, J. L. R. **Perguntas e respostas sobre extrusão termoplástica de alimentos: uma abordagem simplificada**. Ponta Grossa: Atena Editora, 2022.

ASCHERI, J. L. R. Why food technology by extrusion-cooking? **Discoveries in Agriculture and Food Sciences**, v. 12, n. 4, p. 110–144, 2024. DOI: 10.14738/tnc.124.17453.

AZEEM, Muhammad; MU, Tai-Hua; ZHANG, Miao. Influence of particle size distribution on nutritional composition, microstructural and antioxidant properties of orange and purple-fleshed sweet potato flour. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 45, n. 4, e15283, 2021.

BELLO-PEREZ, Luis A.; FLORES-SILVA, Pamela C. Interaction between starch and dietary compounds: new findings and perspectives to produce functional foods. **Food Research International**, v. 172, p. 113182, 2023.

BERTI, Cristiana et al. In vitro starch digestibility and in vivo glucose response of gluten-free foods and their gluten counterparts. **European Journal of Nutrition**, v. 43, n. 4, p. 198–204, 2004.

BETROUCHE, Amel et al. Antioxidant properties of gluten-free pasta enriched with vegetable by-products. **Molecules**, v. 27, n. 24, p. 8993, 2022.

BOAKYE, Prince G. et al. Physicochemical and nutritional properties of extruded products from cereals of the Triticeae tribe – a review. **Food Chemistry Advances**, v. 3, p. 100379, 2023.

BOUASLA, Abdallah; WÓJTOWICZ, Agnieszka. Gluten-free rice instant pasta: effect of extrusion-cooking parameters on selected quality attributes and microstructure. **Processes**, v. 9, n. 4, p. 693, 2021.

BOUASLA, Abdallah; WÓJTOWICZ, Agnieszka; ZIDOUNE, Mohammed Nasereddine. Gluten-free precooked rice pasta enriched with legume flours: physical

properties, texture, sensory attributes and microstructure. **LWT – Food Science and Technology**, v. 75, p. 569–577, 2017.

BOURNE, Malcolm. **Food texture and viscosity: concept and measurement**. Amsterdam: Elsevier, 2002.

BOYE, Joyce; WIJESINHA-BETTONI, Ramani; BURLINGAME, Barbara. Protein quality evaluation twenty years after the introduction of the protein digestibility corrected amino acid score method. **British Journal of Nutrition**, v. 108, n. S2, p. S183–S211, 2012.

BRODKORB, André et al. INFOGEST static in vitro simulation of gastrointestinal food digestion. **Nature Protocols**, v. 14, n. 4, p. 991–1014, 2019.

CAMIRE, Mary Ellen; CAMIRE, Alex; KRUMHAR, Kim. Chemical and nutritional changes in foods during extrusion. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 29, n. 1, p. 35–57, 1990.

CARVALHO, Carlos W. P. et al. Relative effect of particle size on the physical properties of corn meal extrudates. **Journal of Food Engineering**, v. 98, n. 1, p. 103–109, 2010.

CHAMONE, Meiry Ellen Ramos et al. Chemical characterization of white lupin flour treated by extrusion cooking and aqueous debittering processes. **Plant Foods for Human Nutrition**, v. 78, n. 2, p. 292–298, 2023.

COMETTANT-RABANAL, Raul et al. Functionality of pre-cooked whole-grain corn, rice and sorghum flours for gluten-free bread. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 58, n. 11, p. 5781–5795, 2023.

CRISTIANO, Maria Chiara et al. Effects of flour mean particle size, size distribution and water content on rheological properties of wheat flour doughs. **European Food Research and Technology**, v. 245, n. 9, p. 2053–2062, 2019.

DA SILVA, Erika Madeira Moreira et al. Physical characteristics of extrudates from corn flour and dehulled carioca bean flour blend. **LWT – Food Science and Technology**, v. 58, n. 2, p. 620–626, 2014.

DELGADO-MURILLO, Samuel Arturo et al. Effect of the extrusion process on the physicochemical, phytochemical, and cooking properties of gluten-free pasta made from broken rice and chickpea flours. **Biotechnia**, v. 26, 2024.

DEXTER, J. E.; MATSUO, R. R.; MORGAN, B. C. Spaghetti stickiness: some factors influencing stickiness and relationship to other cooking quality characteristics. **Journal of Food Science**, v. 48, n. 5, p. 1545–1551, 1983.

EDWARDS, Jeffrey R. Alternatives to difference scores as dependent variables in the study of congruence in organizational research. **Organizational Behavior and Human Decision Processes**, v. 64, n. 3, p. 307–324, 1995.

