



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
ALIMENTOS

DAMICLÉA MARTINS VASCONCELOS

APROVEITAMENTO DE COPRODUTO DO PROCESSO DE CONCENTRAÇÃO DE
PROTEÍNA DA AMÊNDOA DA CASTANHA DE CAJU PARA APLICAÇÃO EM
MASSAS ALIMENTÍCIAS

FORTALEZA

2026

DAMICLÉA MARTINS VASCONCELOS

APROVEITAMENTO DE COPRODUTO DO PROCESSO DE CONCENTRAÇÃO DE
PROTEÍNA DA AMÊNDOA DA CASTANHA DE CAJU PARA
APLICAÇÃO EM MASSAS ALIMENTÍCIAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, do Departamento de Engenharia de Alimentos da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências e Tecnologia de Alimentos. Área de concentração: Ciência e Tecnologia de Alimentos.

Orientadora: Profa. Dra. Ana Paula Dionísio.
Coorientadora: Dra. Ídila Maria da Silva Araújo.

FORTALEZA

2026

DAMICLÉA MARTINS VASCONCELOS

APROVEITAMENTO DE COPRODUTO DO PROCESSO DE CONCENTRAÇÃO DE
PROTEÍNA DA AMÊNDOA DA CASTANHA DE CAJU PARA
APLICAÇÃO EM MASSAS ALIMENTÍCIAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, do Departamento de Engenharia de Alimentos da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências e Tecnologia de Alimentos. Área de concentração: Ciência e Tecnologia de Alimentos.

Aprovada em: 20/02/2026.

BANCA EXAMINADORA

Profª. Dra. Ana Paula Dionísio (Orientadora)
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) – Agroindústria Tropical

Dr. Francisco Fábio Cavalcante Barros
Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI)

Dra. Deborah dos Santos Garruti
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) – Agroindústria Tropical

Com amor, dedico a Deus.

Aos meus pais, Antonio e Antonia.

Ao meu esposo, Elivelton e amigos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus pelo dom da vida, saúde, ajuda e proteção. Pela Sua força diante das dificuldades e Sua presença constante, e por me guiar a mais uma etapa preciosa da minha vida.

Aos meus pais, Antonio Horácio e Antonia Martins a quem expressei toda a minha homenagem e a minha gratidão, por sempre estarem ao meu lado. Em especial, ao meu esposo Eivelton Almeida, que sempre está presente, meu amor, incentivador, que me apoiou em todos os momentos com amor, dedicação, respeito, tornando os meus dias e noites angustiantes em jornadas de superação, confiança e na certeza de que eu jamais estaria sozinha.

À Universidade Federal do Ceará (UFC), especialmente ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos (PPGCTA), por me proporcionar a oportunidade de aperfeiçoar meus conhecimentos durante o mestrado. Agradeço a todos os docentes do PPGCTA, pelos conhecimentos compartilhados, bem como, aos colegas da turma, em especial a Eclenia Barbosa e a Raquel Cunha, com as quais dividi atividades, risadas e os desafios da rotina acadêmica.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), pelo suporte financeiro – Código de Financiamento 001, assim como à USIBRAS, por fornecer as amêndoas de castanha de caju utilizadas como matéria prima nesta pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela fonte de financiamento por meio dos projetos números 444421/2024-6 e 404293/2023-9.

À minha orientadora, Dra. Ana Paula Dionísio, por me aceitar e proporcionar a oportunidade de obter conhecimentos com o seu grupo de pesquisa. Pela orientação, apoio, dedicação e confiança nesta pesquisa. Não menos importante, agradeço à minha coorientadora, Dra. Ídila Maria da Silva Araújo, pela amizade, acolhida, confiança, orientação, dedicação, compreensão e incentivo. Por não medir esforços, buscando parcerias essenciais para solucionar os desafios encontrados e tornar possível a conclusão deste projeto.

À Prof.^a Dra. Márcia Maria Leal de Medeiros, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE – *Campus* Baturité), pela colaboração, parceria, dedicação e pela oportunidade de aprender na prática as técnicas de panificação.

À Prof.^a Dra. Luciana de Siqueira Oliveira e a Lorena Freire, do Laboratório de Controle de Qualidade e Secagem de Alimentos da Universidade Federal do Ceará (UFC), pela oportunidade de acessar as instalações do laboratório e pelo apoio técnico na realização de ensaios, que foram fundamentais para enriquecer o meu trabalho.

À Dra Deborah dos Santos Garruti, pela solicitude em aceitar o convite e pelas valiosas contribuições e sugestões apresentadas.

Aos meus queridos amigos Alberto Gomes, Bárbara Borges, Beatriz Dantas, Eduardo Oliveira, Emanuel Dantas, Erick Santos, Felipe Bindá e Renier Felinto, que se tornaram mais do que companheiros de laboratório. Dividimos experiências, amizade, alegrias e desafios. Sou extremamente grata a cada um, por tê-los ao meu lado e por diversas vezes, transformar as dificuldades em sorrisos.

A toda a família do Laboratório de Processos Agroindustriais, pelo aprendizado e suporte. Em especial, ao meu amigo Gilleno Oliveira, pela amizade, carinho, cuidado, dedicação, ideias, ensinamentos e contribuição. Você foi meu porto seguro e suporte nos momentos mais difíceis, que tive que encontrar forças de onde parecia impossível. Estendo minha gratidão ao Kelvi Miranda, que também esteve ao meu lado, oferecendo cuidado e apoio constante. Serei eternamente grata a vocês dois por nunca me deixarem sozinha.

À minha irmã-amiga Silvia Heleny, por estar ao meu lado com tanto amor, alegria, delicadeza e humildade. Agradeço pelos conselhos sábios, companhia agradável nos almoços e por me fazer acreditar que no final tudo daria certo.

À Embrapa Agroindústria Tropical, por permitir o acesso a suas instalações, possibilitando o desenvolvimento da pesquisa. Em especial, aos laboratórios de Análises de Alimentos, Tecnologia da Biomassa, Microbiologia de Alimentos, Tecnologia e Fisiologia Pós-colheita, Solos e ao laboratório Multiusuário de Química de Produtos Naturais, pelo suporte com as análises.

Aos laboratórios de Controle de Qualidade e Secagem de Alimentos, Biotecnologia, Pesquisa e Inovação em Produtos Vegetais e Embalagens, Biomateriais Alimentícios da Universidade Federal do Ceará pela contribuição e parcerias.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, GRATIDÃO!

“Tudo posso naquele que me fortalece”
(Filipenses 4:13).

RESUMO

A crescente demanda por alimentos isentos de glúten, associada ao aumento da prevalência de distúrbios relacionados ao glúten e à busca por produtos com maior valor nutricional, tem impulsionado o desenvolvimento de massas alimentícias formuladas com ingredientes alternativos ao trigo. Paralelamente, a obtenção de ingredientes proteicos alternativos para a indústria alimentícia tem ganhado destaque, entre eles o concentrado proteico da amêndoa de castanha de caju. Considerando que o coproduto gerado no processo de concentração proteica ainda apresenta elevado teor de proteínas, este estudo teve como objetivo avaliar seu potencial como ingrediente na elaboração de massas alimentícias frescas sem glúten. Inicialmente, o coproduto foi caracterizado quanto à composição centesimal, perfil mineral e de aminoácidos, propriedades físico-químicas e tecnofuncionais, comportamento de fluxo, cor instrumental e características químico-estruturais e microestruturais. Em seguida, foram desenvolvidas três formulações de massas frescas sem glúten, variando-se as proporções de farinha de arroz e polvilho azedo, mantendo constante o teor do coproduto. As formulações foram avaliadas quanto à composição nutricional, perfil mineral, compostos bioativos, qualidade de cocção, propriedades reológicas e de textura, microestrutura, qualidade microbiológica e percepção sensorial qualitativa por meio de grupo focal com especialistas em gastronomia. Os resultados demonstraram que o coproduto apresenta elevado valor nutricional, com teor proteico superior a 20%, conteúdo expressivo de fibras alimentares e perfil mineral relevante, destacando-se potássio, magnésio, cálcio e fósforo. O perfil de aminoácidos mostrou-se completo, com contribuição significativa de aminoácidos essenciais. Tecnologicamente, observou-se alta capacidade de absorção de água, comportamento de pó coesivo e propriedades compatíveis com aplicações em sistemas alimentares. As massas desenvolvidas apresentaram incremento nos teores de proteínas e fibras em comparação a massas sem glúten convencionais, além de perfil mineral enriquecido. Os parâmetros de cocção indicaram baixa perda de sólidos, adequada absorção de água e estabilidade estrutural, enquanto as análises reológicas evidenciaram comportamento viscoelástico predominantemente elástico. A textura instrumental e a microestrutura variaram conforme a proporção de farinha de arroz e polvilho azedo, sendo a Formulação 2 a que apresentou melhor equilíbrio entre firmeza, mastigabilidade, coesão estrutural e aplicabilidade culinária. Conclui-se que o coproduto da amêndoa de castanha de caju constitui alternativa promissora para o desenvolvimento de massas frescas sem glúten, agregando valor nutricional e tecnológico e contribuindo para a valorização sustentável de coprodutos agroindustriais.

Palavras-chave: *Anacardium occidentale* L.; *Gluten-free*; Qualidade de cocção; Propriedades tecnofuncionais.

ABSTRACT

The growing demand for gluten-free foods, coupled with the increased prevalence of gluten-related disorders and the search for products with higher nutritional value, has driven the development of pasta formulated with alternative ingredients to wheat. Simultaneously, the production of alternative protein ingredients for the food industry has gained prominence, among them cashew nut protein concentrate. Considering that the co-product generated in the protein concentration process still has a high protein content, this study aimed to evaluate its potential as an ingredient in the production of gluten-free fresh pasta. Initially, the co-product was characterized in terms of its proximate composition, mineral and amino acid profile, physicochemical and technofunctional properties, flow behavior, instrumental color, and chemical-structural and microstructural characteristics. Subsequently, three formulations of gluten-free fresh pasta were developed, varying the proportions of rice flour and sour cassava starch, while keeping the co-product content constant. The formulations were evaluated for nutritional composition, mineral profile, bioactive compounds, cooking quality, rheological and textural properties, microstructure, microbiological quality, and qualitative sensory perception through a focus group with gastronomy experts. The results demonstrated that the co-product has high nutritional value, with a protein content exceeding 20%, a significant amount of dietary fiber, and a relevant mineral profile, highlighting potassium, magnesium, calcium, and phosphorus. The amino acid profile was complete, with a significant contribution of essential amino acids. Technologically, high water absorption capacity, cohesive powder behavior, and properties compatible with applications in food systems were observed. The developed pastas showed increased protein and fiber content compared to conventional gluten-free pastas, in addition to an enriched mineral profile. Cooking parameters indicated low solids loss, adequate water absorption, and structural stability, while rheological analyses showed predominantly elastic viscoelastic behavior. The instrumental texture and microstructure varied according to the proportion of rice flour and sour cassava starch, with Formulation 2 showing the best balance between firmness, chewiness, structural cohesion, and culinary applicability. It is concluded that the cashew nut by-product constitutes a promising alternative for the development of gluten-free fresh pasta, adding nutritional and technological value and contributing to the sustainable valorization of agro-industrial by-products.

Keywords: *Anacardium occidentale* L.; *Gluten-free*; Cooking quality; Technofunctional properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Representação estrutural das proteínas formadoras do trigo: gliadina e glutenina	24
Figura 2	– Organograma representativo de fontes alimentares para substituição do glúten	32
Figura 3	– Preferência no mercado global de alimentos sem glúten por categoria em 2024	33
Figura 4	– Desafios tecnológicos e defeitos em massas alimentícias frescas sem glúten	34
Figura 5	– Ingredientes e aditivos utilizados na substituição do glúten em massas alimentícias	36
Figura 6	– Principais formatos de massas alimentícias frescas	37
Figura 7	– Aproveitamento integral do pseudofruto do caju e da castanha de caju	43
Figura 8	– Fluxograma de obtenção do coproduto gerado a partir do processo de concentração de proteínas da amêndoa de castanha de caju (ACC)	54
Figura 9	– Aspecto do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju	55
Figura 10	– Aspecto das massas alimentícias frescas sem glúten elaboradas com coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju	73
Figura 11	– Espectro de RMN do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju	89
Figura 12	– Análise dos espectros obtidos por espectroscopia de FTIR dos principais grupos funcionais presentes no coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju	91
Figura 13	– Caracterização microestrutural da superfície do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju	93
Figura 14	– Análise dos espectros obtidos por espectroscopia de FTIR dos principais grupos funcionais presentes nas massas alimentícias frescas sem glúten à base do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju	108

Figura 15 – Análise dos espectros obtidos por espectroscopia de FTIR dos principais grupos funcionais presentes nos ingredientes utilizados nas massas alimentícias frescas sem glúten à base do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju	111
Figura 16 – Micrografias por microscopia eletrônica de varredura (MEV) das massas alimentícias sem glúten à base do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju	112
Figura 17 – Comportamento viscoelástico das massas alimentícias frescas sem glúten (cruas e cozidas) elaboradas com coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju em função do tempo em regime oscilatório (0 a 180 s)	124
Figura 18 – Comportamento viscoelástico das massas alimentícias frescas sem glúten (cruas e cozidas) elaboradas com coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju em função da frequência em regime oscilatório (0,1 a 100 Hz)	127

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	– Caracterização clínica, imunológica e terapêutica das principais condições associadas à ingestão de glúten e trigo	26
Quadro 2	– Classificação do índice de fluxo de Pós (ASTM D6128/Jenike) (ASTM, 2016)	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Composição das formulações de massas alimentícias elaboradas com coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju	72
Tabela 2	– Composição nutricional e caracterização físico-química do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju	81
Tabela 3	– Perfil mineral do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju	84
Tabela 4	– Perfil de aminoácidos do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju	87
Tabela 5	– Estrutura secundária de proteínas do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju	92
Tabela 6	– Teor de compostos bioativos e atividade antioxidante total do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju	95
Tabela 7	– Propriedades tecnofuncionais do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju	96
Tabela 8	– Propriedades de fluidez do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju	98
Tabela 9	– Tensão principal de consolidação (σ_1), tensão não confinada de escoamento (σ_c) e índice de fluxo (IF) do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju	99
Tabela 10	– Valores máximos e mínimo do ângulo de atrito com a parede do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju	100
Tabela 11	– Composição nutricional e caracterização físico-química das massas alimentícias sem glúten à base do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju	101
Tabela 12	– Perfil de minerais das massas alimentícias frescas sem glúten à base do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju	104

Tabela 13	– Teor de compostos bioativos e atividade antioxidante das massas alimentícias frescas sem glúten à base do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju	106
Tabela 14	– Estrutura secundária de proteínas das massas alimentícias frescas sem glúten à base do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju	109
Tabela 15	– Propriedades tecnofuncionais das farinhas de massas alimentícias à base do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju	115
Tabela 16	– Qualidade de cocção das massas alimentícias à base do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju	118
Tabela 17	– Parâmetros de cor das massas alimentícias frescas sem glúten, em suas formas cruas e cozidas, elaboradas à base do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju	120
Tabela 18	– Parâmetros do perfil de textura instrumental das massas alimentícias frescas sem glúten, em suas formas cruas e cozidas, elaboradas à base do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju	129
Tabela 19	– Avaliação microbiológica das massas alimentícias à base do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju	131

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACC	Amêndoa da castanha de caju
AT	Alergia ao trigo
DC	Doença celíaca
FAO	Food and Agriculture Organization
FENACELBRA	Federação Nacional das Associações de Celíacos do Brasil
GFD	<i>Glúten free diet</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IgE	Imunoglobulina E
Mm	Milímetro
M/V	Massa por volume
µm	Micrômetro
PPM	Partes por milhão
RPM	Rotações por minuto
SGNC	Sensibilidade ao glúten não celíaca

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	graus Celsius
\$	Unidade monetária
%	Porcentagem
©	Copyright
®	Marca Registrada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
2	OBJETIVO	22
2.1	Objetivo Geral	22
2.2	Objetivos Específicos	22
3	REFERENCIAL TEÓRICO	24
3.1	Glúten, Saúde e Demandas tecnológicas Contemporâneas	24
3.1.1	<i>Glúten: função tecnológica e impacto fisiológico</i>	24
3.1.2	<i>Doenças associadas ao glúten e implicações para a ciências de alimentos</i>	25
3.2.	Alimentos Isentos de Glúten: desafios nutricionais e estruturais	30
3.2.1	<i>Limitações nutricionais e tecnológicas das matrizes sem glúten convencionais</i>	31
3.2.2	<i>Estratégias tecnológicas para substituição funcional do glúten</i>	34
3.3	Valorização de Coprodutos Agroindustriais: a Torta da Amêndoa de Castanha de Caju (ACC) como Ingrediente Funcional de Upcycling	41
3.3.1	<i>Da economia linear à economia circular na cadeia de alimentos</i>	41
3.3.2	<i>Upcycling alimentar: coprodutos como matéria-prima funcional de alto valor</i>	42
3.3.3	<i>Biorrefinaria da amêndoa de castanha de caju e geração de coproduto do processo de concentração proteica</i>	42
3.4	Bases Tecnológicas e Mecanismos de Estruturação de Matrizes Alimentares	45
3.4.1	<i>Mecanismos estruturais e reológicos em massas alimentícias sem glúten</i>	45
3.4.2	<i>Estratégias tecnológicas para processamento de massas alimentícias sem glúten</i>	46
3.4.3	<i>Parâmetros de qualidade e estabilidade de massas sem glúten</i>	48
3.4.3.1	<i>Propriedades de hidratação e interação com água</i>	48
3.4.3.2	<i>Propriedades de intumescimento e impacto na textura</i>	50
4	MATERIAL E MÉTODOS	53
4.1	Obtenção do coproduto gerado a partir do processo de concentração de proteínas da amêndoa de castanha de caju (ACC)	53
4.1.1	<i>Caracterização do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju</i>	55
4.1.1.1	<i>Composição e valor nutricional</i>	55
4.1.1.1.1	<i>Umidade</i>	55

4.1.1.1.2	Cinzas	56
4.1.1.1.3	Proteína bruta	57
4.1.1.1.4	Lipídios	57
4.1.1.1.5	Carboidratos (fração glicídica)	58
4.1.1.1.6	Fibra dietética alimentar	58
4.1.1.1.7	Valor energético	59
4.1.1.2	<i>Caracterização físico-química</i>	59
4.1.1.2.1	Potencial hidrogeniônico (pH)	59
4.1.1.2.2	Acidez total titulável	60
4.1.1.2.3	Atividade de água (Aw)	60
4.1.1.2.4	Cor	60
4.1.1.3	<i>Determinação do perfil de minerais</i>	61
4.1.1.4	<i>Determinação do perfil de aminoácidos</i>	61
4.1.1.5	<i>Caracterização química-estrutural complementar</i>	62
4.1.1.5.1	Identificação de sólidos solúveis por Ressonância Magnética Nuclear (RMN)	62
4.1.1.5.2	Avaliação de grupos funcionais por Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)	63
4.1.1.5.3	Avaliação da microestrutura por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	63
4.1.1.6	<i>Determinação dos compostos bioativos e atividade antioxidante total</i>	64
4.1.1.6.1	Polifenóis totais	64
4.1.1.6.2	Flavonoides	65
4.1.1.6.3	Atividade antioxidante total	66
4.1.1.7	<i>Avaliação do comportamento de fluxo dos pós</i>	67
4.1.1.8	<i>Determinação das propriedades tecnofuncionais</i>	68
4.1.1.8.1	Densidade aparente	69
4.1.1.8.2	Solubilidade em água	69
4.1.1.8.3	Capacidade de absorção de água e óleo	70
4.1.1.8.4	Poder de intumescimento	70
4.2	Elaboração das massas frescas alimentícias sem glúten à base do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju	71

4.2.1	<i>Caracterização das massas frescas alimentícias</i>	73
4.2.1.1	<i>Composição centesimal e valor energético</i>	73
4.2.1.2	<i>Caracterização físico-química</i>	74
4.2.1.3	<i>Perfil de minerais</i>	74
4.2.1.4	<i>Caracterização química-estrutural e microestrutural</i>	74
4.2.1.5	<i>Determinação dos compostos bioativos e atividade antioxidante</i>	74
4.2.1.6	<i>Determinação das propriedades tecnofuncionais das farinhas das massas</i>	74
4.2.1.7	<i>Determinação da qualidade de cocção</i>	75
4.2.1.7.1.1	<i>Determinação do tempo de cocção ótimo (TCO)</i>	75
4.2.1.7.1.2	<i>Aumento de peso ou absorção de água</i>	75
4.2.1.7.1.3	<i>Aumento de volume ou índice de inchaço</i>	76
4.2.1.7.1.4	<i>Perda de massa na cocção</i>	76
4.2.1.8	<i>Determinação da cor por método instrumental</i>	77
4.2.1.9	<i>Perfil reológico das massas</i>	77
4.2.1.10	<i>Determinação da textura por método instrumental</i>	77
4.2.1.11	<i>Avaliação microbiológica</i>	78
4.2.1.12	<i>Avaliação sensorial</i>	78
4.3	<i>Análises Estatística</i>	79
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	80
5.1	Caracterização nutricional, físico-química, estrutural, funcional e tecnológica do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju	80
5.1.1	<i>Composição nutricional e caracterização físico-química</i>	80
5.1.2	<i>Perfil de minerais</i>	83
5.1.3	<i>Perfil de aminoácidos</i>	86
5.1.4	<i>Ressonância Magnética Nuclear</i>	89
5.1.5	<i>Caracterização dos grupos funcionais por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)</i>	90
5.1.6	<i>Caracterização Microestrutural</i>	92
5.1.7	<i>Compostos bioativos e atividade antioxidante</i>	94
5.1.8	<i>Propriedades tecnofuncionais</i>	96
5.2	Comportamento de fluidez do pó do coproduto	97

5.3	Caracterização nutricional, físico-química, estrutural e microestrutural das massas alimentícias à base do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju	101
5.3.1	<i>Composição Centesimal e físico-química</i>	101
5.3.2	<i>Perfil mineral</i>	103
5.3.3	<i>Perfil funcional</i>	105
5.3.4	<i>Caracterização dos grupos funcionais</i>	107
5.3.5	<i>Caracterização das microestruturas</i>	112
5.4	Propriedades tecnofuncionais das farinhas de massas alimentícias	115
5.5	Qualidade de cocção	117
5.6	Cor	119
5.7	Comportamento reológico e estabilidade viscoelástica	123
5.8	Perfil de textura instrumental das massas alimentícias: efeito da cocção e da composição da formulação	129
5.9	Qualidade microbiológica	131
5.10	Percepção sensorial qualitativa e potencial de aplicação gastronômica das massas alimentícias	132
6	CONCLUSÃO	134
	REFERÊNCIAS	136
	ANEXO A – TERMO DE CONSETIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO	155
	ANEXO B – PARECER CONSUBSTANCIADO DO CEP	156
	APÊNDICE A – INSTRUMENTO DE COLETA DE DADOS	162

1 INTRODUÇÃO

As massas alimentícias aparecem entre os alimentos mais consumidos no mundo, devido a sua versatilidade e acessibilidade (HAMDANI; WANI; BHAT, 2020). Desenvolvidas convencionalmente com farinha de trigo, as massas contêm glúten, necessário para atingir as características tecnológicas essenciais, como elasticidade, extensibilidade, coesividade e firmeza após o cozimento (SHARMA et al., 2020a; MIEDZIANKA et al., 2021). Entretanto, nos últimos anos, observa-se um aumento expressivo na ocorrência global de distúrbios relacionados ao glúten, os quais envolvem a doença celíaca (DC), a sensibilidade ao glúten não celíaca e a alergia ao trigo (AL-TOMA et al., 2025). Esse cenário, aliado ao crescente interesse da população por padrões alimentares considerados mais saudáveis, tem impulsionado a pesquisa, o desenvolvimento e a diversificação de alternativas alimentares isentas de glúten (*gluten-free*) (ITUSACA-MALDONADO et al., 2024). Nesse sentido, o mercado de alimentos sem glúten tem apresentado um rápido crescimento, consolidando-se como um segmento estratégico e altamente dinâmico da indústria de alimentos (CATASSI et al., 2022; KNEŽEVIĆ et al., 2024).