FONTES-CANDIA, Cynthia et al. Relevance of protein–polysaccharide interactions on nutritional quality and gastrointestinal digestion of protein-based foods. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 73, n. 9, p. 4998–5004, 2025.

FOSCHIA, Martina et al. How combinations of dietary fibres can affect physicochemical characteristics of pasta. **LWT – Food Science and Technology**, v. 61, n. 1, p. 41–46, 2015.

GALLAGHER, Sean R. One-dimensional SDS gel electrophoresis of proteins. **Current Protocols in Molecular Biology**, v. 97, n. 1, 2012.

GENTILE, Luigi. Protein–polysaccharide interactions and aggregates in food formulations. **Current Opinion in Colloid & Interface Science**, v. 48, p. 18–27, 2020.

HAGENIMANA, Anastase; DING, Xiaolin; FANG, Tao. Evaluation of rice flour modified by extrusion cooking. **Journal of Cereal Science**, v. 43, n. 1, p. 38–46, 2006.

HAMEED, Amjad et al. Comparative seed storage protein profiling of Kabuli chickpea genotypes. **Pakistan Journal of Botany**, v. 41, n. 2, p. 703–710, 2009.

HOU, Gary G. (Ed.). **Asian noodles: science, technology, and processing**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010.

HUA, Qing-xin; WEISS, Michael A. Mechanism of insulin fibrillation. **Journal of Biological Chemistry**, v. 279, n. 20, p. 21449–21460, 2004.

JALGAONKAR, Kirti et al. Pearl millet based pasta. **Journal of Food Science and Technology**, v. 56, n. 3, p. 1134–1144, 2019.

KORHONEN, Hannu; PIHLANTO, Anne. Bioactive peptides: production and functionality. **International Dairy Journal**, v. 16, n. 9, p. 945–960, 2006.

KORE, Tamirat; ABEBE, Workineh; GETACHEW, Paulos. Optimization of cooking, textural and sensorial qualities of macaroni supplemented with tef and chickpea flours. **International Journal of Food Properties**, v. 25, n. 1, p. 2254–2266, 2022.

LAZARIDOU, Athina et al. Effects of hydrocolloids on dough rheology and bread quality parameters in gluten-free formulations. **Journal of Food Engineering**, v. 79, n. 3, p. 1033–1047, 2007.

LI, Jie et al. Classification, gelation mechanism and applications of polysaccharide-based hydrocolloids in pasta products. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 248, p. 125956, 2023. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.125956.

LIU, Fei et al. Effect of sodium acetate and drying temperature on physicochemical and thermomechanical properties of gelatin films. **Food Hydrocolloids**, v. 45, p. 140–149, 2015.

LIU, Ye et al. Functionality enhancement of pea protein isolate through cold plasma modification. **Food Research International**, v. 197, p. 115267, 2024.

LOVEDAY, Simon M. Plant protein ingredients with food functionality potential. **Nutrition Bulletin**, v. 45, n. 3, p. 321–327, 2020.

MA, Z. et al. Differences in starch and protein composition of japonica rice. **Food Chemistry**, v. 474, p. 143204, 2025.

MARTI, Alessandra et al. Cooking behavior of rice pasta. **LWT – Food Science and Technology**, v. 54, n. 1, p. 229–235, 2013.

MARTI, Alessandra et al. In vitro starch digestibility of commercial gluten-free pasta. **Journal of Food Science**, v. 82, n. 4, p. 1012–1019, 2017.

MUNIZ, C. R.; DE AZEREDO, H. M. C.; ROSA, M. de F. **Preparo de amostras para observação de nanoestruturas em microscópio eletrônico de varredura**. 2019.

NISHINARI, K.; FANG, Y. Relation between structure and rheological properties of agar. **Food Structure**, v. 13, p. 24–34, 2017.

OSBORNE, Thomas Burr. **The proteins of the wheat kernel**. Washington: Carnegie Institution, 1907.

OSBORNE, Thomas Burr. **The vegetable proteins**. London: Longmans, Green and Company, 1924.

PADALINO, Lucia et al. Effects of hydrocolloids on chemical properties and cooking quality of gluten-free spaghetti. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 48, n. 5, p. 972–983, 2013.

PALAVECINO, Pablo M. et al. Gluten-free sorghum pasta. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 99, n. 3, p. 1351–1357, 2019.

PAULINO, Franz Chuqui. **Obtenção de farinha pré-cozida integral sem glúten**. 2024. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2024.

PESSANHA, Kênia Letícia Ferreira et al. Impact of whole millet extruded flour. **LWT – Food Science and Technology**, v. 147, p. 111495, 2021.

PISMAG, Remigio Yamid et al. Effect of extrusion cooking on instant flours. **F1000Research**, v. 12, p. 1356, 2024.