O desenvolvimento de formulações de massas isentas de glúten ainda representa um desafio tecnológico (BOUKID; GASPARRE; ROSELL, 2024). A ausência dessa proteína impede a estruturação da rede viscoelástica responsável pela capacidade de hidratação da massa, estabilidade e integridade durante o cozimento, resultando em defeitos tecnológicos, como maior pegajosidade, exsudação de sólidos e deterioração dos parâmetros de textura (ITUSACA-MALDONADO et al., 2024). Além disso, muitas massas isentas de glúten do mercado, elaboradas à base de arroz, milho ou amidos refinados, apresentam densidade nutricional menor quando comparadas às versões com trigo, o que reforça a necessidade de incorporação de ingredientes alternativos capazes de melhorar o aporte nutricional nesses produtos (BOZORG et al., 2024; CABANILLAS, 2020).

A busca por farinhas alternativas provenientes de cereais, pseudocereais e leguminosas tem se intensificado, a fim de compensar a ausência do glúten, melhorar o valor nutricional e assegurar propriedades tecnológicas adequadas às massas sem glúten (ARANTES et al., 2025; BONGIANINO et al., 2023). No entanto, há o desafio para a utilização desses ingredientes, os quais demandam por formulações específicas que combinem hidrocolóides, proteínas vegetais e modificadores de textura capazes de reproduzir, ao menos parcialmente, as funções estruturais do glúten (CAPPELLI; OLIVA; CINI, 2020). Apesar dos

avanços recentes, a construção de uma matriz estrutural estável e sensorialmente aceitável continua sendo um dos principais desafios, dificultando a obtenção de produtos isentos de glúten com qualidade tecnológica e nutricional comparável às massas convencionais de trigo (MANFRÉ et al., 2024).

Diante das limitações tecnológicas e sensoriais inerentes à formulação de massas sem glúten, tem-se intensificado a investigação e a aplicação de ingredientes não convencionais, como farinhas de arroz, milho, trigo sarraceno, soja, grão-de-bico, fécula de mandioca, bem como coprodutos agrícolas, com o objetivo de ampliar, diversificar e qualificar a variedade de produtos isentos de glúten disponíveis no mercado (POISSON, 2023). Nesse contexto, a valorização de coprodutos agroindustriais destaca-se como uma estratégia promissora, especialmente aqueles oriundos da cadeia produtiva do caju (*Anacardium occidentale* L.), como o derivado do processamento do concentrado proteico da amêndoa de castanha de caju (ACC), o qual é rico em proteína, fibra e outros nutrientes. Tais características o tornam uma alternativa promissora para atender às necessidades alimentares de indivíduos celíacos, com sensibilidade ao glúten não celíaca ou alérgicos ao trigo, ao mesmo tempo em que promove a sustentabilidade e a segurança alimentar (BOUZIANE et al., 2024). Dessa forma, esse coproduto, que hoje é descartado, pode ser incorporado em formulações de alimentos sem glúten, diversificando a oferta de produtos com perfil nutricional mais rico, e contribuindo para a sustentabilidade dos sistemas produtivos, ao reduzir o desperdício e agregar valor aos subprodutos da agroindústria.

Assim, o objetivo principal deste trabalho foi desenvolver e caracterizar massas frescas sem glúten, do tipo talharim, por meio da substituição da farinha de trigo pela farinha do coproduto gerado do processo de concentração de proteínas da amêndoa da castanha de caju, bem como avaliar seu potencial como ingrediente funcional em produtos isentos de glúten.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver massas alimentícias frescas sem glúten à base do coproduto obtido do processo de concentração de proteínas da amêndoa da castanha de caju (ACC) e avaliar seu impacto nas características nutricionais, propriedades tecnológicas e sensoriais.

2.2 Objetivos Específicos

- Obter o coproduto gerado a partir do processo de concentração de proteína da amêndoa de castanha de caju (ACC);
- Caracterizar o coproduto obtido a partir do processo de concentração da proteína da amêndoa da castanha de caju (ACC) quanto à composição centesimal, teor de fibras dietéticas, características físico-químicas, teor de compostos bioativos, perfil de minerais e de aminoácidos, perfil de cor instrumental e comportamento de fluxo dos pós, com o intuito de avaliar seu potencial nutricional e tecnológico para aplicação como ingrediente alimentar;
- Desenvolver e padronizar formulações de massas alimentícias frescas sem glúten formuladas com o coproduto oriundo do processo de concentração de proteínas da ACC, farinha e arroz e polvilho azedo, assegurando estabilidade estrutural, coerência reológica e integridade da matriz ao longo das etapas de processamento;
- Caracterizar as formulações de massas alimentícias frescas quanto à composição centesimal, características físico-químicas, teor de compostos bioativos e perfil de minerais, visando avaliar seu potencial de enriquecimento nutricional;
- Avaliar as propriedades tecnofuncionais, a qualidade de cocção, a cor instrumental, o comportamento reológico e as características de textura das massas alimentícias produzidas, determinando o efeito da incorporação do coproduto e das proporções da farinha de arroz por polvilho azedo nos seus parâmetros tecnológicos;
- Avaliar a qualidade microbiológica das formulações desenvolvidas, à luz dos critérios estabelecidos pela legislação sanitária vigente, visando assegurar sua adequação do ponto de vista higiênico-sanitário;

- Investigar, de forma qualitativa, a percepção de especialistas em gastronomia acerca das características sensoriais, tecnológicas e da aplicabilidade culinária das massas alimentícias frescas sem glúten, em suas formas crua e cozida, visando identificar atributos positivos, limitações sensoriais e potenciais de mercado para os produtos desenvolvidos.

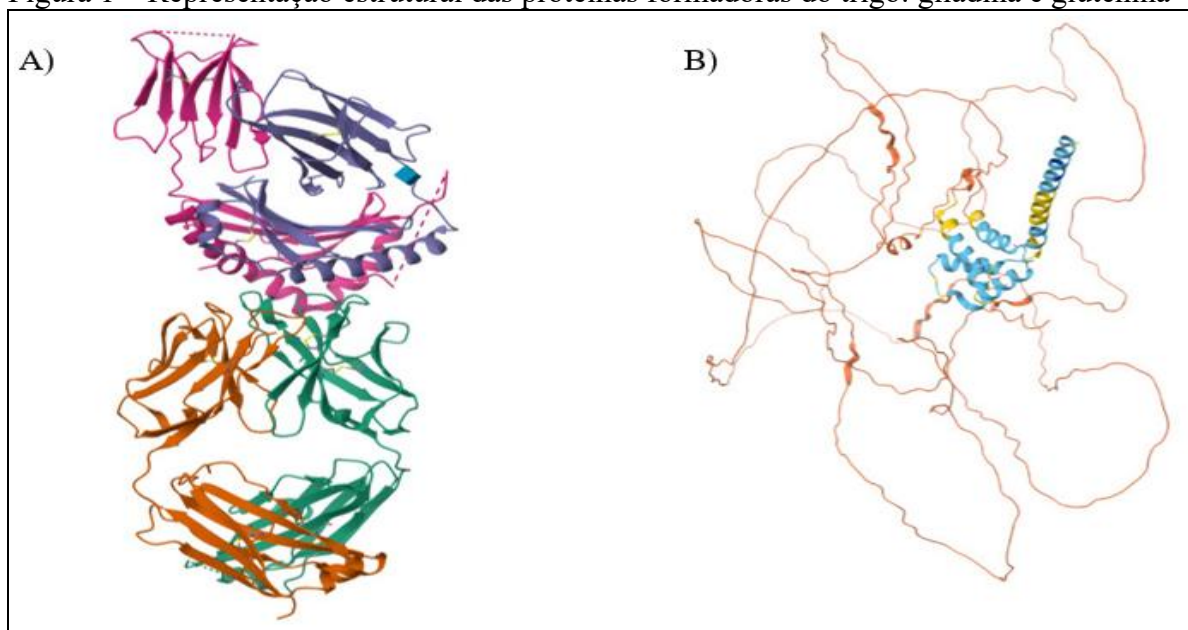
3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Glúten, Saúde e Demandas Tecnológicas Contemporâneas

3.1.1 Glúten: função tecnológica e impacto fisiológico

O glúten consiste em um complexo proteico de armazenamento presente principalmente no trigo, no centeio e na cevada, sendo constituído majoritariamente pelas frações proteicas conhecidas como gliadinas e gluteninas (Figura 1) (CARDOSO et al., 2021; OLIVEIRA, 2023). Essas proteínas apresentam propriedades tecnológicas singulares, destacando-se pela resistência ao calor e pela capacidade de formar uma rede viscoelástica contínua quando hidratadas e submetidas à ação mecânica, característica fundamental para a qualidade estrutural de produtos panificados e massas alimentícias (CARDOSO et al., 2021).

Figura 1 – Representação estrutural das proteínas formadoras do trigo: gliadina e glutenina



A) Estrutura tridimensional da proteína gliadina; B) Estrutura tridimensional da proteína glutenina.
Fonte: OKURA *et al.*, (2023); AlphaFold (2022).

As gliadinas são responsáveis por conferir viscosidade e extensibilidade à massa, enquanto as gluteninas contribuem para a elasticidade e resistência mecânica da rede proteica (ZANG et al., 2022). A interação entre essas frações resulta na formação de uma matriz tridimensional contínua, capaz de reter água e gases durante a fermentação, permitindo o crescimento e o desenvolvimento do volume das massas, além de garantir a coesão, estabilidade durante o processamento e integridade após o cozimento (MORAES; DA SILVA,

2023). Essas propriedades consolidam o glúten como elemento central na engenharia de alimentos à base de trigo (ZANG et al., 2022; MORAES; DA SILVA, 2023).

Do ponto de vista fisiológico, as proteínas do glúten apresentam resistência parcial à digestão gastrointestinal, o que pode resultar na formação de fragmentos peptídicos bioativos que não são adequadamente metabolizados (CENNI et al., 2023). Em indivíduos geneticamente predispostos, esses peptídeos podem desencadear respostas adversas, justificando a exclusão do glúten da dieta em contextos clínicos específicos (CENNI et al., 2023; AL-TOMA et al., 2025).

Sob a perspectiva da ciência e tecnologia de alimentos, contudo, o glúten não deve ser analisado exclusivamente como fator de risco, mas também como um referencial tecnológico amplamente consolidado. Suas proteínas exercem papel determinante na formação de uma rede viscoelástica responsável por propriedades essenciais, como coesão, elasticidade e estabilidade estrutural, estabelecendo um padrão funcional utilizado como base comparativa no desenvolvimento de matrizes alternativas isentas de glúten (CAPPELLI; OLIVA; CINI, 2020; BOUKID; GASPARRE; ROSELL, 2024).

Portanto, a exclusão do glúten impõe desafios predominantemente tecnológicos, relacionados à organização, coesão e estabilidade da matriz alimentar. Tais desafios exigem soluções que conciliem segurança ao consumidor, integridade estrutural durante o processamento e desempenho funcional adequado, especialmente em produtos submetidos a etapas de hidratação e cocção (ROCHA, 2020).

3.1.2 Doença associadas ao glúten e implicações para a ciências de alimentos

Embora amplamente consumido em diferentes culturas da população mundial, o glúten pode desencadear respostas adversas em indivíduos predispostos (dando origem aos chamados distúrbios relacionados ao glúten (ALVARENGA et al., 2024). Essas condições englobam três entidades clínicas principais: (i) a doença celíaca (DC), de natureza autoimune; (ii) a alergia ao trigo (AT), mediada por imunoglobulina E; e (iii) a sensibilidade ao glúten não celíaca (SGNC), caracterizada pela ausência de mecanismos autoimunes ou alérgicos definidos (WANG et al., 2020), conforme descrito no Quadro 1

Quadro 1 – Caracterização clínica, imunológica e terapêutica das principais condições associadas à ingestão de glúten e trigo

Condição	Definição	Conduta terapêutica	Principais características distintivas	Referências
Doença celíaca	É uma reação sistêmica autoimune desencadeada pela ingestão de glúten em indivíduos geneticamente suscetíveis, resultando em lesão inflamatória na mucosa do intestino delgado mediada por linfócitos T.	Dieta isenta de glúten.	Resposta autoimune específica; Atrofia das vilosidades intestinais; Presença de marcadores genéticos específicos.	(Raiteri et al., 2022).
Alergia ao trigo	Reação imunológica mediada por anticorpos IgE desencadeada pela ingestão de proteínas do trigo, resultando em manifestações alérgicas imediatas, geralmente entre minutos e poucas horas após a exposição.	Exclusão de alimentos contendo trigo; administração de anti-histamínicos e corticoides em casos de exposição.	Resposta imunológica imediata (IgE); Envolve outras proteínas do trigo além do glúten; Ausência de lesão intestinal crônica	(Singla et al., 2024).

Continua... Quadro 1 – Caracterização clínica, imunológica e terapêutica das principais ...

Condição	Definição	Conduta terapêutica	Principais características distintivas	Referências
Sensibilidade ao glúten não celíaca	Síndrome caracterizada por manifestações intestinais e extraintestinais associadas ao consumo de glúten, em pacientes onde a doença celíaca e a alergia ao trigo foram descartadas.	Redução ou exclusão da ingestão de glúten, de acordo com a tolerância individual.	Diagnóstico por exclusão, ausência de marcadores autoimunes e danos severos à mucosa intestinal.	(Stordal; Kurppa, 2025).

Fonte: elaborada pela autora.

A doença celíaca é uma enfermidade autoimune crônica desencadeada pela ingestão de glúten em indivíduos geneticamente suscetíveis, portadores dos alelos HLA-DQ2 ou HLA-DQ8 (MARTINS et al., 2022). O processo inflamatório resultante compromete a mucosa intestinal, culminando na atrofia das vilosidades e na redução da capacidade de absorção de nutrientes (CENNI et al., 2023).

Estima-se, globalmente, que a doença celíaca afete aproximadamente 1% da população mundial, com registro em várias regiões, incluindo Europa, Oriente Médio, Norte da África e Índia (SAHIN, 2021). As maiores prevalências são observadas na Europa e Oceania (0,8%), seguidas pela Ásia (0,6%), América do Norte e África (0,5%), enquanto a América do Sul registra os menores índices, com cerca de 0,4% (BOLIA; THAPAR, 2024). Essa distribuição, contudo, apresenta variações significativas conforme a localização geográfica, a faixa etária e o sexo, sendo mais frequente em mulheres e no público infantil (MALEKI et al., 2025).

No Brasil, a ausência de estudos multicêntricos limita estimativas precisas da doença celíaca. Embora, embora projeções indiquem aproximadamente dois milhões de indivíduos celíacos, muitos ainda sem diagnóstico (FENACELBRA, 2025).

As manifestações clínicas são heterogêneas, variando de sintomas

gastrointestinais clássicos, como diarreia crônica, perda de peso e dor abdominal, até sintomas extraintestinais, como anemia, osteoporose e alterações neurológicas (KOTZE et al., 2020). O diagnóstico baseia-se na associação de testes sorológicos e análise histopatológica,

O diagnóstico baseia-se na associação de testes sorológicos como anticorpos anti-transglutaminase, anti-endomísio e anti-gliadina, e análise histopatológica de biópsia duodenal, que revela alterações típicas, incluindo atrofia das vilosidades intestinais (DENDASCK, 2022), sendo a dieta isenta de glúten a única abordagem terapêutica eficaz atualmente disponível (MELATI et al., 2021).

Para os celíacos, a adoção rigorosa e permanente de uma dieta sem glúten é capaz de permitir a regeneração da mucosa intestinal e reduzir os riscos de complicações a longo prazo, como linfomas e câncer intestinal (MELATI et al., 2021; OLIVEIRA et al., 2022a). Contudo, a adoção à dieta pode ser desafiadora devido à escassez de opções alimentares adequadas, associado ao custo elevado de produtos sem glúten, além do impacto social decorrente das restrições alimentares, especialmente em estabelecimentos comerciais de serviço de alimentação, que por muitas vezes não possuem opções inclusivas no cardápio (BORBA; OLIVEIRA; CORREA, 2023).

Do ponto de vista nutricional, indivíduos com doença celíaca frequentemente apresentam deficiências nutricionais, como baixos níveis de ferro, folato, vitamina B12, vitamina D, zinco, cálcio e magnésio, tornando essencial o monitoramento do estado nutricional e a avaliação da necessidade de suplementação (BARCELOS et al., 2024). Embora a exclusão glúten favoreça a regeneração do intestino e melhore os parâmetros bioquímicos, algumas deficiências podem persistir, exigindo acompanhamento clínico e nutricional contínuo (VERMA, 2021).

Quanto a alergia ao trigo, esta consiste em uma reação imunológica mediada por imunoglobulina E (IgE), associada à ingestão de proteínas do trigo, podendo desencadear manifestações clínicas imediatas de alergias, que podem ocorrer frequentemente minutos a horas após a exposição ao trigo. O desenvolvimento dessas reações depende de um processo prévio de sensibilização imunológica, caracterizado pela produção de anticorpos IgE específicos, etapa essencial para o desencadeamento dos sintomas clínicos em exposições subsequentes ao alérgeno (ARUL ARASAN et al., 2025).

Clinicamente, a alergia ao trigo apresenta manifestações que variam desde sintomas cutâneos (urticária, angioedema), gastrointestinais (náuseas, vômitos, dor abdominal), respiratórios (rinite, asma) até reações sistêmicas graves, como anafilaxia, incluindo a anafilaxia dependente de exercício induzida pelo trigo (WDEIA). O diagnóstico

baseia-se na história clínica associada a testes de sensibilização, como a dosagem de IgE específica, testes cutâneos por puntura (*skin prick test*) e, quando necessário, testes de provocação oral controlados, considerados padrão-ouro (SICHERER; SAMPSON, 2014). O tratamento consiste fundamentalmente na exclusão rigorosa do trigo da dieta, educação alimentar do paciente e, nos casos de risco, prescrição de adrenalina autoinjetável para manejo de reações anafiláticas (SICHERER; SAMPSON, 2014).

Já a sensibilidade ao glúten não celíaca (SGNC) é definida pela ocorrência de sintomas intestinais e extraintestinais relacionados ao consumo de glúten, na ausência de mecanismos autoimunes ou alérgicos comprovados (PIOTIN; DE BLAY, 2025). Os mecanismos fisiopatológicos ainda não são totalmente elucidados, mas há evidências de que outros componentes do trigo, como frutanos (FODMAPs) e inibidores de amilase-tripsina (ATIs), possam desempenhar papel relevante. Essa condição levanta um ponto central para a ciência dos alimentos: o problema nem sempre está no glúten isoladamente, mas na complexidade da matriz alimentar do trigo moderno, intensamente processado e consumido em excesso (MUMOLO et al., 2020).

Embora o termo SGNC tenha sido proposto há mais de quatro décadas, ainda persistem incertezas quanto à sua etiopatogenia, critérios diagnósticos e abordagens terapêuticas. A ampla heterogeneidade das manifestações clínicas, o impacto negativo na qualidade de vida e a elevada prevalência estimada reforçam a necessidade de aprofundamento das investigações científicas nessa área (MIRANDA et al., 2023b).

O diagnóstico da SGNC é eminentemente clínico e de exclusão, sendo imprescindível descartar previamente a doença celíaca e a alergia ao trigo. Na ausência de biomarcadores específicos, recomenda-se a avaliação da resposta à dieta isenta de glúten, idealmente seguida de teste de provocação duplo-cego controlado por placebo para confirmação diagnóstica (CATASSI et al., 2022). O tratamento baseia-se principalmente na restrição do glúten, cujo grau de exclusão pode variar entre os indivíduos, sendo que abordagens dietéticas individualizadas são recomendadas para minimizar impactos nutricionais e melhorar a qualidade de vida (LEE, 2022).

Essas condições clínicas, embora distintas em seus mecanismos fisiopatológicos, convergem para uma demanda comum: a necessidade de alimentos isentos de glúten que sejam seguros, nutricionalmente adequados, abrindo espaço para a inovação tecnológica e para a incorporação de ingredientes não convencionais, como proteínas vegetais, fibras funcionais e coprodutos agroindustriais, no contexto dos alimentos sem glúten.

3.2 Alimentos Isentos de Glúten: desafios nutricionais e estruturais

O Codex Alimentarius define alimentos "sem glúten como aqueles que apresentam teor máximo de 20 ppm de glúten, sendo considerados seguros para consumo por indivíduos com doença celíaca (FAO, 2008). No Brasil, embora não exista um limite regulamentado, a legislação exige rotulagem obrigatória quanto à presença ou ausência de glúten (LUIZ et al., 2020). Contudo, a Lei nº 10.674/2003 obriga que os rótulos dos alimentos informem claramente as advertências "contém glúten" ou "não contém glúten", cabendo às vigilâncias sanitárias estaduais e municipais fiscalizar seu cumprimento (LUIZ et al., 2020; SELL et al., 2023).

Paralelamente às exigências regulatórias, observa-se crescimento expressivo do mercado global de alimentos isentos de glúten em escala global, impulsionado tanto por demandas clínicas quanto por escolhas associadas a estilos de vida e percepção de saúde (MORDOR, 2020). Estima-se que esse segmento apresente taxas anuais de crescimento em torno de 7,6% até 2027, com destaque para os produtos de panificação e massas alimentícias (FAJARDO et al., 2020). No contexto nacional, o cenário é ainda mais promissor, com projeções de crescimento anual composto de aproximadamente 10,7% até 2025, consolidando o Brasil como um dos principais mercados da América Latina para produtos isento de glúten (MORDOR, 2020). Esse avanço não se limita ao público celíaco, alcançando também consumidores que buscam alternativas associadas a saúde, bem-estar e estilos de vida específicos.

Entretanto, a ampliação da oferta e do consumo de alimentos sem glúten impõe desafios adicionais à indústria alimentícia, especialmente no que se refere à segurança dos produtos. A contaminação cruzada durante as etapas de processamento, transporte ou armazenamento representa um risco significativo para indivíduos sensíveis ao glúten, uma vez que o compartilhamento de equipamentos, superfícies e utensílios pode resultar em traços indesejáveis do contaminante (MOREIRA, 2024).

Nesse contexto, a adoção rigorosa de Boas Práticas de Fabricação (BPF) e de Procedimentos Operacionais Padronizados (POP) torna-se indispensável para assegurar a integridade dos produtos e a confiança do consumidor (BOZORG et al., 2024).

Além dos aspectos regulatórios e de segurança, a consolidação do mercado de alimentos isentos de glúten evidencia a necessidade de enfrentar desafios relacionados à qualidade nutricional, ao desempenho tecnológico e à aceitação sensorial desses produtos. A ausência do glúten, proteína responsável por propriedades estruturais fundamentais em

alimentos à base de trigo, exige o desenvolvimento de matrizes alternativas capazes de garantir estabilidade, funcionalidade e atributos sensoriais comparáveis aos produtos convencionais. Assim, a compreensão das limitações nutricionais e tecnológicas das formulações isentas de glúten torna-se essencial para orientar estratégias inovadoras no desenvolvimento desses alimentos, tema abordado a seguir.

3.2.1 Limitações nutricionais e tecnológicas das matrizes sem glúten convencionais

Apesar da expansão do mercado, a ausência do glúten impõe limitações estruturais relevantes, exigindo o desenvolvimento de matrizes alternativas capazes de assegurar estabilidade, desempenho tecnológico e aceitabilidade sensorial. Grande parte dos produtos disponíveis baseia-se em matrizes essencialmente amiláceas, estruturalmente frágeis e nutricionalmente limitadas (MIRONEASA; CODINĂ, 2019; BOUKID; GASPARRE; ROSELL, 2024). Essas formulações, comumente baseadas em amidos refinados de arroz, milho ou mandioca, resultam em sistemas estruturalmente simples, caracterizados por reduzida complexidade nutricional e tecnológica. Tal configuração pode ser compreendida como uma “matriz amilácea pobre”, marcada pela predominância de carboidratos rapidamente digestíveis e pela baixa diversidade de macronutrientes com função estrutural (MELATI et al., 2021; BOUKID; GASPARRE; ROSELL, 2024).

Do ponto de vista nutricional, o uso predominante de amidos refinados, embora favoreça neutralidade sensorial e facilidade de processamento, está associado a baixos teores de proteínas, fibras alimentares e compostos bioativos. Como consequência, esses produtos tendem a apresentar elevado índice glicêmico e menor capacidade de promover saciedade, comprometendo a qualidade nutricional da dieta de consumidores que dependem de alimentos glúten-free como base alimentar (MYHRSTAD et al., 2021).

Sob a perspectiva tecnológica, essas matrizes amiláceas simplificadas apresentam limitações significativas. A ausência de uma rede proteica contínua, como a formada pelo glúten em produtos à base de trigo, resulta em estruturas mais frágeis, suscetíveis à elevada pegajosidade após a cocção, à perda de integridade durante o processamento e à maior solubilização de sólidos em meio aquoso (UNGUREANU-IUGA; DIMIAN; MIRONEASA, 2020). Essa fragilidade estrutural compromete diretamente a qualidade sensorial dos produtos sem glúten, uma vez que a massa não consegue reter adequadamente gases, como o dióxido de carbono (CO₂) gerado durante a fermentação, resultando em menor volume e maior densidade do miolo em produtos como pães e massas (AGUIAR et al., 2022).