RAUNGRUSMEE, Sujitta et al. Influence of resistant starch and hydrocolloids. **LWT**, v. 126, p. 109279, 2020.

RE, Roberta et al. Antioxidant activity applying ABTS assay. **Free Radical Biology and Medicine**, v. 26, n. 9–10, p. 1231–1237, 1999.

REN, Hui et al. Fertilization-independent embryogenesis in rice. **Nature Plants**, v. 10, n. 12, p. 1892–1899, 2024.

RODRÍGUEZ, J. A. R. **Efeito dos parâmetros de extrusão termoplástica no grits de milho**. 2021. Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2021.

ROMANO, Annalisa et al. New ingredients and alternatives to durum wheat semolina. **Current Opinion in Food Science**, v. 41, p. 249–259, 2021.

RONDA, Felicidad et al. Rheological study of layer cake batters. **Journal of Food Engineering**, v. 102, n. 3, p. 272–277, 2011.

RUFINO, M. D. S. M. et al. **Metodologia científica: determinação da atividade antioxidante total pelo método FRAP**. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2006.

SAHU, H. K. et al. Effect of rice and chickpea flour on gluten-free pasta. **International Food Research Journal**, v. 31, n. 5, p. 1226–1239, 2024.

SHEWRY, Peter R.; CASEY, Rod. **Seed proteins**. Dordrecht: Springer, 1999.

SILVA, Thaianny Ruth da. **Elaboração e caracterização de massa de macarrão integral com sorgo fermentado**. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal de Uberlândia, Patos de Minas, 2024.

SINGH, Gurpreet et al. Development of barley-based non-conventional pasta. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 59, n. 2, p. 1104–1112, 2024.

SOFI, Sajad Ahmad et al. Pregelatinized rice noodle enriched with chickpea flour. **LWT**, v. 133, p. 110090, 2020.

SOTELO-DÍAZ, Luz Indira et al. Techno-functional properties of corn flour with cowpea. **Foods**, v. 12, n. 2, p. 298, 2023.

SUO, X. et al. Effect of chickpea flour on gluten-free noodle quality. **International Journal of Food Sciences and Nutrition**, v. 73, n. 5, p. 600–609, 2022. DOI: 10.1080/09637486.2021.1996133.

VARGAS-SOLÓRZANO, J. W. et al. Impact of grain pretreatment on extrusion. **Food and Bioprocess Technology**, v. 13, p. 88–100, 2020.

WANG, L. et al. Milling of buckwheat hull to cell-scale. **Food Chemistry**, 2023.

YALCIN, Seda. Quality characteristics of gluten-free buckwheat noodles. **Journal of Food Science and Technology**, v. 58, n. 7, p. 2661–2669, 2021.

YANG, Zhen et al. Structural characteristics of soybean proteins. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 65, n. 29, p. 6410–6427, 2025.

ZHAO, Renjie et al. Improvement effect of protein powder on gluten-free pasta. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 59, n. 2, p. 1138–1149, 2024.

ZIA, Khalid Mahmood et al. Recent trends on gellan gum blends. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 109, p. 1068–1087, 2018.

## CONCLUSÃO GERAL

Neste item, apresenta-se a conclusão geral do trabalho de tese, incluindo os resultados dos trabalhos realizados nos capítulos II e III.

De forma integrada, os resultados obtidos demonstram que a qualidade tecnológica, nutricional e sensorial do macarrão tipo fusilli sem glúten à base de arroz japonês e grão-de-bico é fortemente dependente da interação entre processamento por extrusão, proporção de farinhas crua e extrusada, tipo de hidrocolóide e incorporação de ovo em pó. A extrusão mostrou-se uma estratégia tecnológica eficiente para modificar a matriz amilácea e proteica, promovendo maior estabilidade estrutural, incremento do valor funcional e ampliação do potencial antioxidante das formulações, embora seu uso exclusivo tenha resultado em matrizes excessivamente densas e menos digestíveis.

Os ensaios de cozimento e de textura evidenciaram que a substituição parcial da farinha crua por farinha extrusada (50/50) representou o melhor compromisso entre hidratação, estabilidade durante a cocção, menor perda de sólidos solúveis e atributos texturais desejáveis. Essa combinação permitiu preservar parte do amido nativo, essencial para adequada absorção de água e gelatinização, ao mesmo tempo em que se beneficiou da pré-gelatinização e da reorganização estrutural promovidas pela extrusão. A goma gelana destacou-se como o hidrocolóide mais eficiente na melhoria da firmeza, elasticidade e coesividade, simulando de forma mais eficaz a função estrutural do glúten; contudo, em algumas formulações, sua elevada força gelificante contribuiu para matrizes excessivamente rígidas, com impactos negativos na digestibilidade e na liberação de compostos antioxidantes.