Além disso, estratégias voltadas ao aprimoramento do perfil nutricional das formulações sem glúten, como a incorporação de farinhas integrais de cereais isentos de glúten, pseudocereais, leguminosas e coprodutos vegetais, embora promissoras do ponto de vista nutricional, introduzem desafios tecnológicos adicionais. Esses ingredientes apresentam elevada capacidade de retenção de água, o que pode comprometer a textura, a crocância e a estabilidade do produto final durante o armazenamento, evidenciando a complexidade do equilíbrio entre valor nutricional e desempenho tecnológico em sistemas glúten-free (LUO et al., 2021; CULETU et al., 2021b). Dessa forma, a adoção de estratégias formulatórias e de processamento visa aproximar o desempenho estrutural das matrizes isentas de glúten às características observadas em produtos convencionais, conforme ilustrado na Figura 2 (MELATI et al., 2021; OLIVEIRA; SILVA; SILVA, 2022b).

Figura 2 – Organograma representativo de fontes alimentares para substituição do glúten



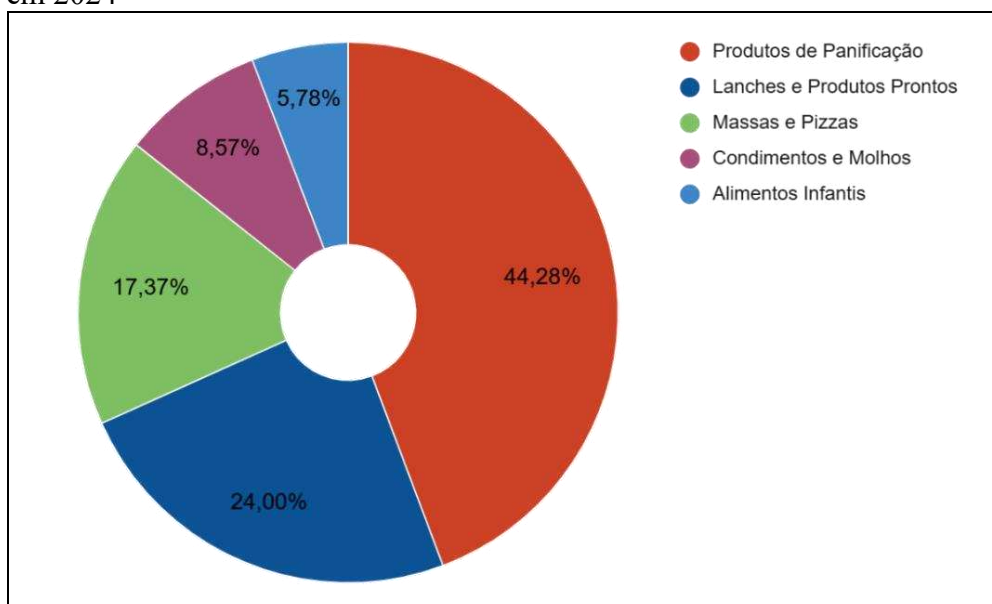
Fonte: elaborada pela autora.

Complementarmente, as farinhas alternativas amplamente utilizadas, como a farinha de arroz, embora apresentem vantagens como sabor neutro e boa digestibilidade, carecem das propriedades tecnológicas conferidas pelo glúten, especialmente no que se refere à elasticidade e à extensibilidade da massa (CAPPELLI; OLIVA; CINI, 2020). Para mitigar essas limitações, a indústria tem recorrido à combinação de diferentes fontes alimentares e ao uso de aditivos tecnológicos, incluindo proteínas vegetais e hidrocolóides, além da aplicação de tecnologias de processamento, como extrusão e tratamentos de alta pressão (MELATI et

al., 2021; OLIVEIRA; SILVA; SILVA, 2022b).

Apesar desses avanços tecnológicos, a aceitação sensorial e comercial dos produtos sem glúten ainda representa um desafio relevante. Categorias como pães, massas, biscoitos e pizzas concentram a maior preferência do público celíaco; entretanto, atributos como textura, sabor e preço permanecem como fatores limitantes para a consolidação desses produtos no mercado (DINIZ et al., 2023), conforme apresentado na Figura 3. Nesse cenário, a pesquisa e o desenvolvimento de novos ingredientes assumem papel central na busca por produtos que aliem qualidade sensorial, funcionalidade tecnológica e valor nutricional equilibrado (OLIVEIRA et al., 2021; ARORA et al., 2023).

Figura 3 – Preferência no mercado global de alimentos sem glúten por categoria em 2024



Fonte: Fortune Business Insights (2024, com adaptações).

Entre os diferentes segmentos de alimentos isentos de glúten, as massas alimentícias destacam-se tanto pelo elevado consumo quanto pelo potencial de inovação tecnológica associado à incorporação de ingredientes diferenciados, como coprodutos agroindustriais ricos em proteínas e compostos bioativos (ITUSACA-MALDONADO et al., 2024). No entanto, o desenvolvimento de massas sem glúten que sejam simultaneamente nutritivas, estruturalmente estáveis e sensorialmente atrativas permanece como um desafio técnico significativo. Assim, a superação das limitações inerentes às matrizes convencionais exige estratégias formulatórias integradas, capazes de conciliar densidade nutricional e desempenho tecnológico comparável ao das massas tradicionais à base de trigo.

3.2.2 Estratégias tecnológicas para substituição funcional do glúten

As limitações nutricionais e tecnológicas das matrizes sem glúten convencionais, frequentemente descritas como matrizes amiláceas pobres, evidenciam a necessidade de estratégias capazes de substituir funcionalmente o papel exercido pelo glúten em produtos à base de trigo (GASPARRE; ROSELL, 2023). A predominância de amidos refinados, associada à baixa contribuição proteica e fibrosa, resulta em sistemas estruturalmente frágeis, nos quais a integridade da matriz depende quase exclusivamente da gelatinização do amido. Essa dependência intensifica defeitos tecnológicos recorrentes, como elevada pegajosidade, colapso estrutural após a cocção e perdas significativas de sólidos solúveis (CAPPELLI; OLIVA; CINI, 2020; UNGUREANU-IUGA; DIMIAN; MIRONEASA, 2020).

Entre os alimentos tradicionalmente elaborados com farinha de trigo, as massas alimentícias destacam-se pelo elevado consumo global, ampla diversidade de formatos e forte inserção cultural (SHIOZAWA et al., 2020; ABIMAPI, 2021). Em produtos convencionais, a rede proteica formada pelo glúten confere elasticidade, coesão e resistência mecânica à massa, assegurando estabilidade durante o processamento e após o cozimento. Em contrapartida, a ausência do glúten nas massas sem glúten compromete significativamente o comportamento reológico do sistema, reduzindo elasticidade e coesão estrutural, o que se reflete negativamente na qualidade tecnológica e sensorial do produto final (CAPPELLI; OLIVA; CINI, 2020). Os principais defeitos associados a essas limitações estruturais são apresentados na Figura 4.

Figura 4 – Desafios tecnológicos e defeitos em massas alimentícias frescas sem glúten



Fonte: Cappelli, Oliva e Cini (2020) e Ungureanu-Iuga, Dimian e Mironeasa (2020, com adaptações).

Dessa forma, o desenvolvimento de massas alimentícias sem glúten representa um dos maiores desafios tecnológicos do segmento dos isentos de glúten, uma vez que esses produtos exigem elevado controle estrutural para garantir desempenho durante o processamento, estabilidade após a cocção e aceitabilidade sensorial. Diferentemente das massas tradicionais, nas quais o glúten atua como principal agente estruturante, as massas sem glúten demandam a construção de matrizes alternativas, capazes de compensar a fragilidade estrutural inerente às formulações amiláceas por meio de interações físico-químicas secundárias (ARIF et al., 2025; RAMOS et al., 2023).

Nesse contexto, a qualidade tecnológica da massa passa a depender diretamente do equilíbrio entre nutrição e tecnologia. Estratégias voltadas exclusivamente ao enriquecimento nutricional, como a incorporação de farinhas integrais, leguminosas ou coprodutos ricos em fibras, podem intensificar defeitos estruturais caso não sejam acompanhadas de soluções tecnológicas adequadas (YE et al., 2023). Assim, a formulação de massas sem glúten, com alta qualidade sensorial e nutricional, exige a integração criteriosa de ingredientes estruturantes e agentes funcionais, de modo a conciliar densidade nutricional, estabilidade estrutural e desempenho reológico satisfatório, que se aproximem o máximo possível dos produzidos com ingredientes convencionais (YE et al., 2023; MELO et al., 2024; PARSAMAJD et al., 2025).

Do ponto de vista tecnológico, a substituição funcional do glúten em produtos isentos de glúten pode ser compreendida em três eixos tecnológicos complementares, conforme representado nas Figuras 2 e 5: (i) proteínas vegetais, (ii) polissacarídeos e amidos e (iii) hidrocolóides (Figura 5), os quais atuam de forma sinérgica na matriz da massa, conferindo qualidade tecnológica a esta (RENZO et al., 2024).

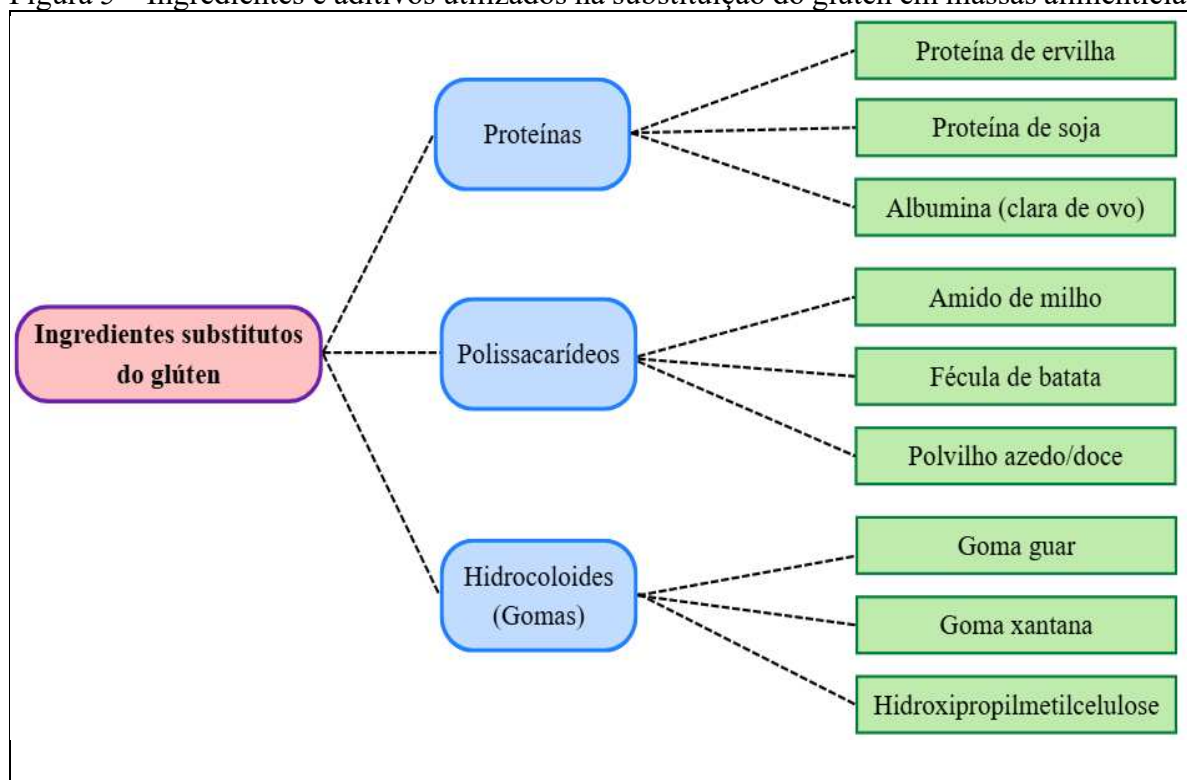
No primeiro eixo, as proteínas vegetais, provenientes de fontes como ervilha, soja e leguminosas em geral, contribuem para o aumento da densidade proteica da formulação e para a formação de redes estruturais secundárias, capazes de melhorar a coesão, a firmeza e a resistência mecânica da massa. Embora não reproduzam integralmente o comportamento viscoelástico do glúten, essas proteínas podem atuar de forma sinérgica com a fase amilácea e com hidrocolóides, resultando em sistemas estruturalmente mais estáveis (LI et al., 2024).

No segundo eixo, os polissacarídeos e amidos, incluindo amido de milho, fécula de batata e polvilhos de mandioca, desempenham papel central na gelatinização e na formação do corpo da massa. Durante o aquecimento em meio aquoso, esses componentes absorvem água, incham e rompem sua estrutura cristalina, formando uma rede contínua responsável pela retenção de água e pela manutenção da integridade estrutural do produto. A escolha do tipo de

amido e de sua proporção influencia diretamente a textura, a elasticidade e a estabilidade da massa durante o cozimento (ROSA-MILLAN, 2025).

Os hidrocolóides, no terceiro eixo, como goma guar, goma xantana e hidroxipropilmetilcelulose, atuam como agentes de ligação e estabilização, promovendo aumento da viscosidade, controle da migração de água e redução da perda de sólidos durante a cocção. Esses compostos são amplamente utilizados em formulações isentas de glúten por sua capacidade de mimetizar parcialmente as funções estruturais do glúten, contribuindo para a melhoria da textura e da aceitabilidade sensorial (CULETU et al., 2021b).

Figura 5 – Ingredientes e aditivos utilizados na substituição do glúten em massas alimentícias



Fonte: elaborada pela autora.

As massas alimentícias sem glúten se apresentam nas versões frescas e secas, com categorias distintas, como massas frescas e secas, que diferem quanto aos ingredientes empregados, aos métodos de processamento e às características de textura e cocção (SCARTON; CLERICI, 2022), conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Principais formatos de massas alimentícias frescas



Fonte: elaborada pela autora.

Embora tradicionalmente formuladas com cereais naturalmente isentos de glúten, como arroz e milho, observa-se, mais recentemente, a crescente incorporação de leguminosas e outras matérias-primas para aumentar o valor nutricional das formulações, devido ao maior conteúdo de macro e micronutrientes (BOUKID; GASPARRE; ROSELL, 2024). Ainda assim, muitos produtos comerciais apresentam baixa qualidade de cocção, com perdas significativas de massa durante o preparo e pegajosidade, defeitos recorrentes em massas isentas de glúten (ROCHA, 2020).

De modo geral, as limitações tecnológicas e sensoriais dos produtos sem glúten estão associadas à fragilidade estrutural da massa e ao predomínio de amidos e farinhas refinadas nas formulações convencionais, o que compromete tanto o desempenho tecnológico quanto o perfil nutricional desses alimentos (MYHRSTAD et al., 2021; AGUIAR et al., 2022). Embora a incorporação de ingredientes alternativos, como pseudocereais, leguminosas e coprodutos de frutas e hortaliças, represente uma estratégia promissora para o enriquecimento nutricional, esses componentes podem modificar a dinâmica de hidratação da matriz, impactando negativamente atributos como textura, estabilidade estrutural e comportamento durante o armazenamento (LUO et al., 2021; CULETU et al., 2021b).

Mesmo com os avanços tecnológicos e a ampliação do portfólio de ingredientes disponíveis, muitas massas alimentícias sem glúten ainda apresentam defeitos recorrentes, como elevada pegajosidade, baixa firmeza e instabilidade após a cocção (ROCHA, 2020). Esses entraves evidenciam que a substituição funcional do glúten não pode ser alcançada por

soluções pontuais ou pela simples adição de ingredientes, mas exige o desenvolvimento de matrizes alimentares mais complexas, nas quais os diferentes constituintes atuem de forma integrada e sinérgica de hidrocolóides (ESPINOZA-HERRERA et al., 2021; KNEŽEVIĆ et al., 2024; MANFRÉ et al., 2024).

Paralelamente, apesar do crescimento do mercado dos isentos de glúten, consumidores continuam enfrentando limitações relacionadas à oferta restrita, preços elevados e, em alguns casos, baixa aceitabilidade sensorial dos produtos disponíveis (HASSAN et al., 2024). Dessa forma, o desenvolvimento de alimentos sem glúten demanda investimentos contínuos em aprimoramento tecnológico e na seleção criteriosa de matérias-primas capazes de equilibrar estrutura, desempenho de cocção e qualidade sensorial, recorrendo a estratégias como modificação proteica, extrusão e combinações sinérgicas de hidrocolóides (ESPINOZA-HERRERA et al., 2021; KNEŽEVIĆ et al., 2024; MANFRÉ et al., 2024).

Nesse contexto, ingredientes que combinem proteína, fibra alimentar e funcionalidade tecnológica emergem como alternativas estratégicas para o desenvolvimento de sistemas isentos de glúten mais estáveis e nutricionalmente adequados, ao mesmo tempo em que contribuem para a organização estrutural da matriz. Essa abordagem amplia as possibilidades de aproveitamento de coprodutos agroindustriais com elevado potencial funcional, alinhando inovação tecnológica, qualidade nutricional e sustentabilidade.

A qualidade tecnológica e sensorial limitada de produtos sem glúten, como pães e massas alimentícias, está associada à fragilidade estrutural da massa, que não consegue reter adequadamente o dióxido de carbono (CO₂) gerado durante a fermentação. Isso compromete o volume e aumenta a densidade do miolo em produtos como pães e bolos (AGUIAR et al., 2022). Ademais, o uso predominante de amidos e farinhas refinadas em muitas formulações sem glúten contribui para um perfil nutricional desequilibrado, com menor teor de fibras, proteínas e minerais (MYHRSTAD et al., 2021). Dessa forma, um dos principais desafios tecnológicos na produção de alimentos sem glúten é desenvolver produtos que possuam características sensoriais e tecnológicas semelhantes às dos alimentos tradicionais à base de trigo, mantendo um bom valor nutricional (AZEREDO, 2022).

O uso de ingredientes alternativos, como farinhas integrais de cereais sem glúten, pseudocereais (como quinoa e amaranto), leguminosas (como grão-de-bico e lentilha) e coprodutos de frutas e hortaliças, oferece potencial para melhorar o perfil nutricional dos produtos sem glúten (LUO et al., 2021). No entanto, esses ingredientes apresentam alta capacidade de retenção de água, o que pode impactar negativamente a textura, a crocância e

a estabilidade do produto final durante o armazenamento (CULETU et al., 2021b).

Diversos estudos têm investigado o comportamento de farinhas alternativas sem glúten em diferentes aplicações alimentícias. Ingredientes como arroz, milho, trigo sarraceno, soja e leguminosas foram avaliados quanto ao desempenho estrutural da massa, ao perfil nutricional e à aceitação sensorial dos produtos finais (AZEREDO, 2022). Essas análises são essenciais para entender o papel de cada ingrediente na formulação e para auxiliar no desenvolvimento de produtos mais saudáveis, funcionais e atrativos para os consumidores (ARORA et al., 2023).

Embora o mercado de produtos sem glúten tenha apresentado crescimento expressivo nos últimos anos, os consumidores ainda enfrentam desafios relevantes relacionados a oferta limitada de opções, preços elevados e baixa aceitabilidade sensorial por parte de alguns produtos (HASSAN et al., 2024). Apesar dos avanços científicos no desenvolvimento de formulações mais eficientes, a substituição do papel tecnológico do glúten continua sendo um desafio central, sobretudo em produtos que dependem fortemente de suas propriedades estruturais e reológicas, como pães e massas alimentícias (MANFRÉ et al., 2024).

Investir no aprimoramento tecnológico e no uso de novas matérias-primas, aliando técnicas inovadoras como modificação proteica, extrusão e combinação de hidrocolóides, é fundamental para superar as limitações dos produtos sem glúten (ESPINOZA-HERRERA et al., 2021). Essas estratégias podem promover o desenvolvimento de alimentos mais equilibrados, acessíveis e sensorialmente aceitos, contribuindo para atender às necessidades de um mercado em constante expansão (KNEŽEVIĆ et al., 2024).

No desenvolvimento de produtos alimentícios isentos de glúten, a substituição da farinha de trigo representa um dos principais desafios tecnológicos. A seleção de farinhas e ingredientes alternativos deve atender, de forma integrada, aos requisitos tecnológicos e sensoriais, garantindo a qualidade e o sabor dos produtos finais (WESLEY; ANDRÉ; CLERICI, 2021).

Além dos desafios tecnológicos e sensoriais, a formulação de produtos sem glúten requer atenção especial ao seu perfil nutricional, uma vez que a substituição da farinha de trigo pode resultar em alimentos com menor densidade de nutrientes (CULETU et al., 2021a). Nesse sentido, a incorporação de proteínas vegetais, fibras alimentares e micronutrientes torna-se fundamental para mitigar os déficits nutricionais frequentemente associados a esse tipo de produto.

No Brasil, a alta dependência da importação de trigo, associada ao aumento do

consumo de alimentos sem glúten e à crescente valorização de ingredientes mais nutritivos, tem estimulado a diversificação das farinhas empregadas na indústria alimentícia (ARANTES et al., 2025). Nesse cenário, ingredientes como quinoa, arroz, milho, grão-de-bico e lentilhas destacam-se pelo perfil nutricional favorável, especialmente por possuírem relevante teores de proteínas, fibras, vitaminas e minerais, atendendo tanto às necessidades de indivíduos celíacos quanto às demandas daqueles aqueles interessados em alimentos funcionais (POISSON, 2023).

Apesar desse avanço, a substituição da farinha de trigo ainda representa um desafio tecnológico significativo, uma vez que o glúten apresenta propriedades reológicas essenciais à qualidade do processamento e do produto (CAPPELLI; OLIVA; CINI, 2020). Entre os cereais naturalmente isentos de glúten, arroz e milho são os mais amplamente utilizados, enquanto outros ingredientes, como sorgo, trigo sarraceno e grão-de-bico, requerem combinações específicas com hidrocolóides, como goma xantana e carboximetilcelulose, para compensar a ausência de glúten e assegurar a estabilidade estrutural das formulações (DINIZ et al., 2023).

A farinha de arroz, em particular, destaca-se como uma das alternativas mais utilizadas devido ao seu sabor neutro, elevada digestibilidade e coloração clara (PARK; KIM, 2023). Ademais, essas características e suas propriedades reológicas permitem fácil incorporação em processos industriais, especialmente em formulações com alto teor de sólidos (NUNES, 2020). Paralelamente, o uso de amidos nativos e modificados é amplamente difundido na indústria alimentícia, para conferir características como gelificação, estabilização, melhor cor, estrutura e textura aos produtos sem glúten (GARSKE, 2021).

Mais recentemente, estudos apontam que a incorporação de coprodutos agrícolas, como cascas, sementes e tortas oriundas do processamento de oleaginosas, configura uma estratégia eficiente para enriquecimento nutricional de alimentos sem glúten, (CUNHA et al., 2020; ASLAM et al., 2024), ao mesmo tempo que, os seus reaproveitamentos não apenas reduz o desperdício alimentar, mas também contribui para a segurança nutricional e ambiental, ampliando o portfólio de farinhas alternativas no mercado (LIMA et al., 2023).

Estudos indicam que ao menos cinquenta indústrias globais têm investido nos últimos anos na conversão de coprodutos em produtos de alto valor agregado, mostrando o potencial de transformação de coprodutos agrícolas em novos insumos para a indústria alimentícia (ABRAÃO; PAULA, 2022). A valorização desses subprodutos alimentícios, como a torta obtida durante a extração de óleos de oleaginosas, representa uma abordagem alinhada aos princípios do desenvolvimento sustentável, contribuindo para uma economia circular e

reduzindo o desperdício alimentar (CUNHA et al., 2020). Esse material, que pode ser transformado em farinhas, concentrados proteicos ou até mesmo bebidas vegetais, apresenta alto teor de proteínas, fibras e compostos bioativos. Tais características tornam esses ingredientes promissores para o desenvolvimento de massas alimentícias sem glúten, com apelo funcional e sensorial (ROCHA, 2020; PINHEIRO et al., 2022).

Como alternativa, a amêndoa da castanha de caju (ACC) surge como uma opção promissora. Rica em proteínas, fibras e compostos antioxidantes, essa matéria-prima e os subprodutos do seu processamento podem ser transformados em farinhas e concentrados proteicos, apresentando alto valor funcional e sensorial. Sua utilização em formulações de massas alimentícias sem glúten promove não apenas a inovação tecnológica, mas também sustentabilidade e agregação de valor ao setor agroindustrial (PINHEIRO et al., 2022).