A incorporação de ovo em pó exerceu papel decisivo na consolidação da matriz estrutural, reduzindo a perda de sólidos solúveis, aumentando a dureza, a gomosidade e a mastigabilidade, além de contribuir positivamente para a aceitação sensorial e para a atividade antioxidante. Os resultados instrumentais mostraram forte coerência com a análise sensorial, especialmente para os tratamentos M6 e M7, que apresentaram melhor equilíbrio entre textura, sabor e aparência, confirmando que o desempenho tecnológico adequado se reflete diretamente na percepção do consumidor.

Sob a perspectiva nutricional, a incorporação de grão-de-bico na forma de farinha extrusada esteve associada a maiores teores de proteínas, fibras alimentares

e cinzas, o que pode provavelmente indicar um aprimoramento do perfil nutricional dos macarrões desenvolvidos em relação a produtos comerciais à base de arroz. A análise integrada por gráfico radar reforçou o destaque do tratamento M6 como a formulação de melhor desempenho global, conciliando elevados atributos tecnológicos, estabilidade no cozimento, boa aceitação sensorial e perfil nutricional aprimorado.

A granulometria emergiu como um fator central na modulação das propriedades funcionais das farinhas e, conseqüentemente, da qualidade final do macarrão. Distribuições monomodais e mais grossas favoreceram maior firmeza, menor pegajosidade e menor perda de sólidos, enquanto granulometrias mais finas, associadas ao arroz japonês ceroso, promoveram maior hidratação e coesão, porém com redução da resistência mecânica. Esses efeitos foram corroborados pelos resultados de IAA, ISA, RVA, textura e microscopia eletrônica de varredura, que evidenciaram relação direta entre tamanho de partícula, gelatinização do amido, integridade da matriz e estabilidade estrutural do fusilli.

Os ensaios de digestibilidade in vitro demonstraram que matrizes parcialmente gelatinizadas, resultantes da combinação entre farinha extrusada e farinha crua, favoreceram maior acessibilidade enzimática, enquanto formulações totalmente extrusadas, especialmente associadas à gelana, formaram estruturas mais compactas e resistentes à digestão. Esses achados reforçam que a otimização de massas sem glúten não deve buscar apenas máxima estruturação, mas sim um equilíbrio entre firmeza, permeabilidade e funcionalidade nutricional.

Os resultados integrados das análises de SDS-PAGE e HPLC podem indicar que o processo de extrusão pode ter promovido modificações estruturais nas proteínas das formulações à base de grão-de-bico e arroz japonês. Essas alterações provavelmente estiveram associadas a fenômenos de desnaturação, fragmentação e possível formação de agregados proteicos, o que pode ter contribuído para mudanças no perfil molecular do produto. Essas alterações geraram maior proporção de peptídeos e proteínas parcialmente hidrolisadas, contribuindo tanto para o surgimento de compostos potencialmente bioativos quanto para o aumento da digestibilidade proteica. Do ponto de vista tecnológico, o rearranjo da matriz proteica e o surgimento de polipeptídeos de menor peso molecular influenciaram positivamente características como coesão, firmeza e estabilidade ao cozimento, evidenciando que a extrusão, quando aplicada em condições controladas, é capaz de melhorar simultaneamente

propriedades nutricionais e funcionais. Assim, o conjunto de evidências confirma que a extrusão constitui uma estratégia eficiente para a modulação da estrutura proteica e para o desenvolvimento de produtos alimentícios com maior qualidade tecnológica e valor agregado.

De modo geral, o estudo demonstra que a extrusão, quando aplicada de forma controlada, representa uma estratégia promissora para a modificação positiva da matriz proteica, especialmente quando associada à seleção criteriosa de hidrocolóides, ao uso estratégico de ovo em pó e ao controle da granulometria. Essa combinação configura uma abordagem robusta para o desenvolvimento de macarrões sem glúten com elevada qualidade tecnológica, sensorial e funcional. Nesse contexto, a formulação baseada na substituição parcial da farinha extrusada, aliada ao uso controlado de ágar ou gelana e à incorporação de ovo, destacou-se como a estratégia mais promissora para reduzir a lacuna de qualidade em relação às massas convencionais de trigo, favorecendo tanto o desenvolvimento de alimentos mais saudáveis quanto a produção de produtos tecnologicamente superiores, além de ampliar as possibilidades de inovação e agregação de valor no mercado de produtos sem glúten.

Este trabalho, portanto, contribui para o avanço do conhecimento sobre o comportamento das proteínas vegetais sob extrusão e abre perspectivas para futuras aplicações na área de tecnologia de alimentos e desenvolvimento de produtos inovadores.