3.3 Valorização de Coprodutos Agroindustriais: a Torta da Amêndoa de Castanha de Caju (ACC) como Ingrediente Funcional de *Upcycling*

3.3.1 *Da economia linear à economia circular na cadeia de alimentos*

Historicamente, as cadeias produtivas foram estruturadas sob a lógica extrair–produzir–descartar, característica da economia linear. Nesse modelo, a matéria-prima, eventualmente, consumida é convertida em produtos finais e, ao término do consumo ou do processo industrial, os materiais residuais são frequentemente destinados ao descarte, o que resulta em elevados volumes de resíduos e perda de valor econômico e nutricional. Como o descarte é visto como o fim da linha para o produto e os subprodutos gerados no processo, esse modelo tende a produzir altos volumes de resíduos. Além disso, a economia linear tende a favorecer ciclos curtos de reposição de produtos e baixa internalização dos impactos ambientais, sustentando o crescimento com base no uso intensivo de recursos e na previsibilidade do descarte (KUASOSKI; DOLIVEIRA, 2023).

Em contrapartida, a economia circular propõe manter o valor de produtos, materiais e recursos em uso pelo maior tempo possível, por meio de estratégias de redução de entradas de recursos não renováveis, aumento de eficiência ao longo do ciclo de vida e recuperação de valor de resíduos e subprodutos. Nesse contexto, a circularidade é frequentemente associada à lógica dos 3R's (reduzir, reutilizar e reciclar), orientando cadeias produtivas a reterem funcionalidade e valor, em vez de tratarem o descarte como “fim de linha” (BIGLIARDI et al., 2024).

3.3.2 Upcycling alimentar: coprodutos como matéria-prima funcional de alto valor

No campo da ciência e tecnologia de alimentos, a transição para a sustentabilidade da economia circular tem sido operacionalizada por meio do *upcycling* alimentar, consiste em transformar subprodutos ou ingredientes tradicionalmente descartados em novos produtos de maior valor agregado destinados ao consumo humano. Esse plano desloca o coproduto da condição de “resíduo” para a de matéria-prima funcional, reconhecendo que ele possui uma matriz rica em macronutrientes remanescentes, que podem desempenhar papéis estruturais e tecnológicos em formulações alimentares, além de contribuírem para o enriquecimento nutricional (ASCHEMANN-WITZEL; STANGHERLIN, 2021).

A incorporação de coprodutos em alimentos pode gerar benefícios interdependentes: (i) uso consciente de recursos naturais; (ii) revisão da cadeia de produção para a diminuição de potenciais desperdícios; (iii) desenvolvimento da segurança alimentar por diversificação de fontes; (iv) redução das desigualdades socioeconômicas e dos impactos ambientais negativos decorrentes de cadeias de produção (RABBI; AMIN, 2024). Assim, o *upcycling* não se limita a uma medida ambiental: trata-se de uma estratégia de inovação tecnológica, capaz de criar ingredientes e produtos alinhados a tendências contemporâneas de consumo, como alimentos plant-based, funcionais e com apelo de sustentabilidade.

3.3.3 Biorrefinaria da amêndoa de castanha de caju e geração de coproduto do processo de concentração proteica

A castanha de caju apresenta grande relevância social e econômica para a região Nordeste, com destaque para o Estado do Ceará, que se consolida como o principal produtor nacional (CONAB, 2024). De acordo com os dados oficiais mais recentes, em 2023 a produção brasileira da castanha de caju alcançou 116.829 toneladas, sendo o Ceará responsável por 69.600 toneladas, correspondentes a 56,7% da produção nacional. Os Estados do Piauí e do Rio Grande do Norte alcançaram a segunda e terceira posições, com produções de 21.000 toneladas (17,1%) e 20.700 toneladas (16,8%), respectivamente (IBGE, 2023; CONAB, 2024).

Além da expressiva importância econômica, a castanha de caju destaca-se pelo elevado valor nutricional. A amêndoa é rica em proteínas (~22%), carboidratos (~23%) e lipídios (~45%), com predominância de ácidos graxos mono e poli-insaturados, além de fibras

alimentares, minerais como ferro e fósforo e vitaminas, incluindo β -caroteno, luteína, zeaxantina, tiamina e tocoferóis (BARBOSA, 2023; ASLAM et al., 2024). Adicionalmente, estudos relataram a presença de compostos bioativos, como catequinas e epicatequinas, associados a propriedades antioxidantes, anti-inflamatórias, antivirais e antibacterianas, com potencial na prevenção de doenças cardiovasculares e no controle da resistência à insulina (SILVA, 2022).

O beneficiamento da castanha de caju possibilita o aproveitamento integral do fruto, gerando produtos com diferentes níveis de valor agregado, conforme ilustrado na Figura 7. Embora as amêndoas inteiras apresentem maior valor comercial, as amêndoas quebradas representam uma oportunidade para o desenvolvimento de novos produtos nutritivos, como farinhas funcionais e ingredientes aplicáveis em alimentos de base vegetal (*plant-based*) (SHARMA et al., 2020b). Essa valorização de frações historicamente subutilizadas está alinhada aos princípios de eficiência de uso de recursos e redução de desperdícios.

Figura 7 – Aproveitamento integral do pseudofruto do caju e da castanha de caju



Fonte: elaborada pela autora.

Nesse contexto, a aplicação do conceito de biorrefinaria à cadeia do caju (*Anacardium occidentale* L.) tem ganhado destaque como uma abordagem capaz de integrar diferentes rotas tecnológicas atuais permitem a extração de frações complexas de alto valor agregado. Diferentemente do modelo linear de “extração–produção–descarte”, a biorrefinaria busca maximizar o aproveitamento da biomassa, promovendo a recuperação de frações nutricional e tecnologicamente relevantes e a reinserção de correntes remanescentes em novas

aplicações industriais (LIMA et al., 2021). Esse enquadramento é particularmente relevante para a indústria de oleaginosas, na qual a prensagem e extração de óleo geram coprodutos sólidos que concentram componentes estruturais, frequentemente ricos em fibras e proteínas residuais.

Paralelamente, a crescente busca por proteínas alternativas e alimentos funcionais tem impulsionado o mercado global de produtos *plant-based*, que vem crescendo a uma taxa anual de 12,03%, alcançando US\$ 85 bilhões em 2025, com projeção de atingir US\$ 150 bilhões até 2030 (MORDOR INTELLIGENCE, 2025). Nesse cenário, ingredientes derivados da amêndoa de castanha de caju surge como alternativa promissora para a indústria alimentícia, sendo empregados tanto na produção de concentrados proteicos quanto em formulações de produtos isentos de glúten, contribuindo simultaneamente para inovação tecnológica e sustentabilidade (BISINOTTO et al., 2021).

Do ponto de vista tecnológico, a obtenção do concentrado proteico a partir da torta de amêndoa de castanha de caju, por meio de processos como a solubilização alcalina, configura-se como uma etapa estratégica de isolamento nutricional e de modificação físico-química da matriz original. O próprio concentrado pode ser compreendido como um produto de valor agregado, obtido a partir de uma fração anteriormente considerada secundária, evidenciando a complexidade nutricional e funcional das correntes geradas ao longo do processamento (LIU et al., 2023).

Entretanto, mesmo após as etapas de concentração proteica, é gerada uma fração sólida residual, aqui denominada de coproduto sólido pós-concentração proteica da amêndoa de castanha de caju. Esse coproduto, frequentemente negligenciado do ponto de vista tecnológico, pode concentrar componentes estruturais relevantes, como fibras alimentares, proteínas residuais parcialmente modificadas e compostos bioativos. Trata-se, portanto, de uma matriz complexa com potencial funcional distinto daquele da amêndoa original ou do concentrado proteico. A análise de sua composição e de seu comportamento tecnológico em sistemas alimentares, especialmente em formulações isentas de glúten, torna-se fundamental para compreender sua capacidade de atuar no reforço estrutural, na retenção de água e na organização da matriz do produto final, estabelecendo as bases para sua valorização como ingrediente de upcycling alimentar.

3.4 Bases Tecnológicas e Mecanismos de Estruturação de Matrizes Alimentares

3.4.1 *Mecanismos estruturais e reológicos em massas alimentícias sem glúten*

A formação da estrutura em massas alimentícias sem glúten difere substancialmente daquela observada em massas tradicionais à base de trigo, uma vez que estas últimas dependem da rede proteica contínua formada pelo glúten para conferir elasticidade, coesão e resistência mecânica (CAPPELLI; OLIVA; CINI, 2020). Na ausência do glúten, a organização estrutural das massas sem glúten passa a depender predominantemente de mecanismos físico-químicos associados à gelatinização do amido e às interações secundárias entre amidos, proteínas e outros constituintes da matriz alimentar (OLUWOLE et al., 2026).

O amido constitui o principal agente estruturante em sistemas sem glúten. Durante o aquecimento em meio aquoso, os grânulos de amido absorvem água, incham e sofrem ruptura de sua estrutura cristalina, promovendo a liberação parcial de amilose e a reorganização da amilopectina (CHAKRABORTY et al., 2022). Esse processo, conhecido como gelatinização, resulta na formação de uma rede contínua capaz de reter água e conferir viscosidade e coesão à massa, desempenhando papel central na manutenção da integridade estrutural durante o cozimento (YAN et al., 2024). A extensão e a eficiência da gelatinização dependem de fatores como tipo de amido, disponibilidade de água, temperatura e presença de outros componentes da matriz.

Em matrizes complexas, como aquelas enriquecidas com coprodutos vegetais, a gelatinização do amido ocorre em um ambiente competitivo. Proteínas, fibras alimentares e lipídios presentes na formulação competem pela água disponível, alterando a cinética de hidratação dos grânulos e, conseqüentemente, o perfil reológico da massa. Fibras alimentares, especialmente as insolúveis, apresentam elevada capacidade de retenção de água e podem reduzir a fração de água livre necessária à gelatinização completa do amido, resultando em redes estruturais mais descontínuas ou parcialmente desenvolvidas (LIU et al., 2023).

Do ponto de vista reológico, essas interações conferem às massas sem glúten um comportamento não linear e altamente dependente da composição da matriz (YAZAR, G.; DEMIRKESEN, 2023). A presença de partículas fibrosas pode atuar tanto como elemento de reforço quanto como ponto de descontinuidade estrutural, interferindo na formação de uma rede amilácea contínua. Em condições inadequadas de equilíbrio hídrico, essas partículas podem concentrar tensões mecânicas, favorecendo fratura, aumento de fragilidade e textura quebradiça do produto final (GAO et al., 2024).

As proteínas residuais presentes em coprodutos vegetais também desempenham papel relevante na organização estrutural da massa. Em sistemas amiláceos, essas proteínas podem se distribuir ao redor dos grânulos de amido, formando camadas ou “capas proteicas” que limitam a mobilidade da água e modificam o padrão de gelatinização (LI et al., 2023). Esse fenômeno pode resultar em retardamento da expansão dos grânulos e em alterações no perfil de gelificação, influenciando diretamente a firmeza, a elasticidade e a estabilidade da massa após o cozimento (ZHANG et al., 2025a).

Além disso, lipídios naturalmente presentes em matérias-primas vegetais podem interagir com o amido por meio da formação de complexos de inclusão com a amilose (WANG et al., 2020). Esses complexos tendem a reduzir a solubilização excessiva do amido, contribuindo para uma estrutura menos pegajosa e mais estável durante o cozimento, além de influenciarem positivamente a textura e a palatabilidade do produto final (LIU et al., 2023).

Dessa forma, a estrutura das massas alimentícias sem glúten resulta de um equilíbrio delicado entre gelatinização do amido, competição por água, interações proteína–amido–fibra e presença de lipídios (CAPPELLI; OLIVA; CINI, 2020). A compreensão desses mecanismos estruturais e reológicos é fundamental para orientar a definição de estratégias tecnológicas capazes de controlar o comportamento da massa durante o processamento e a cocção, tema abordado no item seguinte.

3.4.2 Estratégias tecnológicas para processamento de massas alimentícias sem glúten

Com base nos mecanismos estruturais e reológicos que governam a formação das massas sem glúten, o processamento tecnológico desses produtos requer estratégias específicas capazes de compensar a ausência do glúten e garantir desempenho adequado durante a modelagem, a cocção e o consumo (CULETU et al., 2021b). Diferentemente das massas tradicionais, nas quais a rede proteica do glúten se forma espontaneamente durante o amassamento, os sistemas isentos de glúten demandam controle criterioso da formulação e das condições de processamento para viabilizar a construção de matrizes estruturais alternativas, especialmente quando incorporam coprodutos agroindustriais ricos em fibras e compostos bioativos.

No desenvolvimento de formulações baseadas em subprodutos agroindustriais, a torta da amêndoa de castanha de caju (ACC) emerge como um ingrediente funcional relevante, devido à presença concentrada de fibras alimentares, proteínas residuais e compostos bioativos com impacto tecnológico (LIMA et al., 2023a). Entretanto, sua incorporação em

matrizes alimentares exige compreensão aprofundada das interações físico-químicas estabelecidas com ingredientes ricos em amido, como farinha de arroz e polvilho de mandioca, que desempenham papéis centrais na formação estrutural e funcional da massa (LIU et al., 2023).

O entendimento dessas interações é fundamental para a otimização de formulações sustentáveis, capazes de gerar produtos inovadores, funcionais e alinhados às demandas por alimentos de base vegetal (MCCLEMENTS; GROSSMANN, 2024).

Do ponto de vista tecnológico, as fibras alimentares presentes na torta de ACC exercem influência direta sobre propriedades como retenção de água, viscosidade e textura do produto final. A elevada capacidade de retenção hídrica dessas fibras modifica a disponibilidade de água livre no sistema, impactando a dinâmica de hidratação dos demais componentes da matriz (JIANG et al., 2019). A literatura demonstra que a incorporação de ingredientes ricos em fibras altera de forma significativa as propriedades reológicas e sensoriais das formulações, podendo aumentar a viscosidade da massa, modificar a estrutura dos géis formados pelos polissacarídeos e influenciar a estabilidade do produto final (YU et al., 2025).

Nesse contexto, a utilização combinada de ingredientes amiláceos torna-se estratégica para compensar as alterações físico-químicas introduzidas pela torta de ACC. A farinha de arroz é amplamente empregada em formulações sem glúten devido à sua baixa reatividade alérgica, sabor neutro e elevada digestibilidade (BANU; APRODU, 2022). Na matriz alimentar complexa proposta, a farinha de arroz atua como suporte estrutural, contribuindo para a formação de uma rede amilácea relativamente homogênea (PARK; KIM, 2023). O pequeno diâmetro dos grânulos de amido de arroz favorece sua distribuição uniforme no meio hidratado, facilitando a retenção de água e a formação de uma matriz contínua que confere corpo e consistência à massa (SHOUKAT et al., 2025).

O polvilho de mandioca, por sua vez, desempenha papel decisivo na coesão e elasticidade da massa, em função de sua baixa temperatura de gelatinização e elevada capacidade de formar géis claros e estáveis (CHAMORRO; PALENCIA; LERMA, 2025). Durante o aquecimento em meio aquoso, os grânulos de amido absorvem água, incham e rompem sua estrutura cristalina, formando uma rede contínua responsável pela retenção de água e pela organização viscoelástica do sistema (HWANG et al., 2022). Em massas sem glúten ou com baixa quantidade de proteínas estruturantes, o polvilho de mandioca atua como principal agente de ligação, promovendo elasticidade e integridade estrutural por meio das interações entre as cadeias de amilose e amilopectina (FERREIRA et al., 2025).

A dinâmica de hidratação em uma matriz alimentar que combina torta de ACC, farinha de arroz e polvilho de mandioca é governada por interações competitivas pela água disponível (DONMEZ et al., 2021). As fibras da torta de caju tendem a absorver grandes quantidades de água, reduzindo a fração de água livre acessível aos grânulos de amido. Esse ambiente competitivo pode retardar ou limitar a gelatinização dos amidos, especialmente quando a disponibilidade hídrica não é adequadamente ajustada, comprometendo a formação da rede viscoelástica responsável pela estabilidade da massa (LIU et al., 2023). Como a gelatinização eficiente depende de água suficiente e controle térmico adequado, a presença de fibras intensifica a complexidade estrutural do sistema (DONMEZ et al., 2021).

Do ponto de vista reológico, matrizes alimentares constituídas por amidos e fibras apresentam comportamento não linear, altamente dependente da proporção e da interação entre seus constituintes (ZHANG et al., 2025). Estudos sobre misturas de amidos indicam que a combinação de fontes amiláceas distintas, como arroz e mandioca, modifica a retenção de água, a textura e a estabilidade dos géis formados, efeitos que são intensificados na presença de fibras, devido à competição por água e às interações físico-químicas adicionais (WONGKHUENG et al., 2025). Essa complexidade funcional é particularmente relevante em sistemas alimentares inovadores que buscam substituir o glúten por matrizes estruturantes alternativas, baseadas em subprodutos funcionais e amidos capazes de promover organização estrutural, desempenho tecnológico e aceitação sensorial adequados (OLUWOLE et al., 2026).

Assim, o processamento de massas alimentícias sem glúten formuladas com torta de ACC exige estratégias integradas que conciliem controle da hidratação, seleção adequada de fontes amiláceas e ajuste das condições térmicas e mecânicas do processo (OLIVEIRA et al., 2025). A substituição funcional do glúten, nesse contexto, não pode ser alcançada por soluções isoladas, mas pela construção de matrizes alimentares complexas, nas quais formulação e processamento atuem de forma sinérgica para garantir estabilidade estrutural, qualidade sensorial e valor nutricional (ARORA et al., 2023).

3.4.3 Parâmetros de qualidade e estabilidade de massas sem glúten

3.4.3.1 Propriedades de hidratação e interação com água

Em massas alimentícias sem glúten, a água atua como principal agente

estruturante indireto, uma vez que governa simultaneamente a gelatinização do amido, a mobilidade da fase contínua, a formação e a coesão da matriz alimentar e, por consequência, a estabilidade durante a cocção e a qualidade final da textura (YE et al., 2024). Diferentemente das massas à base de trigo, nas quais a rede proteica do glúten contribui ativamente para a retenção hídrica e para a organização estrutural do sistema, as formulações glúten-free dependem de forma muito mais intensa do equilíbrio entre absorção e retenção de água pelos ingredientes e da disponibilidade de água livre para a gelatinização adequada do amido (YE et al., 2024).

Nesse contexto, a solubilidade em água constitui um parâmetro funcional relevante, pois expressa a facilidade de dissolução dos constituintes da matriz em meio aquoso (PONTES, 2024). Esse comportamento não está associado apenas à fração amilácea, mas também às interações com outros macronutrientes, especialmente proteínas, além das modificações estruturais induzidas por processos térmicos, como a gelatinização do amido (ZHANG et al., 2025a). Em sistemas complexos, variações na solubilidade refletem rearranjos moleculares que impactam diretamente a viscosidade, a estabilidade da massa e a perda de sólidos durante o cozimento (VARDHAN et al., 2025).

Do ponto de vista prático e tecnológico, parâmetros como capacidade de absorção de água (WAC/CAA) e capacidade de retenção de água (WHC/CRA) são amplamente utilizados para prever o comportamento da massa durante as etapas de mistura, laminação e cocção (ZHANG et al., 2024). Esses indicadores permitem antecipar tendências à pegajosidade, ao ganho de massa por hidratação e à perda de sólidos solúveis durante o preparo, sendo particularmente sensíveis em formulações que incorporam ingredientes ricos em fibras e proteínas, os quais competem com o amido pela água disponível (TORRES; LEMA; GALEANO, 2021).

A interação entre água e os constituintes da matriz também está diretamente relacionada às propriedades funcionais das farinhas e coprodutos, envolvendo aspectos como estrutura proteica, propriedades reológicas, densidade proteica e compatibilidade com outros ingredientes do sistema (ZHANG et al., 2024). A capacidade de ligação de água e óleo depende de fatores intrínsecos, como a composição de aminoácidos, a conformação tridimensional das proteínas e a polaridade ou hidrofobicidade das superfícies moleculares, determinando a afinidade dos constituintes pela fase aquosa e influenciando a estabilidade da massa (KAKAR et al., 2022).

Em matrizes enriquecidas com coprodutos vegetais, a elevada retenção hídrica associada às fibras alimentares pode representar uma vantagem do ponto de vista de

rendimento e suculência do produto final (KARIM et al., 2024). Contudo, essa retenção excessiva pode reduzir a quantidade de água livre disponível para os grânulos de amido, resultando em gelatinização subótima, alterações indesejáveis na viscosidade do sistema e comprometimento da coesão e da firmeza da massa após a cocção. Assim, o efeito das fibras sobre a hidratação deve ser interpretado de forma integrada, considerando tanto seus benefícios funcionais quanto seu impacto sobre a organização estrutural da matriz (KARIM et al., 2024).

Além disso, a presença de proteínas em concentrações significativas favorece interações proteína-lípido, que exercem influência direta sobre atributos organolépticos e tecnológicos (CHEN et al., 2026). Essas interações, mediadas por diferentes tipos de ligações físico-químicas, são moduladas por variáveis como pH, força iônica e temperatura de processamento, contribuindo para a retenção de sabor, incorporação de aromas e aumento da palatabilidade dos alimentos. Em sistemas sem glúten, tais interações assumem papel relevante na compensação parcial da ausência da rede proteica do glúten (GASPARRE; ROSELL, 2023).

Durante a cocção, a qualidade tecnológica das massas está intimamente associada à dinâmica de hidratação, sendo usualmente avaliada por indicadores como absorção de água, ganho de massa, turbidez da água de cocção e estabilidade estrutural pós-cozimento (SCARTON; CLERICI, 2022). Esses parâmetros evidenciam que hidratação e estrutura não são variáveis independentes, mas processos mutuamente modulados: ajustes na absorção e retenção hídrica impactam diretamente a gelatinização do amido e, conseqüentemente, a textura, a coesão e a estabilidade da massa (OLUWOLE et al., 2026). Dessa forma, o controle das propriedades de hidratação constitui um elemento central no desenvolvimento de massas sem glúten com desempenho tecnológico satisfatório e qualidade sensorial adequada (SANTOS et al., 2021).

3.4.3.2 Propriedades de intumescimento e impacto na textura

O poder de intumescimento (*swelling power*) constitui um parâmetro crítico para a qualidade e a estabilidade tecnológica de massas sem glúten, estando diretamente associado ao comportamento da fração amilácea durante a cocção (JIA et al., 2023). Esse parâmetro expressa a capacidade do sistema em aumentar de volume por meio da absorção de água e está intimamente relacionado ao processo de gelatinização do amido, no qual a amilopectina

desempenha papel central (HWANG et al., 2022). Índices correlatos, que inclui o índice de intumescimento, a viscosidade de pasta e os parâmetros associados à absorção e solubilização em água (p.ex., WAI/WSI, em abordagens por amostras), são amplamente utilizados para caracterizar a extensão do inchamento dos grânulos amiláceos sob aquecimento (MAURO; VELA; RONDA, 2023).

O comportamento de intumescimento é fortemente dependente do tipo de amido, da relação amilose/amilopectina, do grau de dano do amido, da presença de sais, lipídios, proteínas e fibras, bem como do histórico térmico imposto ao sistema (HWANG et al., 2022). Durante a cocção, a água difunde-se gradualmente da superfície para o interior da massa, promovendo o inchamento e o relaxamento dos grânulos de amido. Esse processo resulta em amolecimento progressivo da estrutura e reorganização da rede polimérica formada pelas cadeias de amilose e amilopectina, sendo determinante para atributos texturais como firmeza, elasticidade e sensação na mastigação (LI, 2022).

Em massas alimentícias sem glúten, o intumescimento do amido constitui um mecanismo central para a construção de corpo, coesão e maciez, uma vez que a estrutura do produto depende majoritariamente da gelatinização e do inchamento dos grânulos amiláceos (PADALINO; CONTE; DEL NOBILE, 2016). No entanto, quando ocorre de forma excessiva ou descontrolada, o intumescimento tende a estar associado a defeitos tecnológicos recorrentes, como elevada pegajosidade, amolecimento excessivo da matriz, perda de firmeza e maior liberação de sólidos na água de cocção, comprometendo a qualidade tecnológica e sensorial do produto final (CAPPELLI; OLIVA; CINI, 2020; UNGUREANU-IUGA; DIMIAN; MIRONEASA, 2020).

A literatura sobre massas e *noodles* sem glúten demonstra que defeitos como pegajosidade e baixa firmeza surgem frequentemente quando a matriz não consegue equilibrar três fenômenos interdependentes: (i) o grau de intumescimento e solubilização do amido; (ii) a integridade da rede estrutural substituta do glúten; e (iii) a retenção dos constituintes da formulação durante a cocção. Em sistemas sem glúten, esse equilíbrio estrutural não é espontâneo e precisa ser tecnologicamente induzido, por meio de estratégias formulatórias e de processamento adequadas (CAPPELLI; OLIVA; CINI, 2020).

Dentre as estratégias relatadas para o controle do intumescimento, destacam-se: (a) a pré-gelatinização controlada de parte do amido, que favorece a coesão inicial da massa; (b) a seleção combinada de amidos com perfis distintos de gelatinização e retrogradação; e (c) o uso de hidrocolóides, que aumentam a viscosidade da fase contínua, reduzem a migração de água e limitam a liberação de sólidos durante a cocção (CULETU et al., 2021). Em massas

sem glúten formuladas com hidrocolóides, observa-se com frequência redução da *cooking loss* e ajustes positivos na textura, uma vez que esses polímeros auxiliam na estabilização da matriz e na ancoragem da água ao sistema (CULETU et al., 2021b).

A presença de fibras alimentares, particularmente aquelas oriundas de coprodutos vegetais, introduz complexidade adicional ao comportamento de intumescimento do amido. Esse efeito ocorre principalmente por dois mecanismos complementares (CHEN et al., 2025). O primeiro corresponde à competição por água, visto que fibras com elevada capacidade de retenção hídrica reduzem a disponibilidade de água livre para o inchamento dos grânulos de amido, podendo resultar em gelatinização parcial ou heterogênea (LIU et al., 2023). O segundo mecanismo está associado ao efeito físico-particulado, no qual partículas fibrosas interferem na continuidade da rede amilácea, redistribuem tensões mecânicas e podem aumentar a sensação de friabilidade ou quebra, caso a matriz não esteja adequadamente ligada (LI et al., 2024a).

Dessa forma, em formulações que buscam conciliar aumento da densidade nutricional, por meio da incorporação de fibras e proteínas, com manutenção da qualidade tecnológica, o controle do intumescimento torna-se um ponto crítico de desenvolvimento (OLUWOLE et al., 2026). O desafio não reside em maximizar o inchamento do amido, mas em atingir um patamar ótimo de intumescimento, capaz de promover estrutura estável, firmeza adequada e baixa perda de sólidos durante a cocção, evitando o colapso estrutural e a pegajosidade excessiva no produto final (HWANG et al., 2022; CULETU et al., 2021b).

4 MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios para obtenção do coproduto gerado no processamento de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa da castanha de caju (ACC) e para a elaboração das formulações de massas alimentícias frescas sem glúten foram conduzidos no Laboratório de Processamento Agroindustrial (LPA) e no Laboratório de Análise de Alimentos (LAA) da Embrapa Agroindústria Tropical, em Fortaleza (Ceará, Brasil).

4.1 Obtenção do coproduto gerado a partir do processo de concentração de proteínas da amêndoa de castanha de caju (ACC)

O fluxograma de obtenção do coproduto utilizado como matéria-prima neste estudo está descrito na Figura 8. Amêndoas de castanha de caju do tipo P1 (pedaços grandes de primeira qualidade), classificadas conforme a Instrução Normativa nº 2, de 6 de fevereiro de 2017 (BRASIL, 2017), foram fornecidas por uma indústria localizada em Aquiraz – CE (3° 55' 32" S / 38° 22' 58" W). Os pedaços de amêndoas foram inicialmente aquecidos em estufa com circulação de ar (MA 033, Marconi, Brasil) a 110 °C por 15 min, com o objetivo de facilitar a etapa subsequente de extração do óleo.

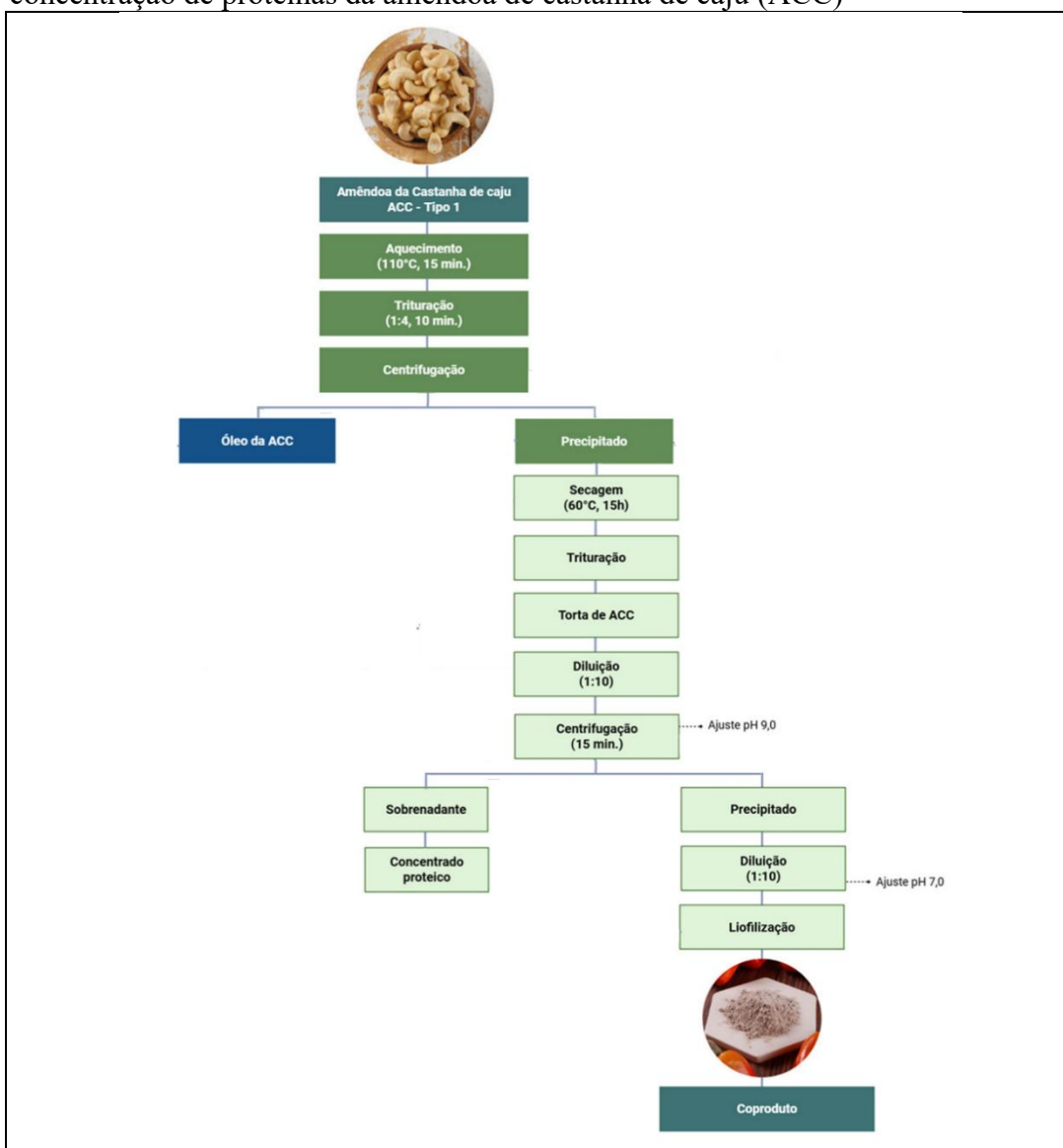
A extração aquosa de óleo seguiu a metodologia descrita por Lima, Pinto e Magalhães (2018), com adaptações. Para isso, 1,5 kg de amêndoas aquecidas foram homogeneizadas com 375 g de água (proporção 1:4, m.m⁻¹) em processador (R 502 V.V, Robot Coupe, França) por 10 min, até obtenção de uma pasta homogênea. Em seguida, a pasta foi aquecida entre 70 e 80 °C e centrifugada (Heraeus Megafuge 40, Thermo Scientific, Alemanha) a 4.415 × g por 30 min. A fase oleosa foi cuidadosamente separada e reservada, enquanto o precipitado residual foi recuperado, seco em estufa com circulação de ar forçada (MA 033, Marconi, Brasil) a 60 °C por 15 h, triturado em moinho (Pulverisette 19, Fritsch, Alemanha) e armazenado a -18 °C, originando a torta desengordurada de ACC.

A torta desengordurada de ACC foi então utilizada para obtenção do concentrado proteico, com a geração do coproduto. Inicialmente, a torta foi diluída em água destilada na proporção 1:10 (m.v⁻¹) e o pH ajustado para 9,0 com solução de hidróxido de sódio (NaOH) 0,5 M. A suspensão foi mantida sob agitação em agitador magnético por 15 min e posteriormente centrifugada (Heraeus Megafuge 40, Thermo Scientific, Alemanha) a 4.415 × g por 15 min, obtendo-se um sobrenadante rico em proteínas e um precipitado. O precipitado foi ressuspenso em água destilada e submetido a nova centrifugação nas mesmas condições,

garantindo maior recuperação da fração proteica.

O material resultante foi novamente diluído em água destilada na proporção 1:10 (m.v^{-1}) e o pH ajustado para 7,0 com solução de ácido clorídrico (HCl) 0,5 M, sob agitação constante, promovendo a precipitação de proteínas e sólidos associados. Em seguida, o material foi liofilizado (LP510, Liobras, Brasil), triturado em moinho analítico (Pulverisette 19, Fritsch, Alemanha) e peneirado em peneira de 28 mesh (abertura de 0,6 mm). O produto final, denominado coproduto do processo de concentração de proteína da amêndoa da castanha de caju (coproduto-ACC) (Figura 9), foi embalado a vácuo e armazenado a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ até sua utilização nas formulações de massas alimentícias.

Figura 8 – Fluxograma de obtenção do coproduto gerado a partir do processo de concentração de proteínas da amêndoa de castanha de caju (ACC)



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 9 – Coproduto gerado no processo de obtenção do concentrado proteico da amêndoa de castanha de caju



Fonte: elaborada pela autora.

4.1.1 Caracterização do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrado proteico da amêndoa de castanha de caju

A caracterização do coproduto-ACC contemplou análises de composição e valor nutricional, propriedades físico-químicas, perfil de minerais e aminoácidos, teor de compostos bioativos e atividade antioxidante, bem como propriedades tecnológicas do pó, fundamentais para avaliar sua funcionalidade e viabilidade de aplicação como ingrediente alimentar.

4.1.1.1 Composição e valor nutricional

As análises da composição centesimal do coproduto foram conduzidas em quintuplicata, no Laboratório de Análise de Alimentos (LAA) da Embrapa Agroindústria Tropical, de acordo com as metodologias oficiais descritas a seguir, visando à determinação dos principais constituintes nutricionais da amostra.

4.1.1.1.1 Umidade

O teor de umidade foi determinado segundo o método 925.10 da AOAC (2023). Bags de filtro de porosidade de 3 μm (XT4, Ankom Technology) foram numerados e acomodados em cápsulas de alumínio também numeradas. Os conjuntos foram tarados em estufa de circulação de ar forçada (Quimis, modelo Q317M-23) a $105 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ por 1 h, e os

pesos registrados. Aproximadamente 2 g de amostra triturada foram pesados em cada *bag*, que foi selado com seladora térmica. Em seguida, os conjuntos de *bag* de filtro com amostras e cápsulas de alumínio foram submetidos à secagem em estufa de circulação de ar forçada à 105 °C ± 2 °C por 12 h. Após o período de secagem, o material foi retirado da estufa e colocado em dessecador para resfriamento. Os pesos finais foram registrados e o teor de umidade calculado pela Equação 1, sendo os resultados expressos em g por 100 g de amostra:

$$Umidade (g. 100 g^{-1}) = \frac{100 \times (P_b + W_1 + W_4) - W_5}{W_1} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

Umidade = teor de umidade da amostra (g.100 g⁻¹);

P_b = peso do *bag* de filtro (g);

W₁ = peso da amostra original (g);

W₄ = peso da cápsula de alumínio (g);

W₅ = peso do conjunto *bag* de filtro com amostra pré-seca e cápsula de alumínio após extração da umidade (g).

4.1.1.1.2 Cinzas

O teor de cinzas foi quantificado de acordo com o método 923.03 da AOAC (2023). Aproximadamente 2,0 g da amostra foram pesados em cadinhos de porcelana previamente tarados e submetidos a incineração em mufla até a obtenção de resíduo mineral (Quimis, modelo Q317M-23) a 550 °C por 6 h. Após o resfriamento em dessecador, os cadinhos com as cinzas foram novamente pesados. Os resultados foram expressos em g por 100 g de amostra e calculados conforme a Equação 2:

$$Cinzas (g. 100 g^{-1}) = \frac{(P_c + P_a) - (P_{c+cinza})}{P_a} \times 100 \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

Cinzas = teor de cinzas da amostra (g.100 g⁻¹)

P_c = peso do cadinho vazio e tarado (g);

P_a = peso da amostra (g);

$P_{c + cinzas}$ = peso do cadinho contendo as cinzas após incineração (g).

4.1.1.1.3 Proteína bruta

O teor de proteína foi determinado pelo método Dumas, utilizando-se o analisador de nitrogênio/proteína NDA 701 Dumas (VELP Scientifica, Itália). Aproximadamente 50 mg de amostra foram submetidos à combustão completa em alta temperatura, promovendo a decomposição térmica da matriz e a liberação quantitativa de gases elementares. O nitrogênio liberado foi quantificado por meio do sistema detector LoGas™, em conformidade com as especificações do método AOAC 997.09 (AOAC 2023).

A calibração do equipamento foi realizada utilizando-se EDTA como padrão de referência. O teor de proteína bruta foi estimado a partir do nitrogênio total determinado, aplicando-se o fator de conversão 5,7, recomendado para ingredientes de origem vegetal e derivados de oleaginosas. Os resultados foram expressos em g de proteína por 100 g de amostra ($\text{g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$).

4.1.1.1.4 Lipídios

O teor de lipídios foi determinado segundo a metodologia Am 5-04 da AOCS (2005), utilizando-se o sistema de extração automática XT15 (Ankom Technology).

Bags de filtro de porosidade 3 μm (XT4, Ankom) previamente numerados foram acondicionados em cápsulas de alumínio, tarados em estufa de circulação de ar forçada (Quimis, modelo Q317M-23) a $105 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ por 1 h, e seus pesos registrados. Em seguida, aproximadamente 2 g de amostra foram pesados nos bags e selados. O conjunto formado pelos bags com as amostras, acomodados nas cápsulas de alumínio, foi submetido à secagem em estufa com circulação de ar forçada a $105 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ por 12 h, resfriado em dessecador por 1 h e novamente pesado.

Após a pré-secagem, os bags contendo as amostras foram submetidos à extração de lipídios no equipamento Ankom XT15, utilizando-se hexano como solvente, a $90 \text{ }^\circ\text{C}$ por 60 min, conforme ANKOM TECHNOLOGY (2009). Finalizada a extração, os bags foram novamente secos em estufa a $105 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ por 1 h para remoção do solvente residual, resfriados em dessecador e pesados.

O teor de lipídios foi calculado pela Equação 3, expressando-se os resultados em g por 100 g de amostra:

$$\text{Gordura Bruta (g.100 g}^{-1}\text{)} = \frac{100 \times [(W_5 - W_4) - W_3]}{W_1}$$

(Eq. 3)

Onde:

Gordura bruta = teor de gordura bruta da amostra (g.100 g⁻¹);

W_1 = peso da amostra original (g);

W_3 = peso do *bag* de filtro com amostra após extração da gordura (g);

W_4 = peso da cápsula de alumínio (g);

W_5 = peso do conjunto *bag* de filtro com amostra pré-seca e cápsula de alumínio pré-seca (g).

4.1.1.1.5 Carboidratos (fração glicídica)

O teor de carboidratos foi determinado com base na composição centesimal, sendo calculado por diferença em relação aos demais constituintes majoritários, conforme a metodologia descrita pela AOAC (2023). O cálculo foi realizado de acordo com a Equação 4:

$$\text{Carboidratos - FG (g.100 g}^{-1}\text{)} = 100 - (U + L + P + C)$$

(Eq. 4)

Onde:

Carboidratos-FG = carboidratos em fração glicídica (g.100 g⁻¹);

U = teor de umidade (g.100 g⁻¹);

L = teor de lipídios (g.100 g⁻¹);

P = teor de proteína (g.100 g⁻¹);

C = teor de cinzas (g.100 g⁻¹).

4.1.1.1.6 Fibra dietética alimentar

Os teores de fibra dietética alimentar (fração insolúvel – FDI e fração solúvel – SDF) foram determinados de acordo com o método 991.43 da AOAC (2010), utilizando-se analisador automático de fibra alimentar TDF da ANKON (ANKOM TECHNOLOGY). A fibra alimentar total (TDF) foi obtida pela soma das frações insolúvel e solúvel, como preconiza o mesmo método. Os resultados foram expressos em g por 100 g de amostra.

4.1.1.1.7 Valor energético

O valor energético do coproduto foi estimado por cálculo indireto, a partir da composição centesimal, utilizando-se os fatores gerais de conversão de Atwater, considerando-se 4 kcal·g⁻¹ para proteínas, 4 kcal·g⁻¹ para carboidratos e 9 kcal·g⁻¹ para lipídios (MERRILL; WATT, 1973; AOAC, 2023), conforme Equação 5.

$$\text{Valor energético (kcal. 100 g}^{-1}\text{)} = (P \times 4) + (C \times 4) + (L \times 9) \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde:

Valor energético = quantidade de energia da amostra (g.100 g⁻¹)

P = teor de proteínas (g.100 g⁻¹);

C = teor de carboidratos disponíveis (g.100 g⁻¹);

L = teor de lipídios (g.100 g⁻¹).

4.1.1.2 Caracterização físico-química

Para a caracterização físico-química do coproduto, aproximadamente 1 g de amostra foi pesada em béquer de vidro, utilizando-se balança analítica (Shimadzu, modelo ATX224R), ao qual foram adicionados 100 mL de água destilada. A mistura foi agitada em agitador magnético por 5 min, filtrada em funil de Büchner equipado com papel de filtro e acoplado a um kitassato, o qual foi conectado a uma bomba de vácuo. O filtrado obtido foi então submetido à caracterização de potencial hidrogeniônico (pH) e acidez total titulável. As análises foram realizadas em quintuplicata.

4.1.1.2.1 Potencial hidrogeniônico (pH)

O pH foi determinado por leitura direta do filtrado em pHmetro digital (Mettler Toledo F20 Five Easy) equipado com eletrodo LE 438, calibrado com soluções tampão pH 4,0 e 7,0. Os resultados foram expressos em unidades de pH (AOAC, 2023). Entre as leituras, o eletrodo foi lavado com água destilada e seco com papel absorvente.

4.1.1.2.2 Acidez total titulável

A acidez total titulável foi determinada por titulação com NaOH 0,01 N, utilizando-se fenolftaleína 1% como indicador, de acordo com metodologia titulométrica da AOAC (2023). Para cada amostra, 50 mL do filtrado foram transferidos para erlenmeyer de 125 mL, adicionando-se 3 gotas de fenolftaleína, e titulados até a mudança de cor para róseo-claro persistente. O volume consumido na titulação foi utilizado para o cálculo da acidez total titulável, expressa em gramas de ácido málico por 100 g de amostra, conforme a Equação 6.

$$\text{Acidez total titulável (g.100 g}^{-1}\text{)} = \frac{V_{NaOH} \times M_{NaOH} \times f_{NaOH} \times Eqg \times 10}{V_{et} \times P_a} \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde:

Acidez total titulável: teor de ácidos orgânicos totais expresso como ácido málico (g.100 g⁻¹);

V_{NaOH} = volume (mL) de hidróxido de sódio (NaOH) gasto na titulação da amostra;

M_{NaOH} = concentração molar do hidróxido de sódio (NaOH);

f_{NaOH} = Fator de correção do hidróxido de sódio (NaOH);

Eqg = equivalente-grama do ácido málico predominante na amostra (67,05);

V_{et} = volume (mL) de extrato de amostra utilizado na titulação;

P_a = peso (g) de amostra utilizado para preparar o extrato.

4.1.1.2.3 Atividade de água (A_w)

A atividade de água (a_w) foi determinada por leitura direta em medidor AquaLab Series 4TE (Decagon Devices, EUA), equipado com controle interno de temperatura e operado a 25 °C.

4.1.1.2.4 Cor

A determinação instrumental da cor do coproduto foi realizada em triplicata por leitura direta em espectrocolorímetro (CM-5, Konica Minolta, Japão), utilizando-se iluminante padrão D65 e observador de 10°, conforme o sistema de cor CIELab*. Foram obtidas as coordenadas cartesianas: L^* (luminosidade; 0 = preto e 100 = branco); a^* (coordenada no eixo vermelho-verde; +a = vermelho e -a = verde) e b^* (coordenada no eixo amarelo-azul; +b = amarelo e -b = azul). Adicionalmente, foram calculados o ângulo de matiz

(Hue angle, h°), indicador da tonalidade da cor, e o croma (Chroma, C^*), parâmetro associado à saturação ou pureza da cor, conforme descrito por Mokrzycki e Tatol (2011).

4.1.1.3 Determinação do perfil de minerais

A determinação do perfil de minerais do coproduto foi realizada no Laboratório de Solos da Embrapa Agroindústria Tropical. Aproximadamente 0,5 g da amostra foi pesada e submetida ao processo de digestão úmida, utilizando-se uma mistura de ácido nítrico e ácido perclórico a 250 °C, seguindo-se a metodologia descrita por Carmo et al. (2000). Após o processo de digestão, o material resultante foi transferido para balões volumétricos de 50 mL, sendo o volume completado com água destilada. As soluções obtidas foram filtradas para remover partículas não dissolvidas, garantindo a pureza do extrato. A quantificação dos minerais fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, sódio, cobre, ferro, manganês e zinco foi realizada utilizando-se a técnica de espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP – OES), em equipamento modelo 5100 da Agilent Technologies (Malásia). Os resultados obtidos foram expressos em miligramas por 100 gramas de amostra ($\text{mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$).

4.1.1.4 Determinação do perfil de aminoácidos

A determinação do perfil dos aminoácidos (ácido aspártico, ácido glutâmico, alanina, arginina, cisteína, fenilalanina, glicina, histidina, isoleucina, leucina, lisina, metionina, prolina, serina, tirosina, treonina e valina) do coproduto foi realizada por hidrólise, utilizando-se soluções de HCl 6 N com fenol por 24 h a 110 °C. Em seguida, as amostras foram secas e derivatizadas com fenilisotilcianato. Os aminoácidos hidrolisados foram separados por cromatografia líquida de alta performance (HPLC) em fase reversa e detectados por luz ultravioleta a 254 nm (HAGEN; FROST; AUGUSTIN, 1989; WHITE; HART; FRY, 1986). O triptofano livre foi quantificado por hidrólise enzimática, sendo as amostras incubadas com pronase durante 24 h a 45 °C em banho-maria e posteriormente centrifugadas a 3000 rpm durante 10 min. O sobrenadante reagiu com a solução de 4-dimetil-amino-benzaldeído e nitrito de sódio. A leitura foi realizada por espectrofotometria a 590 nm (LUCAS; SOTELO, 1980). Os resultados foram expressos em g por 100 g de amostra ($\text{g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$).

4.1.1.5 Caracterização química-estrutural complementar

4.1.1.5.1 Identificação de sólidos solúveis por Ressonância Magnética Nuclear (RMN)

O perfil de metabólitos primários do coproduto foi analisado por ressonância magnética nuclear (RMN) em triplicata, no Laboratório Multiusuário de Química de Produtos Naturais da Embrapa Agroindústria Tropical. Os espectros do perfil de metabólitos primários foram obtidos em espectrômetro (Agilent, modelo DD2 600 MHz, Santa Clara, CA, EUA), equipado com sonda One ProbeTM de 5 mm de diâmetro interno de detecção inversa (¹H–F/¹⁵N–³¹P) e gradiente de campo no eixo z, operando a 298 K, utilizando uma sequência de impulsos com saturação do sinal residual da água.

As amostras foram preparadas homogeneizando-se aproximadamente 15 mg de amostra com 600 µL de D₂O (99,9%) contendo 0,10% de 3-trimetilsililpropionato de sódio (TMSP-d₄) como padrão interno de referência química. Em seguida, as amostras preparadas foram submetidas a 2 min de ultrassom e 2 min de centrifugação. O sobrenadante foi removido e transferido para tubos de RMN de 5 mm.

Os espectros unidimensionais de ¹H-RMN foram adquiridos com tempo de espera (d_i) de 25 s, tempo de aquisição (AQ) de 5,01 s, ganho de 60, 48 transientes, em uma janela espectral de 16 ppm com 32K de número de pontos reais, a 26 °C. A identificação dos constituintes metabólicos presentes na matriz foi realizada por meio de avaliação de RMN bidimensional de correlação de ¹H-¹H (COSY), coerência quântica simples heteronuclear para ¹H-¹³C (HSQC), correlação de ligações múltiplas heteronucleares ¹H-¹³C (HMBC). Para as avaliações foi utilizado um banco de acesso aberto.

A caracterização dos compostos foi realizada de forma abrangente, por meio da análise do perfil metabólico da amostra em modo não alvo, possibilitando uma visão global de sua composição química, com a detecção simultânea de metabólitos de baixo e alto peso molecular presentes na matriz alimentar. A identificação dos compostos baseou-se na interpretação espectroscópica dos sinais obtidos, considerando-se os deslocamentos químicos, a multiplicidade dos sinais e as constantes de acoplamento (J), o que permitiu a caracterização qualitativa das frações lipídica e glicídica do coproduto.

4.1.1.5.2 Avaliação de grupos funcionais por Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A avaliação da estrutura proteica e das interações moleculares do coproduto foi realizada por espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). Para tanto, os espectros de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) foram obtidos em um espectrômetro Spectrum Two (Perkinelmer, Estados Unidos), equipado com acessório de refletância total atenuada (ATR) com cristal de diamante, visando identificar os grupos funcionais e compostos presentes nas massas. Uma pequena porção do pó da amostra foi inserida sobre o cristal do acessório ATR, e os espectros registrados em uma faixa de comprimento de onda de 4.000 a 500 cm^{-1} . Foram realizadas 32 varreduras com resolução de 4 cm^{-1} , à temperatura ambiente ($24\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$). O processamento e a análise dos espectros foram conduzidos utilizando software Origin Pro 2024 (Northampton, EUA).

Para a avaliação da estrutura secundária das proteínas, os espectros foram inicialmente submetidos à correção da linha de base dentro da faixa da banda amida I (1600 – 1700 cm^{-1}). Em seguida, efetuou-se o ajuste de curvas gaussianas com convergência de erro minimizada pelo algoritmo de Levenberg-Marquardt, com base no espectro da segunda derivada, com o objetivo de identificar as posições dos subpicos associados às diferentes conformações da estrutura secundária. A proporção relativa de cada conformação da estrutura secundária da proteína foi determinada a partir da área integrada dos subpicos em relação a área total da banda amida I.

4.1.1.5.3 Avaliação da microestrutura por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) das superfícies do coproduto foi realizada utilizando-se o microscópio eletrônico de varredura com emissão de campo (MEV-FEG, JSM-6701F Scanning Electron Microscope, JEOL, Japão), no Departamento de Engenharia Química e de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina. As amostras foram previamente liofilizadas e cortadas em tamanho 1cm x 1cm. Posteriormente, foram montadas sobre suportes de alumínio e aplicada uma camada de ouro (modelo EM SCD 500/LEICA). A microestrutura das amostras foi analisada por meio da obtenção de imagens em ampliações de 100 \times , 500 \times , 1.000 \times e 2.000 \times , sob tensão de aceleração de 3,0 kV.

4.1.1.6 Determinação dos compostos bioativos e atividade antioxidante total

As análises dos compostos bioativos do coproduto foram realizadas no Laboratório de Pós-colheita da Embrapa Agroindústria Tropical. Os ensaios foram realizados em triplicata seguindo as metodologias descritas a seguir:

4.1.1.6.1 Polifenóis totais

O teor de polifenóis totais foi determinado seguindo-se o método colorimétrico Folin-Ciocalteu de Obanda e Owuor (1997) adaptado por Rufino et al. (2006). Inicialmente, as amostras foram submetidas à extração utilizando-se solução metanólica na proporção de 1g de amostra para metanol, obtendo-se uma concentração de 5 g.mL⁻¹. Para a reação, foram adicionados 0,125 mL do extrato metanólico, 0,5 mL do reagente de Folin–Ciocalteu a 10% (v/v), previamente diluído em água destilada, e 1,0 mL de solução de NaHCO a 7,5% (m/v). A mistura foi homogeneizada e mantida em repouso ao abrigo da luz para o desenvolvimento da cor. A absorbância foi medida em espectrofotômetro a 700 nm.

O ácido gálico foi utilizado como padrão para a construção da curva de calibração (Equação 7), com concentração de ácido gálico calculado segundo Equação 8. Os resultados foram expressos em miligramas de equivalentes de ácido gálico por 100 g de amostra (mg EAG.100 g⁻¹), Equação 9:

$$y = ax + b \text{ (equação da reta)} \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde:

y = absorbância medida da amostra;

a = coeficiente angular da curva;

b = intercepto da curva;

x = concentração de ácido gálico (mg.mL⁻¹).

$$x = \frac{(A - b)}{a} \quad (\text{Eq. 8})$$

Onde:

A = absorbância da amostra;

a = coeficiente angular da curva;

b = intercepto da curva.

$$\text{Polifenóis totais (mgEAG. 100 g}^{-1}\text{)} = \frac{C \times V \times 100}{m} \quad (9)$$

Onde:

C = concentração obtida a partir da curva (mg.mL⁻¹);

V = volume total do extrato (mL);

m = massa da amostra (g).

4.1.1.6.2 Flavonoides

A determinação do teor de flavonoides foi realizada conforme a metodologia proposta por Francis (1982). Inicialmente, para o preparo do extrato, pesou-se 1 g da amostra, ao qual foram adicionados 30 mL de solução etanol-HCl (1,5 M). A mistura foi homogeneizada em agitador mecânico do tipo Turrax por 2 min, a 7.000 rpm. Em seguida, o extrato foi transferido, sem filtração prévia, para um balão volumétrico de 50 mL envolvido com papel alumínio para proteção contra a luz, e o volume foi completado com a solução etanol-HCl (1,5 M). As amostras permaneceram em repouso por aproximadamente 12 h, sob refrigeração. Após esse período, o material foi filtrado em béquer protegido da luz, e a absorbância do extrato foi determinada em espectrofotômetro (Agilent Technologies) a 374 nm. A solução de etanol-HCl (1,5 M) foi utilizada como branco. Todo o procedimento foi conduzido em ambiente com luminosidade reduzida, e os resultados foram calculados conforme a Equação 10:

$$\text{Flavonoides (mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}\text{)} = \frac{A_{374} \times f_d}{76,6} \quad (\text{Eq. 10})$$

Onde:

A_{374} = absorbância medida a 374 nm;

f_d = fator de diluição da amostra;

76,6 = coeficiente de absorção específico (ϵ) para flavonoides, expresso como mg.100 g⁻¹, conforme estabelecido por Francis (1982).

4.1.1.6.3 Atividade antioxidante total

A partir do extrato obtido conforme descrito no item 4.1.1.6.2, foram preparadas três diluições diferentes, utilizando-se alíquotas de 10, 20 e 30 μL do extrato. A capacidade antioxidante foi determinada segundo método do radical $\text{ABTS}\cdot^+$, seguindo-se a metodologia de Re et al. (1999) com adaptações de Rufino et al. (2006).

Em ambiente de baixa luminosidade, as alíquotas do extrato foram diluídas com água destilada de modo a totalizar um volume final de 30 μL , e só então foram transferidas para tubos de ensaio em triplicata. Em seguida, foi adicionado 3,0 mL da solução do radical $\text{ABTS}\cdot^+$, cronometrando-se o tempo de reação. submetendo-se à homogeneização em agitador de tubos (Dlab MX-S). A leitura da absorbância foi realizada em espectrofotômetro (Agilent Technologies – Cary 60) no comprimento de onda de 734 nm, após 6 minutos de reação. O álcool etílico foi utilizado como branco para calibração do equipamento.

A partir das absorbâncias obtidas, os valores foram inseridos na equação da reta correspondente à curva padrão de Trolox[®] (Equação 11), substituindo-se o termo y pelo valor de absorbância equivalente a 1.000 μM de Trolox[®]. O valor calculado para o termo x correspondeu à concentração da amostra ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) com capacidade antioxidante equivalente a 1.000 μM de Trolox[®] (Equação 12). Os resultados foram expressos em capacidade Antioxidante Equivalente ao Trolox[®] (μM de Trolox[®] por 100 g de amostra), seguindo-se a Equação 13.

$$y = ax + b \text{ (Equação da reta)} \quad (\text{Eq. 11})$$

Onde:

y = absorbância correspondente a 1.000 μM de Trolox[®];

a = coeficiente angular da curva;

b = intercepto da curva;

x = concentração de Trolox[®] (μM).

$$x = \frac{(A - b)}{a} \quad (\text{Eq. 12})$$

Onde:

x = concentração da amostra ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) equivalente a 1.000 μM de Trolox[®];

A = absorvância da amostra a 734 nm;

a = coeficiente angular da curva;

b = intercepto da curva.

$$AA_{ABTS}(\mu M Trolox \cdot 100 g^{-1}) = \frac{1.000 \times f_d \times V}{m} \quad (\text{Eq. 13})$$

Onde:

AA_{ABTS} = capacidade antioxidante equivalente ao Trolox[®] (μM Trolox[®].100 g);

x = concentração da amostra ($mg.L^{-1}$) equivalente a 1.000 μM de Trolox[®];

f_d = fator de diluição;

V = volume total do extrato (L);

m = massa da amostra utilizada na extração (g).

4.1.1.7 Avaliação do comportamento de fluxo dos pós

A determinação do comportamento de fluxo do pó do coproduto foi determinada utilizando-se a densidade aparente e compactada, a tensão principal de consolidação, a tensão de deslizamento não confinada, os ângulos de atrito interno e de atrito com a parede. Os ensaios foram realizados utilizando-se o Powder Flow Tester (PFT, Brookfield, Estados Unidos). A amostra foi colocada em uma bandeja circular de aço inoxidável, pesada e transferida para o equipamento. A tampa de palheta foi utilizada para o teste de função de fluxo e a tampa plana para o teste de atrito de parede (LIMA et al., 2022a). Foram aplicadas tensões variadas na superfície do pó variando entre 0 a 13,250 kPa. A capacidade de escoamento dos pós foi quantificada e classificada utilizando-se o índice de compressibilidade (IC), Equação 14, a razão de Hausner (RH) (NETO et al., 2007), Equação 15, e o índice de fluxo (If) de acordo com a classificação de Jenike (LIMA et al., 2022a), Equação 16. O material foi classificado de acordo com sua escoabilidade, conforme descrito no Quadro 2.

$$IC (\%) = \frac{\alpha_c - \alpha_a}{\alpha_c} \times 100 \quad (\text{Eq. 14})$$

$$RH = \frac{\alpha_c}{\alpha_a} \quad (\text{Eq. 15})$$

$$IF = \frac{\sigma_1}{\sigma_c}$$

(Eq. 16)

Onde:

IC = índice de compressibilidade (%);

RH = razão de Hausner;

α_c = densidade compactada (Kg.m^{-3}), que corresponde à maior densidade medida sob a maior pressão de consolidação.

α_a = densidade aparente (Kg.m^{-3});

If = índice de fluxo;

σ_1 : média da tensão principal de consolidação (kPa);

σ_c : média da tensão não confinada de deslizamento (kPa).

Quadro 2 – Classificação do índice de fluxo de pós (ASTM D6128/Jenike) (ASTM, 2016)

Índice de Fluxo (If)	Classificação da Fluidez*	Características do Pó
If < 1	Não escoa (compactado)	O material consolida-se em uma massa sólida rígida; não flui por gravidade.
1 < If < 2	Muito coesivo	Dificuldade extrema de fluxo; requer dispositivos mecânicos ativos para descarga. Tende a formar "pontes" e "rats-holes" (furos de rato).
2 < If < 4	Coesivo	Escoamento difícil; comum em pós finos ou com alguma umidade. O design do silo deve ser específico (mass flow).
4 < If < 10	Fácil escoamento	Flui com relativa facilidade; o material desliza sobre si mesmo sem muita resistência.
If > 10	Livre escoamento (Free-flowing)	Flui livremente como um líquido (ex: areia seca e grossa, grãos inteiros).

*ASTM (2016), modificado.

Fonte: elaborada pela autora.

4.1.1.8 Determinação das propriedades tecnofuncionais

Os ensaios para determinação das propriedades tecnofuncionais do coproduto foram realizados em triplicata no Laboratório de Análises de Alimentos da Embrapa

Agroindústria Tropical, de acordo com as metodologias descritas a seguir.

4.1.1.8.1 Densidade aparente

A densidade aparente do coproduto foi determinada seguindo-se a metodologia descrita por Okezie e Bello (1988). Inicialmente, 2 g da amostra foram pesadas e transferidos para uma proveta graduada de 10 mL previamente tarada. Posteriormente, a proveta foi submetida a 10 batidas leves na sua base, a fim de promover o assentamento do material, até que não fosse observada redução adicional do volume ocupado pela amostra. O volume final foi registrado e a densidade aparente (g.mL^{-1}) foi determinada pela razão entre a massa da amostra e o volume ocupado após o assentamento (Equação 17). Os ensaios foram realizados em triplicata e expressos em g.mL^{-1} .

$$\text{Densidade aparente } (\text{g.mL}^{-1}) = \frac{m}{V} \quad (\text{Eq. 17})$$

Onde:

m = massa da amostra (g);

V = volume final ocupado pela amostra após o assentamento (mL).

4.1.1.8.2 Solubilidade em água

A solubilidade em água do coproduto foi determinada de acordo com a metodologia proposta por Kusumayanti; Handayani e Santosa (2015). Inicialmente, pesou-se 0,50 g da amostra de massa fresca e a ela foi adicionado 10 mL de água destilada previamente aquecida. A suspensão foi mantida a 60 °C em banho-maria durante 30 min, com agitação ocasional, a fim de favorecer a solubilização dos componentes hidrossolúveis. Após esse período, as amostras foram centrifugadas (Hettich – EBA 12 R) a 1600 rpm por 10 min. Uma alíquota de 5 mL do sobrenadante foi retirada, colocada em uma cápsula previamente tarada e levada para secar em estufa de circulação de ar forçada (Quimis, modelo Q317M-23) por 3 h a 130 °C e posteriormente pesada. A solubilidade em água foi determinada segundo a Equação 18, e os resultados expressos em porcentagem (g.100 g^{-1}).

$$\text{Solubilidade } (\text{g.100 g}^{-1}) = \frac{M_s}{M_f} \times 2 \times 100$$

(Eq. 18)

Onde:

Solubilidade = solubilidade do coproduto em água ($\text{g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$);

Ms = massa do sobrenadante seco (g);

Mf = massa inicial da farinha (g).

4.1.1.8.3 Capacidade de absorção de água e óleo

A determinação da capacidade de absorção de água e a capacidade de absorção de óleo (óleo de soja marca comercial Soya) do coproduto foram determinadas seguindo a metodologia adaptada de Chinma, Adewuyi e Abu (2009). Inicialmente pesou-se 1 g de cada amostra em tubos Falcon, previamente tarados. Em seguida, foram adicionados 20 mL de água ou óleo (de acordo com a análise). A mistura foi homogeneizada por 1 minuto com auxílio de um agitador de tubos e deixada em temperatura ambiente ($25 \pm 2^\circ \text{C}$) por 30 min em repouso. Em seguida, foi centrifugada (Hettich – EBA 12 R) a 2.600 rpm por 30 min a 25°C . Após a centrifugação, os tubos foram invertidos durante 1 hora para remover o líquido (água ou óleo) que não foi retido. Após a remoção do líquido, os tubos foram pesados e a variação de massa inicial e final foi utilizada como medida da absorção e expressa como a quantidade de água/óleo (g) absorvido por g de amostra, de acordo com a Equação 19.

$$CAA \text{ ou } CAO \text{ (g} \cdot \text{g}^{-1}\text{)} = \frac{(M_f - M_t - M_0)}{M_0} \quad (\text{Eq. 19})$$

Onde:

CAA = capacidade de absorção de água ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$);

CAO = capacidade de absorção de óleo ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$);

Mf = massa (g) do microtubo com precipitado final, após o descarte do sobrenadante de água ou óleo (g);

Mt = massa do microtubo (g);

M0 = massa inicial da amostra (g).

4.1.1.8.4 Poder de intumescimento

Inicialmente, 0,10 g do coproduto foi pesada e homogeneizada com 10 mL de

água destilada. A suspensão foi aquecida a 90 °C por 1 h, sob agitação constante, visando promover a hidratação e o intumescimento dos constituintes da amostra. Após o aquecimento, a mistura foi rapidamente resfriada em banho de gelo até atingir aproximadamente 25 °C, interrompendo o processo de intumescimento.

Em seguida, as amostras foram centrifugadas (Hettich – EBA 12 R) a 1600 rpm por 30 min, o sobrenadante foi recolhido e descartado e os sedimentos resultantes foram pesados. O poder de intumescimento foi calculado de acordo com a Equação 20 e expresso em gramas de sedimento por grama de amostra ($g \cdot g^{-1}$), de acordo com Kusumayanti, Handayani e Santosa (2015).

$$SP (g \cdot g^{-1}) = \frac{M_s}{M_i} \quad (\text{Eq. 20})$$

Onde:

SP = poder de intumescimento da farinha ($g \cdot g^{-1}$);

M_s = corresponde a massa de sedimento após a centrifugação (g);

M_i = massa inicial da farinha (g).

4.2 Elaboração das massas frescas alimentícias sem glúten à base do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju

O coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa da castanha de caju (ACC), obtido conforme descrito no item 4.1, foi utilizado como ingrediente base nas formulações de massas alimentícias frescas sem glúten. Para conferir estrutura, consistência e textura às massas, foram utilizados os seguintes ingredientes: farinha de arroz (marca comercial Tio Urbano), polvilho azedo (marca comercial Amafil), goma xantana de uso alimentício (marca comercial Bell Nutry) e água mineral, todos adquiridos no comércio local de Fortaleza–CE.

Foram desenvolvidas três formulações de massas alimentícias frescas sem glúten, com substituição total da farinha de trigo pelo coproduto-ACC. Testes preliminares foram realizados para ajuste das proporções de coproduto e demais ingredientes, baseados em Oliveira, Souza e Polesi (2020), que trabalharam com matérias-primas derivadas de oleaginosas. As formulações apresentaram 40% coproduto-ACC, farinha de arroz (0 – 10%), polvilho azedo (0 – 10%), goma xantana (0,4%) e água mineral (49,6%), conforme

apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição das formulações de massas alimentícias elaboradas com coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju

Ingredientes (%)	Formulação 1	Formulação 2	Formulação 3
Coproduto*	40,0	40,0	40,0
Farinha de arroz	10,0	5,0	0,0
Polvilho azedo	0,0	5,0	10,0
Goma xantana alimentícia	0,4	0,4	0,4
Água mineral	49,6	49,6	49,6

*Coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju
Fonte: elaborada pela autora.

Em seguida, os ingredientes secos (coproduto, farinha de arroz, polvilho azedo e goma xantana) foram misturados manualmente em recipiente tipo tigela por 5 min com auxílio de espátula. Posteriormente, adicionou-se água mineral à temperatura ambiente (23 °C) e a massa foi homogeneizada por aproximadamente 10 min, até atingir consistência uniforme e não aderente às mãos.

Para obtenção de textura mais uniforme e lisa, as massas foram laminadas em cilindro manual. Cada porção foi sucessivamente introduzida entre os rolos, dobrada e novamente laminada, repetindo-se o procedimento seis vezes, até a obtenção de estrutura coesa. Após a laminação, as massas foram moldadas em formato tipo talharim, com 2 mm de espessura e 30 cm de comprimento (Figura 10). As tiras foram divididas em porções de peso uniforme, acondicionadas em sacos plásticos hermeticamente fechados e armazenadas entre 8 ± 2 °C até as análises de caracterização.

Figura 10 – Aspecto das massas alimentícias frescas sem glúten elaboradas com coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju



Formulação 1: (40% coproduto + 10% farinha de arroz + 0% polvilho azedo); Formulação 2: (40% coproduto + 5% farinha de arroz + 5% polvilho azedo); Formulação 3: (40% coproduto + 0% farinha de arroz + 10% polvilho azedo).

Fonte: elaborada pela autora.

4.2.1 Caracterização das massas frescas alimentícias

As formulações de massa alimentícia foram caracterizadas quanto à composição centesimal e valor energético, propriedades físico-químicas, caracterização microestrutural, propriedades tecnofuncionais, qualidade de cocção, cor, comportamento reológico e as características de textura, com o propósito de avaliar o efeito da incorporação do coproduto e da proporção de farinha de arroz e polvilho azedo nos parâmetros tecnológicos do produto final.

Adicionalmente, as massas foram avaliadas quanto à qualidade microbiológica com o intuito de verificar a conformidade com os critérios estabelecidos pela legislação sanitária vigente de forma a assegurar sua adequação do ponto de vista higiênico-sanitário. Paralelamente, realizou-se uma avaliação sensorial de natureza qualitativa, por meio de grupo focal, a fim de investigar a percepção quanto às características sensoriais, tecnológicas e à aplicabilidade culinária.

4.2.1.1 Composição centesimal e valor energético

A composição centesimal das massas alimentícias (umidade, lipídios, proteínas, cinzas e carboidratos por diferença), bem como o valor energético foi determinada conforme os procedimentos descritos nos itens 4.1.1.1.1 a 4.1.1.1.5 e 4.1.1.1.7, respectivamente.

4.2.1.2 Caracterização físico-química

A caracterização físico-química das massas alimentícias foi realizada por meio da determinação de pH, acidez total titulável e atividade de água (A_w), conforme descrito nos itens 4.1.1.2.1, 4.1.1.2.2 e 4.1.1.2.3, respectivamente.

4.2.1.3 Perfil de minerais

A determinação do perfil de minerais das massas alimentícias foi realizada conforme descrito no item 4.1.1.3, utilizando as mesmas condições analíticas aplicadas ao coproduto, permitindo a avaliação do impacto da incorporação do coproduto sobre o conteúdo mineral das formulações de massas alimentícias.

4.2.1.4 Caracterização química-estrutural e microestrutural

A caracterização estrutural complementar das massas alimentícias foi realizada por FTIR, visando identificar grupos funcionais e investigar possíveis alterações associadas à incorporação do coproduto e da variação das proporções de farinha de arroz e polvilho azedo, conforme descrito no item 4.1.1.5.2. A avaliação microestrutural foi conduzida por microscopia eletrônica de varredura (MEV), conforme o item 4.1.1.5.3, com o propósito de observar a organização da matriz e a distribuição dos constituintes nas amostras.

4.2.1.5 Determinação dos compostos bioativos e atividade antioxidante

O teor de polifenóis totais, flavonoides e a atividade antioxidante total ($ABTS^{\bullet+}$) das massas alimentícias frescas sem glúten, em sua forma crua, foram determinados conforme as metodologias descritas no item 4.1.1.6 e respectivos subitens, empregando os mesmos procedimentos analíticos adotados para o coproduto do concentrado proteico de ACC.

4.2.1.6 Determinação das propriedades tecnofuncionais das farinhas das massas

Os ensaios para determinar as propriedades tecnofuncionais (densidade aparente, solubilidade em água, capacidade de absorção de água e óleo, e poder de intumescimento) das massas alimentícias foram determinadas conforme os procedimentos descritos nos itens

4.1.1.8.1 a 4.1.1.8.4, respectivamente.

4.2.1.7 Determinação da qualidade de cocção

A qualidade de cocção das massas alimentícias foi avaliada em triplicata no Laboratório de Análise de Alimentos da Embrapa Agroindústria Tropical, de acordo com o método 66-50 da American Association of Cereal Chemists (AACC, 2011). As amostras foram submetidas aos ensaios para determinação dos seguintes parâmetros tecnológicos: tempo de cocção ótimo (TCO, min), aumento de peso ou absorção de água ($g \cdot 100 g^{-1}$), aumento de volume ou índice de inchaço ($g \cdot 100 g^{-1}$) e perda de massa durante a cocção ($g \cdot 100 g^{-1}$), conforme as metodologias descritas a seguir.

4.2.1.7.1.1 Determinação do tempo de cocção ótimo (TCO)

O tempo de cocção ótimo (TCO) das massas alimentícias foi determinado conforme o método 66-50 da American Association of Cereal Chemists (AACC, 2011) e definido como o tempo necessário para o desaparecimento do centro branco e da cor do núcleo do amido não gelatinizado nos fios da massa. Para tanto, foram adicionados 300 mL de água destilada em ebulição em 25 g de massa. A cada minuto, 1 g da amostra foi retirada e comprimida entre duas lâminas de vidro para avaliação visual.

4.2.1.7.1.2 Aumento de peso ou absorção de água

A absorção de água das massas alimentícias foi calculada com base na diferença entre o peso da amostra antes e após o cozimento, de acordo com a Equação 21, segundo método 66-50 da AACC (2011).

$$AP (g \cdot 100 g^{-1}) = \frac{P_2 - P_1}{P_1} \times 100 \quad (\text{Eq. 21})$$

Onde:

AP = Aumento de peso ou absorção de água das massas ($g \cdot 100 g^{-1}$);

P_1 = Peso da massa crua (g);

P_2 = Peso da massa cozida.

4.2.1.7.1.3 Aumento de volume ou índice de inchaço

O índice de inchaço das massas alimentícias foi determinado com o objetivo de quantificar a quantidade de água absorvida por unidade de massa seca, refletindo o aumento volumétrico das massas após o cozimento. A análise seguiu o método 66-50 da AACCC (2011), no qual a massa cozida foi submetida à secagem em estufa de circulação de ar forçada (Quimis, modelo Q317M-23) a 105 °C até atingir peso constante. O índice de inchaço foi calculado de acordo com Equação 22, expressa como a razão entre a diferença do peso da massa cozida e da massa seca pelo peso da massa seca, por 100 g de amostra.

$$AV (g.100 g^{-1}) = \frac{P_2 - P_3}{P_3} \times 100 \quad (\text{Eq. 22})$$

Onde:

AV = Aumento de volume ou índice de inchaço das massas ($g.100 g^{-1}$);

P_2 = peso da massa cozida (g);

P_3 = peso da massa seca (g).

4.2.1.7.1.4 Perda de massa na cocção

A análise de perda de massa durante a cocção foi realizada segundo método 66-50 da AACCC (2011), por meio da coleta da água de cocção em um béquer previamente tarado. Em seguida, o material foi submetido a secagem em estufa de circulação de ar forçada (Quimis, modelo Q317M-23) a 105 °C até atingir peso constante, permitindo a quantificação dos sólidos perdidos durante o cozimento. O valor da perda de massa foi determinado conforme a Equação 23:

$$PMC (g.100 g^{-1}) = \frac{P_f}{P_i} \times 100 \quad (\text{Eq. 23})$$

Onde:

PMC = perda de massa no cozimento ($g.100 g^{-1}$);

P_f = peso final dos sólidos após secagem (g);

P_i = peso inicial da amostra (g).

4.2.1.8 Determinação da cor por método instrumental

A cor das massas alimentícias frescas, em suas formas cruas e cozidas, foi determinada com base no sistema CIELab* (L^* , a^* e b^*), com cálculo de h° e C^* , conforme descrito no item 4.1.1.2.4.

4.2.1.9 Perfil reológico das massas

Os ensaios reológicos das massas alimentícias frescas e cozidas foram realizados em reômetro rotacional (Thermo Scientific™ – HAAKE™ MARS), equipado com geometria de placas paralelas de 35 mm de diâmetro (P35 Ti L) e espaçamento fixo de 2 mm. O controle de temperatura foi assegurado por um sistema Peltier, mantido constante a 25 °C ao longo das análises.

Inicialmente, foi realizada uma varredura de frequência na faixa de 0,1 a 100 Hz, sob tensão controlada de 100 Pa, com o objetivo de avaliar o comportamento viscoelástico das massas. Adicionalmente, conduziu-se um ensaio oscilatório de varredura no tempo, mantendo-se tensão e frequência constantes (100 Pa e 1 Hz) por um período de 180 s, visando avaliar a estabilidade estrutural do sistema ao longo do tempo.

Todos os ensaios foram conduzidos na região de viscoelasticidade linear (LVR), previamente determinada, e realizados em triplicata.

4.2.1.10 Determinação da textura por método instrumental

A determinação do perfil de textura das massas alimentícias (frescas e cozidas) foi realizada no Laboratório de Biomassa da Embrapa Agroindústria Tropical, de acordo com a metodologia proposta por Chen e Opara (2013). As análises foram conduzidas em texturômetro TA-XT2i (Stable Micro Systems), acoplado a um sistema de aquisição de dados.

Cada amostra foi constituída por 25 g de fios de massa, dispostos em um béquer de 50 mL e posicionados na plataforma do equipamento. Foram aplicados dois ciclos de compressão às amostras, até atingir 80% de deformação, simulando condições de mastigação. As condições operacionais adotadas foram: velocidade pré-teste de $1,0 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, velocidade de teste de $1,0 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ e velocidade pós-teste de $3,0 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Utilizou-se uma sonda cilíndrica de plástico com diâmetro de 12,7 mm (P/0,5 R).

Para cada formulação, foram realizadas 10 repetições, à temperatura ambiente

(24 °C). Nas massas cruas, foi determinado o parâmetro de dureza, enquanto, nas massas cozidas, foram avaliados os parâmetros de dureza, elasticidade, coesividade e mastigabilidade, permitindo a caracterização do comportamento textural em diferentes estados do produto.

4.2.1.11 Avaliação microbiológica

As massas alimentícias cozidas, foram avaliadas no Laboratório de Microbiologia da Embrapa Agroindústria Tropical quanto à qualidade microbiológica. As análises contemplaram a determinação de *Escherichia coli*, expressa em Número Mais Provável (NMP·g⁻¹) (FENG et al., 2020), *Staphylococcus aureus* coagulase positiva, expressa em Unidade Formadora de Colônias (UFC·g⁻¹) (TALLENT et al., 2016), a contagem de bolores e leveduras (UFC·g⁻¹) e a verificação da presença de *Salmonella* spp. em 25 g de amostra (ANDREWS et al., 2023), conforme os procedimentos descritos no Bacteriological Analytical Manual (BAM).

A seleção dos microrganismos analisados seguiu os critérios estabelecidos pela Instrução Normativa nº 161, de 1º de julho de 2022, item 19, alínea “c” (BRASIL, 2022), que define os padrões microbiológicos aplicáveis a cereais, farinhas, massas alimentícias e produtos de panificação.

4.2.1.12 Avaliação sensorial

A análise sensorial foi realizada no Laboratório de Análise de Alimentos da Embrapa Agroindústria Tropical – CE utilizando-se o método de Grupo Focal, com abordagem qualitativa e exploratória. O objetivo foi compreender as percepções sensoriais de três formulações de massas alimentícias frescas sem glúten elaboradas à base do coproduto gerado do processo de concentração de proteínas da amêndoa de castanha de caju, além de avaliar o seu potencial de aplicação gastronômica.

A sessão foi conduzida por um moderador treinado, seguindo-se um roteiro semiestruturado (Apêndice A), e contou com 10 participantes com experiências nas áreas de gastronomia e em testes de análise sensorial. Antes do início, todos assinaram o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE) – (Anexo A). Os testes do estudo foram previamente aprovados pelo Comitê de Ética – COÉTICA da Universidade de Fortaleza – UNIFOR, sob parecer número 6.666.316 (Anexo B).

Inicialmente, as massas cruas, apresentadas em placas de Petri codificadas, foram

avaliadas quanto a aparência geral (cor, firmeza, elasticidade e pegajosidade). Na sequência, foi avaliado o aroma, descrevendo as notas percebidas, sua associação a ingredientes e aceitabilidade do ponto de vista gastronômico. Posteriormente, as massas cozidas (respeitando o tempo de cocção previamente determinado) foram servidas em recipientes de vidros codificados e fechados. Água mineral foi disponibilizada para limpeza do palato entre as provas.

Os participantes avaliaram as massas cozidas em termos de sabor e parâmetros de textura. Também foi investigado o potencial de aplicação gastronômica, considerando tipos de preparações, uso de molhos e formas de consumo. Ao término, foi realizada uma avaliação crítica sobre os principais pontos fortes do produto, aspectos sensoriais que precisam ser melhorados e o potencial de mercado do ponto de vista gastronômico. A discussão foi gravada em áudio, mediante consentimento prévio dos participantes.

4.3 Análises Estatística

A análise estatística foi realizada utilizando o software Statistica versão 10.0 (StatSoft Inc., EUA). Os dados referentes à composição centesimal, propriedades físico-químicas, perfil de minerais, compostos bioativos, atividade antioxidante, cor instrumental e propriedades tecnofuncionais do coproduto foram expressos por meio de média e desvio padrão.

Para a caracterização das formulações das massas alimentícias frescas sem glúten, incluindo composição centesimal, propriedades físico-químicas, perfil de minerais, compostos bioativos, atividade antioxidante, cor, propriedades tecnofuncionais e qualidade de cocção, os dados foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA), seguida do cálculo da média e do desvio padrão. Quando observadas diferenças estatisticamente significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, adotando-se nível de significância de $p < 0,05$.

Já para a análise do perfil de textura (TPA), realizada exclusivamente nas massas alimentícias, foi adotado nível de significância de $p < 0,10$, com o objetivo de identificar tendências nas propriedades de textura das formulações.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização nutricional, físico-química, estrutural, funcional e tecnológica do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju

5.1.1 Composição nutricional e caracterização físico-química

Os resultados da composição centesimal em base úmida e da caracterização físico-química do coproduto encontram-se na Tabela 2.

Os resultados foram interpretados considerando o histórico tecnológico do produto, uma vez que o coproduto não é uma farinha convencional, mas uma fração retida resultante de etapas de solubilização proteica em meio alcalino e precipitação isoelétrica ao longo do processo de obtenção do concentrado proteico conforme descrito por do Carmo et al. (2025), sendo posteriormente submetida a etapas sucessivas de diluição, ajustes de pH e secagem.

O baixo teor de umidade ($4,53 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$), observado no coproduto é compatível com valores relatados para tortas, farinhas e frações residuais de ACC submetidas a processos de extração e secagem (LIU et al., 2018; LIMA et al., 2021; CARMO, 2024), indicando um aspecto tecnologicamente favorável, uma vez que contribui para estabilidade microbiológica.

O coproduto apresentou valores de cinzas em torno de $4,59 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$, indicando a manutenção significativa de minerais após as etapas de remoção parcial de proteínas solúveis e lipídios durante o processamento dos concentrados proteicos de ACC. Estes resultados corroboram com os estudos de Lima, Pinto e Magalhães (2018), Liu et al. (2018), Lima et al. (2022b), Lima et al. (2023), Carmo (2024) e Carmo et al. (2025), que evidenciaram a preservação de minerais mesmo após processamento da torta e concentrados proteicos de ACC.

O conteúdo de proteína bruta do coproduto ($25,01 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$), embora inferior ao de concentrados proteicos de castanha de caju reportados por Lima et al. (2022b), que obteve 56,1 a $58,3 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ de proteína em precipitação na faixa de pH 3,0-4,5, e por Carmo et al. (2025), em que concentrados proteicos alcançaram valores de proteína entre $59,4 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ e $85,5 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$, dependendo do método utilizado para desengorduramento da matéria-prima. Isso indica que mesmo após todos os tratamentos, uma porção expressiva de proteína ainda permanece na matriz residual. Isso é esperado, visto que as etapas de extração proteica

solubilizam preferencialmente frações proteicas mais facilmente extraíveis, enquanto proteínas estruturais ou mais agregadas tendem a permanecer no coproduto mesmo após extração do concentrado.

Tabela 2 – Composição nutricional e caracterização físico-química do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju

Parâmetros	Coproduto¹
<i>Composição centesimal e valor nutricional²</i>	
Umidade (g.100 g ⁻¹)	4,53 ± 0,12
Cinzas (g.100 g ⁻¹)	4,59 ± 0,05
Proteína (g.100 g ⁻¹)	25,01 ± 0,45
Lipídios (g.100 g ⁻¹)	10,40 ± 0,15
Carboidratos Totais (g.100 g ⁻¹)	27,79 ± 0,02
Fibra Dietética Alimentar Total – FDT (g.100 g ⁻¹)	27,68 ± 0,53
Fibra Dietética Alimentar Solúvel – FDS (g.100 g ⁻¹)	1,78 ± 0,59
Fibra Dietética Alimentar Insolúvel – FDI (g.100 g ⁻¹)	25,90 ± 0,61
Valor energético (kcal.100 g ⁻¹) ³	304,8 ± 2,60
<i>Propriedades físico-químicas²</i>	
pH	7,36 ± 0,12
Acidez total titulável em ácido málico (g.100 g ⁻¹)	0,18 ± 0,01
Atividade de água (Aw)	0,23 ± 0,01
<i>Cor Instrumental^{2,4}</i>	
L*	77,34 ± 0,15
a*	1,04 ± 0,02
b*	9,54 ± 0,02
C*	9,59 ± 0,02
Hue (h°)	83,74 ± 0,12

¹ Coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju.

² Resultados expressos como média ± desvio padrão de determinações em quintuplicata.

³ Valor energético estimado por cálculo indireto, utilizando os fatores de conversão de Atwater.

⁴ Parâmetros de cor instrumental: L* – luminosidade (0 = preto e 100 = branco); a* – eixo vermelho-verde (+a* = vermelho e -a* = verde); b* – eixo amarelo-azul (+b* = amarelo e -b* = azul); ângulo Hue (h°) – tonalidade da cor; C* – croma ou saturação da cor.

Fonte: elaborada pela autora.

A permanência desse teor proteico residual corrobora com a presença de proteínas de menor solubilidade em água e alta estabilidade estrutural descritas por Liu et al. (2018) para em frações proteicas de glutenina (23,19 g.100 g⁻¹) em castanha de caju, reforçando que o coproduto não é meramente resíduo, mas sim um ingrediente nutricionalmente relevante de alto valor nutricional e com potencial funcional para aplicação em produtos alimentícios sem glúten.

Quanto ao teor de lipídios, o coproduto, apesar de ser um produto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos de torta de ACC desengordurada via extração aquosa, ainda apresenta conteúdo de lipídios residual significativo (10,40 g.100 g⁻¹, Tabela 2). Esse valor é comparável ao teor de lipídios relatado para o concentrado proteico obtido pelo mesmo método (CARMO et al. 2025), que encontrou valores de 14,13 g.100 g⁻¹, indicando que a extração aquosa promove redução, mas não eliminação completa, da fração lipídica originalmente presente na matriz da amêndoa e nem do concentrado de ACC.

A fração de carboidratos totais (27,79 g.100 g⁻¹), associada ao elevado teor de fibra dietética total (27,68 g.100 g⁻¹), com predominância da fração insolúvel (25,90 g.100 g⁻¹), reflete a concentração dos componentes estruturais na matriz residual após a remoção parcial das proteínas solúveis e alguns componentes lipídicos. Esse padrão é coerente com os apresentados na literatura sobre coprodutos de extração proteica vegetal, na qual a fibra tende a permanecer no resíduo por sua baixa solubilidade em condições de pH utilizadas na extração alcalina (LIMA; PINTO; MAGALHÃES, 2018).

No que se refere às propriedades físico-químicas (Tabela 2), o coproduto apresentou pH levemente alcalino (7,36), refletindo a influência direta das condições de solubilização proteica em meio alcalino empregadas na obtenção do concentrado, conforme descrito por Lima, Pinto e Magalhães (2018). Resultados semelhantes foram observados para tortas e concentrados proteicos de ACC, nos quais o pH residual permanece elevado mesmo após etapas de neutralização parcial para solubilidade máxima de proteínas em pH \geq 8 conforme relatado por Carmo et al. (2025). A baixa acidez total titulável (0,18 g. de ácido málico por 100 g de amostra) corrobora esse perfil e indica reduzida presença de ácidos orgânicos livres no coproduto. Por fim, a atividade de água (A_w) de 0,23 do coproduto é considerada significativamente baixa, indicando ser um material de elevada estabilidade do ponto de vista microbiológico e favorecendo sua aplicação em formulações alimentícias secas, bem como sua incorporação em receitas, sem comprometer a vida de prateleira dos produtos (LIMA; PINTO; MAGALHÃES, 2018).

A análise colorimétrica do coproduto revela um ingrediente com características

visuais altamente favoráveis à aplicação industrial. Com uma luminosidade (L^*) de 77,34, o material classifica-se como claro, superando os valores reportados por Lima et al. (2021) para a amêndoa integral. Este aumento no brilho sugere que o processo de concentração proteica e as etapas de lavagem removeram pigmentos solúveis e compostos fenólicos, resultando em um pó de cor mais neutra. As coordenadas cromáticas ($a^* = 1,04$; $b^* = 9,54$) e o ângulo Hue ($83,74^\circ$) indicam uma tonalidade predominantemente amarela clara – creme, com uma contribuição avermelhada quase imperceptível. A baixa saturação ($C^* = 9,59$) reforça a palidez da amostra, o que é tecnologicamente estratégico. Segundo Carmo et al. (2025), ingredientes com este perfil — alta luminosidade e baixo croma — possuem elevado potencial de aplicação, pois não conferem o aspecto "escuro" ou "residual" frequentemente associado a subprodutos vegetais.

Comparativamente, a torta de amêndoa obtida por extração com hexano estudada por Carmo (2024) apresentou luminosidade ainda superior ($L^* > 90$) e neutralidade absoluta de vermelho ($a^* = 0$), tendendo ao branco. De acordo com Liu et al. (2018), a preservação dessa cor clara indica que o processamento brando evitou reações de escurecimento não enzimático (Maillard). Assim, o coproduto demonstra viabilidade para substituir parcialmente a farinha de trigo ou sêmola sem alterar drasticamente a identidade visual do produto final, e consequentemente sua aceitação sensorial.

5.1.2 Perfil de minerais

O perfil mineral do coproduto (Tabela 3) evidencia uma composição rica em macro (cálcio, fósforo, magnésio, potássio e sódio,) e microminerais essenciais (cobre, ferro, manganês e zinco) (Tabela 3), refletindo a preservação da fração mineral durante as etapas de extração aquosa de óleo, solubilização proteica alcalina e precipitação isoelétrica. Esse comportamento é consistente com valores reportados para tortas de ACC desengorduradas por rotas aquosas, em que Carmo et al. (2024) demonstram que as frações minerais da torta de ACC, mesmo após as etapas de solubilização para remoção de lipídios, permanecem majoritariamente associados à matriz sólida. Entre os macroelementos avaliados no coproduto, fósforo ($990 \text{ mg} \cdot 100^{-1} \text{ g}$), potássio ($746 \text{ mg} \cdot 100^{-1} \text{ g}$) e magnésio ($584 \text{ mg} \cdot 100^{-1} \text{ g}$), destacaram-se como os mais abundantes, indicando seu elevado potencial nutricional.

Tabela 3 – Perfil mineral do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju

Minerais (mg.100⁻¹)**	Coproduto*
Cálcio	92,00 ± 3,00
Cobre	2,26 ± 0,11
Enxofre	334,66 ± 1,52
Ferro	19,80 ± 0,60
Fósforo	990,00 ± 9,16
Magnésio	584,00 ± 4,35
Manganês	3,96 ± 0,05
Potássio	745,66 ± 7,63
Sódio	150,33 ± 1,52
Zinco	14,16 ± 0,25

* Coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju.

**Resultados expressos como média ± desvio padrão de determinações em triplicata.

Fonte: elaborada pela autora.

Ao comparar estes resultados com a literatura, observa-se que o processo de obtenção do coproduto tende a concentrar esses minerais em relação à amêndoa de caju *in natura*. Rico, Bulló e Salas-Salvadó (2016), ao analisarem amêndoas de castanha de caju de diversas origens geográficas (incluindo Brasil, Índia e Costa do Marfim), reportaram valores médios inferiores para estes minerais na matéria-prima crua: 502,5 mg.100⁻¹ g para fósforo, 622,5 mg.100⁻¹ g para potássio e 248,8 mg.100⁻¹ g para magnésio. O teor de magnésio encontrado no presente coproduto (584 mg.100⁻¹ g) é mais que o dobro do reportado para a amêndoa crua, evidenciando o efeito de concentração decorrente da remoção da fração lipídica.

Resultados semelhantes de enriquecimento mineral em subprodutos desengordurados foram observados por Carmo (2024). Ao avaliar tortas de ACC obtidas por diferentes métodos de extração, a autora encontrou variações de 652,33 a 906,33 mg.100⁻¹ g para fósforo; 890,00 a 1258,33 mg.100⁻¹ g para potássio; e 339,67 a 487,33 mg.100⁻¹ para magnésio. Nota-se que o teor de fósforo e magnésio do coproduto deste estudo supera até mesmo os valores máximos encontrados por Carmo na torta obtida por extração com hexano (TPHS), indicando que o método de extração aquosa pode favorecer a preservação desses

minerais quando comparado à extração por solvente orgânico. Esses resultados reforçam que processos menos agressivos tendem a manter minerais associados à matriz sólida vegetal, contribuindo para um perfil nutricional mais denso do coproduto.

Por outro lado, Emelike, Barber e Ebere (2015) reportaram valores consideravelmente mais baixos para farinhas de castanha de caju desengorduradas, com apenas 24,7 mg.100⁻¹ g de fósforo, 52,0 mg.100⁻¹ g de potássio e 220 mg.100⁻¹ g de magnésio. Essa discrepância acentuada reforça que a composição mineral final dos coprodutos é fortemente influenciada não apenas pela origem da matéria-prima, mas principalmente pelas condições de processamento e métodos de extração empregados.

Ao comparar os macronutrientes do coproduto com concentrados proteicos de outras matrizes vegetais, como arroz, grão de bico, lentilha e soja, as vantagens nutricionais tornam-se ainda mais evidentes. O valor de 584 mg.100⁻¹ g de magnésio no coproduto é superior aos concentrados comerciais de soja (80–97 mg.100⁻¹ g), ervilha (43–71 mg.100⁻¹ g) e arroz (18–33 mg.100⁻¹ g), reportados por López-Calabozo et al. (2025). Mesmo comparado a farinhas de leguminosas como lentilha e grão-de-bico obtidas por fracionamento a seco (DE ANGELIS *et al.*, 2021), que variam entre 120 e 160 mg.100⁻¹ g de magnésio, o coproduto apresenta uma densidade quase quatro vezes maior para esse mineral.

O teor de fósforo (990 mg.100⁻¹ g) do coproduto supera os concentrados de soja (~817 mg.100⁻¹ g) e ervilha (~808 mg.100⁻¹ g) reportados por López-Calabozo et al. (2025), consolidando o fósforo como o mineral predominante, padrão também observado por Karr-Lilienthal et al. (2004) para concentrados de soja. Já para o potássio (745,66 mg.100⁻¹ g), o coproduto apresenta níveis significativamente superiores aos concentrados de arroz (4–8 mg.100⁻¹ g) e ervilha (44–122 mg.100⁻¹ g) citados por López-Calabozo et al. (2025).

Os microminerais são componentes críticos para a funcionalidade biológica (RAZZAQUE; WIMALAWANSA, 2025). Quando analisado o perfil de microminerais do coproduto, evidenciou-se que processo de beneficiamento para a obtenção do concentrado proteico não apenas preservou, mas promoveu um efeito de concentração desses elementos essenciais em relação à amêndoa original.

Os teores de ferro (19,80 mg.100⁻¹ g) e zinco (14,16 mg.100⁻¹ g), no coproduto são superiores aos encontrados na amêndoa de caju crua. Rico, Bulló e Salas-Salvadó (2016), ao caracterizarem amêndoas de diversas origens, reportaram valores médios de ferro em torno de 5,0 a 6,0 mg.100⁻¹ g e zinco próximos a 5,4 mg.100⁻¹ g. Isso demonstra que o coproduto deste estudo possui quase quatro vezes mais ferro e três vezes mais zinco que a amêndoa *in natura*. Ao comparar com a torta de ACC, os dados mostram-se superiores aos reportados por

Carmo (2024), que encontrou teores de ferro variando entre 11,5 mg.100⁻¹ e 15,8 mg.100⁻¹ g nas tortas obtidas por rota aquosa e por solvente, respectivamente. Esse enriquecimento adicional sugere que, durante a solubilização alcalina e posterior precipitação para remoção das proteínas do concentrado, esses minerais permaneceram fortemente retidos na matriz sólida do coproduto, possivelmente associados a compostos fenólicos ou à fração fibrosa remanescente.

O conteúdo de manganês (3,96 mg.100⁻¹ g) no coproduto situa-se dentro da faixa esperada para derivados de caju processados por via úmida. Carmo (2024) observou valores entre 2,5 e 4,5 mg.100⁻¹ g em tortas de ACC, indicando estabilidade deste mineral no processamento. Entretanto, este valor é superior ao reportado por Emelike, Barber e Ebere (2015) para farinha desengordurada de caju (2,9 mg.100⁻¹ g), reforçando a eficiência do método empregado na retenção de nutrientes. Já o cobre (2,26 mg.100⁻¹ g), o valor é consistente com o da amêndoa crua (~2,0 mg.100⁻¹ g), (RICO; BULLÓ; SALAS-SALVADÓ, 2016), indicando que, ao contrário do ferro e zinco, o cobre não sofreu um processo de concentração acentuado, mantendo-se estável durante as etapas de pH alcalino e isoelétrico.

Em comparação com concentrados proteicos comerciais amplamente utilizados na indústria plant-based, como os de arroz, ervilha, grão de bico e soja, o coproduto avaliado apresenta perfil mineral superior, especialmente em relação aos microminerais. Estudos de López-Calabozo et al. (2025) indicam que os teores de ferro, zinco, manganês e cobre no coproduto são consistentemente mais elevados do que aqueles reportados para concentrados comerciais dessas matérias-primas, destacando seu potencial como fonte diferenciada de micronutrientes minerais.

5.1.3 Perfil de aminoácidos

O perfil de aminoácidos do coproduto é apresentado na Tabela 4.

Apesar dos tratamentos físico-químicos aplicados ao longo do processo de obtenção do coproduto a partir do concentrado proteico, observou-se que a integridade nutricional das proteínas remanescentes foi preservada, mantendo-se em consonância com o perfil reportado para a amêndoa de castanha de caju (ACC) *in natura* (LIU et al., 2018; CAETANO, 2024), bem como para a torta desengordurada e para concentrados e isolados proteicos descritos na literatura (LIU et al., 2018; CARMO et al., 2025).

Tabela 4 – Perfil de aminoácidos do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju

Aminoácidos (g.100 ⁻¹ g proteína)**	Coproducto *	FAO/WHO (2007) ****	
		Crianças (3–10 anos)	Adultos
Ácido aspártico (Asp)	8,85	–	–
Ácido glutâmico (Glu)	20,06	–	–
Serina (Ser)	5,86	–	–
Glicina (Gly)	4,76	–	–
Alanina (Ala)	5,04	–	–
Prolina (Pro)	4,17	–	–
Arginina (Arg)	9,56	–	–
Tirosina (Tyr)	3,86	–	–
Histidina (His) ***	2,83	1,6	1,5
Treonina (Thr) ***	4,68	2,5	0,9
Valina (Val) ***	6,29	4,0	3,9
Isoleucina (Ile) ***	7,32	3,1	3,0
Leucina (Leu) ***	8,65	6,1	5,9
Lisina (Lys) ***	6,29	4,8	4,5
Metionina (Met) ***	2,01	–	1,6
Cisteína (Cys)	1,61	–	0,6
Metionina (Met) *** + Cisteína (Cys)	3,62	2,7	2,2
Fenilalanina (Phe) ***	5,78	–	–
Fenilalanina (Phe) *** + Tirosina (Tyr)	9,64	4,1	3,8
Triptofano ***	2,08	0,66	0,6
Taurina	0,01	–	–
Hidroxiprolina	0,01	–	–
AAE/AAT*****	0,46	–	–

* Coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju.

** Resultados expressos como média (g·100 g⁻¹ de proteína).

*** Aminoácidos essenciais.

**** Valores de referência da FAO/WHO/UNU (2007) para necessidades de aminoácidos de crianças (3–10 anos) e adultos.

***** AAE/AAT: razão entre aminoácidos essenciais (AAE) e aminoácidos totais (AAT).

Fonte: elaborada pela autora.

Ao comparar os resultados obtidos neste estudo com os dados reportados pelos autores citados, verificou-se que os aminoácidos não essenciais predominantes no coproduto

foram o ácido glutâmico ($20,06 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ de proteína), a arginina ($9,56 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ de proteína, Tabela 4) e o ácido aspártico ($8,85 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ de proteína). Esses aminoácidos figuram entre os mais abundantes na amêndoa integral de ACC e em sua torta desengordurada, indicando que a estrutura proteica básica não sofreu degradação significativa em decorrência do processamento.

Os aminoácidos não essenciais podem ser sintetizados pelo próprio organismo e desempenham funções metabólicas fundamentais, atuando, entre outras, como importantes fontes de nitrogênio. Segundo Evangelista et al. (2025), a arginina exerce papel relevante na modulação da resposta imune e na atividade antioxidante. Por sua vez, os ácidos glutâmico e aspártico representam importantes reservas de aminoácidos, podem atuar como fonte de nitrogênio para síntese de outros aminoácidos não essenciais ou serem direcionados para vias energéticas. Esta composição mostrou-se superior à relatada por Silva, Bora e Azevedo (2010) para a torta de munguba (Glu: $17,11 \text{ g} \cdot 100^{-1} \text{ g}$ de proteína; Asp: $12,70 \text{ g} \cdot 100^{-1} \text{ g}$ de proteína), reforçando a densidade nutricional do coproduto.

Em relação aos aminoácidos essenciais (AAE), àqueles que devem ser obtidos obrigatoriamente via alimentação (PAOLETTI; COURTNEY-MARTIN; ELANGO, 2024), o coproduto apresentou valores que excedem as recomendações da Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, 2007) para a dieta de adultos em todos os parâmetros. O destaque para a fenilalanina e tirosina ($9,64 \text{ g} \cdot 100^{-1} \text{ g}$ de proteína), a leucina ($8,65 \text{ g} \cdot 100^{-1} \text{ g}$ de proteína) e a isoleucina ($7,32 \text{ g} \cdot 100^{-1} \text{ g}$ de proteína) classifica o coproduto como uma fonte de proteína completa e de alta qualidade (FUSSELL et al., 2021).

Os dados apresentados por Olatidoye et al. (2020) e por Carmo et al. (2025) para concentrados proteicos de ACC, indicaram que o coproduto manteve níveis de lisina ($6,29 \text{ g} \cdot 100^{-1} \text{ g}$ proteína) e valina ($6,29 \text{ g} \cdot 100^{-1} \text{ g}$ proteína) muito próximos ou até superiores aos da amêndoa integral. Isso comprova que os processos de extração não causaram perdas significativas de aminoácidos críticos, validando o coproduto como um ingrediente inovador em formulações alimentícias.

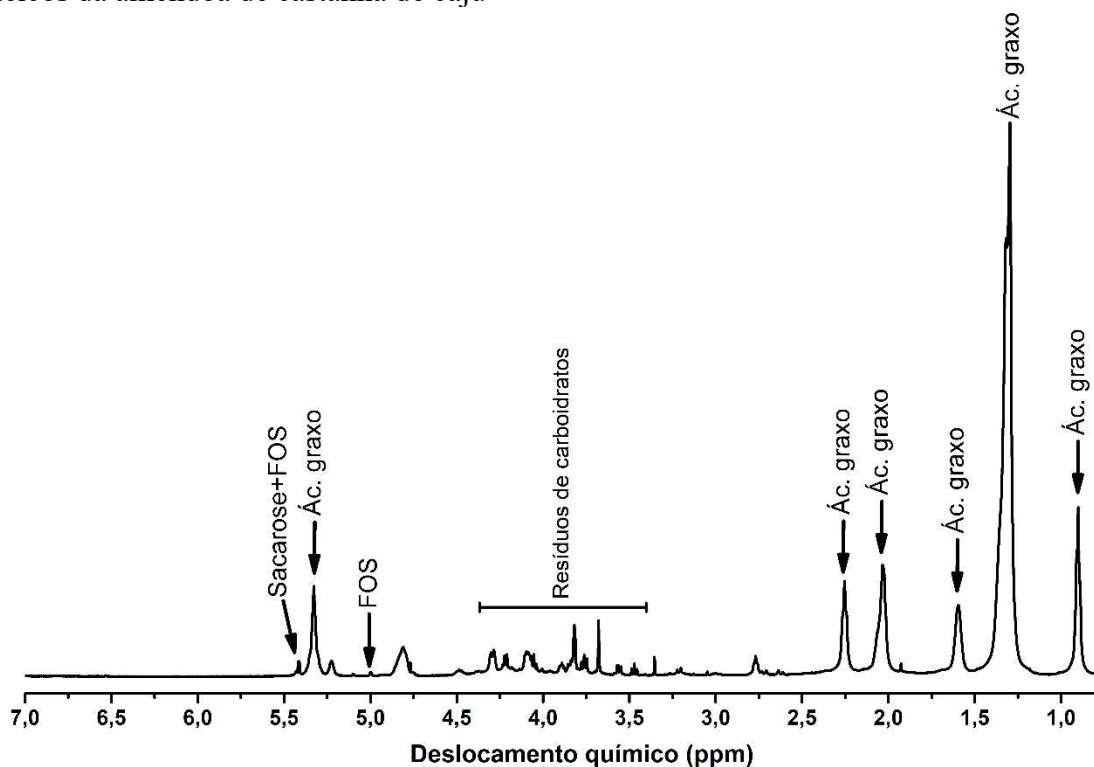
Além disso, ao ser comparado com outros concentrados proteicos vegetais, como os de ervilha, soja, tremoço e feijão fava analisados por López-Calabozo et al. (2025), o coproduto, ainda sim apresenta um equilíbrio aminoacídico superior em pontos específicos. Em relação a concentrados de ervilha e fava, o coproduto exhibe teores satisfatórios de metionina + cisteína ($3,62 \text{ g} \cdot 100^{-1} \text{ g}$ de proteína), superando o padrão FAO. Por fim, a abundância de aminoácidos hidrofóbicos (como leucina e valina) e polares no coproduto contribui para propriedades tecnofuncionais desejáveis em sistemas alimentares,

posicionando-o como uma alternativa competitiva e nutricionalmente mais completa do que muitas fontes comerciais de soja e cereais para o desenvolvimento de produtos *plant-based* e massas enriquecidas.

5.1.4 Ressonância Magnética Nuclear

O espectro de Ressonância Magnética Nuclear (RMN) do coproduto, apresentado na Figura 11, apresenta em sua composição principal ácidos graxos e carboidratos.

Figura 11 – Espectro de RMN do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju



Fonte: elaborada pela autora.

A presença de ácidos graxos indica que o coproduto permanece com um teor lipídico significativo. Este resultado é justificado pela concentração de lipídios que permaneceram retidos após o processamento, visto que a amêndoa de castanha de caju é uma oleaginosa rica em lipídios (LIU et al., 2023) e que o processo de extração verde utilizada não é tão eficiente quanto o uso de hexano. Esses autores reforçam que as tortas de oleaginosas mantêm teores residuais de lipídios que conferem estabilidade e propriedades específicas ao material processado, corroborando com os dados obtidos para o coproduto. Resultados

semelhantes foi observado por Carmo et al. (2025), que identificaram sinais de maior intensidade para ácidos graxos e ácido acético em espectros de RMN de farinhas obtidas por prensagem. Tal conservação de compostos é característica de métodos de extração mecânica menos severos, que mantêm a integridade química da amostra.

5.1.5 Caracterização dos grupos funcionais por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

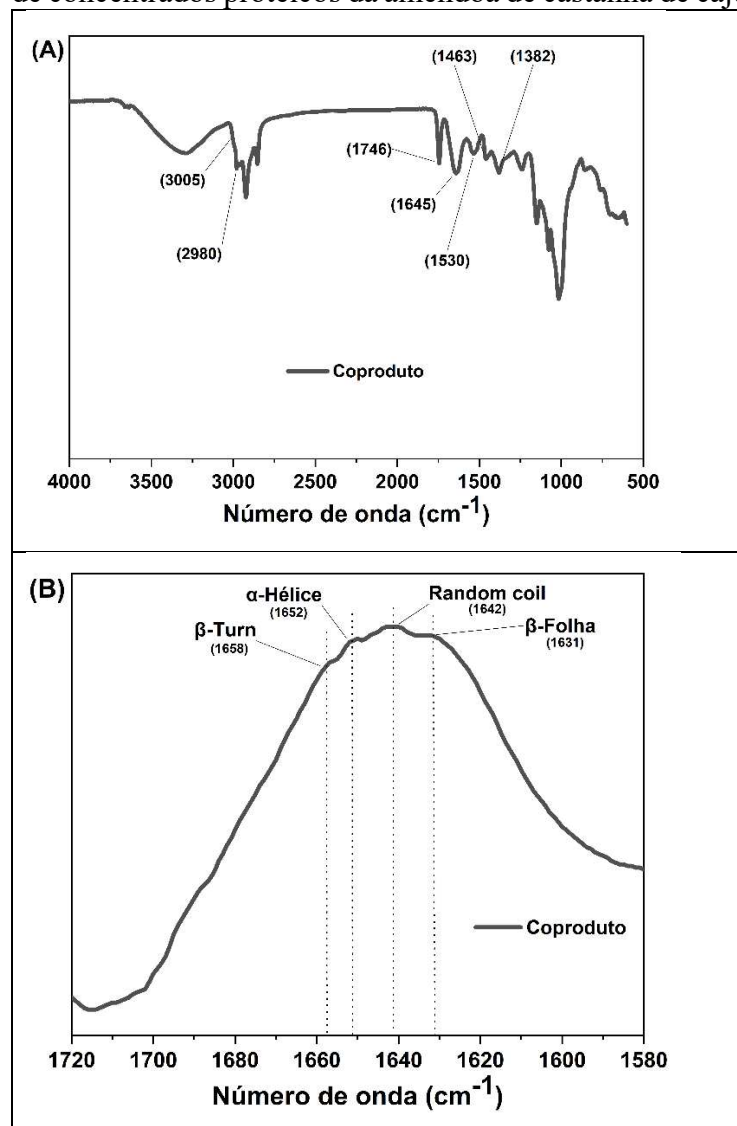
A análise por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) permitiu identificar os principais grupos funcionais presentes no coproduto gerado no processamento de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa da castanha de caju (Figura 12).

A banda larga observada em aproximadamente 3500 cm^{-1} (Figura 12 A) refere-se ao estiramento de grupos hidroxila ($-\text{OH}$) e amida ($\text{N}-\text{H}$). Essa característica, associada tanto a carboidratos quanto a proteínas, indica uma elevada densidade de grupos de natureza hidrofílica capazes de estabelecer ligações de hidrogênio, o que é fundamental para a capacidade de absorção de água do ingrediente (LI et al., 2017).

A preservação da fração lipídica residual e de cadeias alifáticas, provenientes da matriz original da amêndoa, foi confirmada pelas bandas nas regiões em 3005 cm^{-1} ($\text{C}-\text{H}$ olefínicas cis) e 2980 cm^{-1} (estiramento assimétrico de grupos metila $\nu_{\text{as}}-\text{CH}_3$) (BORBA; GOMEZ-ZAVAGLIA, 2023). Resultados muito semelhantes foram descritos por Carmo et al. (2025) ao analisarem concentrados proteicos de castanha de caju, onde a intensidade dessas bandas foi relacionada à eficiência do método de desengorduramento. No caso do coproduto, a manutenção da banda em 1746 cm^{-1} ($\text{C}=\text{O}$ de ésteres) reforça que, embora parte da gordura tenha sido extraída, o material ainda retém triacilgliceróis que podem contribuir para a palatabilidade e para as propriedades sensoriais em aplicações alimentícias (RODSAMRAN; SOTHORNVIT, 2018).

A presença de proteínas no coproduto é evidenciada nas bandas de Amida I (1645 cm^{-1}) e Amida II (1530 cm^{-1}), associada predominantemente às vibrações de flexão do grupo amino $\delta(\text{N}-\text{H})$ acopladas ao estiramento da ligação $\text{C}-\text{N}$, sendo indicativas do elevado teor proteico do coproduto (MIRANDA et al., 2023a; SHARMA; THAKUR, 2025). A banda Amida I, especificamente, é originada principalmente pelo estiramento da ligação $\text{C}=\text{O}$ (cerca de 80%) e é o marcador espectral mais sensível para a determinação da estrutura secundária de proteínas (BARTH, 2007).

Figura 12 – Análise dos espectros obtidos por espectroscopia de FTIR dos principais grupos funcionais presentes no coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju



A) Gráfico dos compostos no número de ondas de 500 a 4000 cm^{-1} . B) Ampliação dos estiramentos das vibrações das estruturas secundárias (α -hélice, β -folha, β -turn e *random coil*) no número de ondas de 1580 a 1720.

Fonte: elaborada pela autora.

Para uma investigação detalhada da conformação proteica, a região da Amida I (1580–1720 cm^{-1}) foi analisada em maior resolução (Figura 12 B). O perfil espectral revelou picos característicos atribuídos a diferentes estruturas secundárias: β -folha em 1631 cm^{-1} , Random coil (novelo aleatório) em 1642 cm^{-1} , α -hélice em 1652 cm^{-1} e β -turn em 1658 cm^{-1} . A quantificação dessas estruturas (Tabela 5) demonstra um predomínio da conformação β -folha (45,40%), seguida por β -turn (21,25%), Random coil (19,45%) e α -hélice (13,90%). O alto conteúdo de folhas beta é típico de proteínas de reserva vegetal, como as globulinas

(vicilinas e leguminas), que constituem a maior fração proteica da castanha de caju e tendem a apresentar estruturas compactas e termicamente estáveis (MIRANDA et al., 2023a).

A presença simultânea de estruturas ordenadas (α -hélice e β -folha) e desordenadas (*Random coil*) sugere que, embora o processamento possa ter induzido alterações conformacionais, evidenciadas pelos 19,45% de *random coil* (indicativo de regiões mais flexíveis ou parcialmente desnaturadas), a integridade estrutural básica das proteínas foi mantida. Comparando com Carmo et al. (2025), observa-se que o coproduto mantém um perfil espectral de amidas qualitativamente idêntico ao dos concentrados proteicos de alta pureza, o que indica que a proteína que permanece no coproduto é estruturalmente íntegra e funcional.

Tabela 5 – Estrutura secundária de proteínas do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju

Estruturas Secundárias (%)	Coproduto*
α -Hélice	13,90
β -Folha	45,40
β -Turn	21,25
<i>Random Coil</i>	19,45

*Coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju.

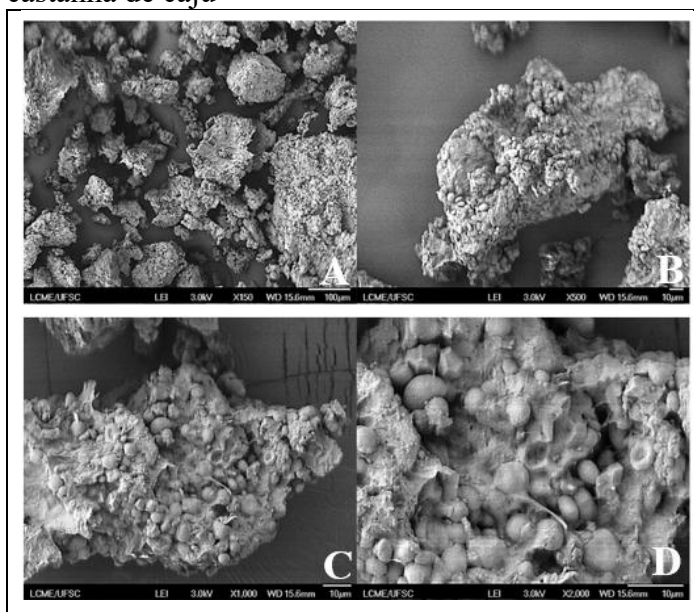
Fonte: elaborada pela autora.

Por fim, a região de "impressão digital" (1200 a 900 cm^{-1}), característica de vibrações $\nu(\text{C-O})$ e $\nu(\text{C-O-C})$ de polissacarídeos, confirma que as frações de fibras e carboidratos estruturais da amêndoa foram concentradas no coproduto. Segundo Bhuiyan e Ngadi (2023), a coexistência dessas bandas de carboidratos com as de proteínas e lipídios cria uma matriz heterogênea complexa. Essa sinergia entre os grupos funcionais preservados sugere que o coproduto não é apenas um resíduo, mas um ingrediente tecnofuncional robusto, capaz de atuar na estruturação de massas e produtos *plant-based* devido à sua composição química multimodal que sobreviveu ao processo de extração.

5.1.6 Caracterização Microestrutural

A Figura 13 demonstra a caracterização microestrutural do coproduto obtidas por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Figura 13 – Caracterização microestrutural da superfície do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju



Micrografias obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do material analisado, em diferentes ampliações: (A) 150×; (B) 500×; (C) 1.000×; (D) 2.000×.

Fonte: elaborada pela autora.

No coproduto, foram descritos espaços vazios e agregados mais heterogêneos, com grânulos esféricos menos numerosos e menores, existindo a hipótese de que parte desses grânulos represente gotículas de gordura reorganizadas durante secagem e vácuo. Essa leitura é coerente com a caracterização do coproduto, que apresenta $\approx 10\%$ de lipídios, $\approx 25\%$ de proteína e $\approx 28\%$ de fibra dietética total, com predominância marcante da fração insolúvel ($\approx 26\%$). Em termos de pó/ingrediente, uma elevada fração insolúvel tende a gerar partículas mais rígidas e irregulares, reduzindo a eficiência de empacotamento e favorecendo a formação de vazios e descontinuidades visíveis na MEV. Além disso, a presença de lipídios pode contribuir para a coesão local e a aglomeração superficial, ao mesmo tempo em que aumenta a afinidade por óleo. Em concordância, o coproduto apresenta menor densidade aparente ($0,44 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$) e as maiores capacidades de absorção de água ($3,44 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$) e de óleo ($1,01 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$), além de maior poder de intumescimento ($0,77 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$), indicando um material com maior porosidade/irregularidade e elevada retenção física de fluidos.

Também se pode afirmar, que essa combinação costuma indicar um material com muitos sítios capazes de interagir com óleo (regiões apolares e porosidade) e com água (grupos polares de proteínas e retenção física em poros e capilares), o que ajuda a explicar por que o coproduto aparece mais poroso e heterogêneo na MEV. O menor poder de intumescimento

apresentado no coproduto ($0,77 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$) é compatível com a elevada fração de fibra insolúvel, que pode aumentar a retenção de água por aprisionamento físico e por capilaridade, mesmo sem formar uma matriz amilácea contínua.

Nesse sentido, o coproduto por ser rico em fibra insolúvel e apresentar microestrutura mais porosa e heterogênea, tende a atuar como fase particulada que aumenta a heterogeneidade da massa, podendo elevar retenção de água em regiões fibrosas, mas também introduzir pontos de descontinuidade estrutural, o que pode afetar firmeza e perdas de sólidos no cozimento, dependendo do balanço com o amido e do nível de hidratação (FOSCHIA et al., 2015). Os parâmetros físico-químicos e de cor ajudam a contextualizar, ainda que não expliquem diretamente a micrografia. O coproduto apresenta pH mais alto e baixa atividade de água.

Em relação à cor, o coproduto é mais claro do que as formulações no estado analisado, o que pode estar ligado à composição e ao histórico de processamento do coproduto e à presença de outros ingredientes nas formulações. Os minerais e os compostos bioativos também podem ser mencionados como parte do perfil funcional e nutricional, pois o coproduto concentra minerais e apresenta maiores teores polifenóis e flavonoides, o que é compatível com um ingrediente mais “concentrado” e estruturalmente heterogêneo, porém, a correlação direta desses componentes com a morfologia observada nas micrografias deve ser visualizada como indireta, pois a MEV reflete sobretudo organização física do material seco.

Em síntese, o pó, o coproduto, se caracteriza por microestrutura mais porosa e heterogênea, compatível com um sistema rico em fibra insolúvel, proteína e lipídios, com alta capacidade de absorver água e óleo e menor densidade aparente.

5.1.7 Compostos bioativos e atividade antioxidante

A determinação dos compostos bioativos e da atividade antioxidante do coproduto revela que o material mantém um perfil fitoquímico relevante (Tabela 6). O coproduto apresentou teores significativos de polifenóis totais ($38,55 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$) e flavonoides ($7,96 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$). Este resultado demonstra que, mesmo após o processamento para obtenção dos concentrados proteicos, uma fração considerável dos metabólitos secundários da amêndoa de castanha de caju ainda permaneceu retida na matriz do coproduto.

Tabela 6 – Teor de compostos bioativos e atividade antioxidante total do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju

Determinações**	Coproduto*
Polifenóis Totais (mg EAG·100 g ⁻¹)	38,55 ± 0,42
Flavonoides (mg·100 g ⁻¹)	7,96 ± 0,24
Atividade antioxidante total (ABTS•+) (μM Trolox·100 g ⁻¹)	31,83

*Coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju.

**Resultados expressos como média ± desvio padrão de determinações em triplicata.

Fonte: elaborada pela autora.

A manutenção destes compostos é corroborada por Gutiérrez-Paz et al. (2025), que destacam que a ACC *in natura* é uma fonte intrínseca de compostos fenólicos com elevada estabilidade térmica e química. O fato de o coproduto apresentar estes valores sugere que o tratamento de concentração proteica (que geralmente envolve variações de pH e lavagens) não foi severo o suficiente para degradar totalmente estas moléculas. Em comparação com os dados de Trox et al. (2010) para a amêndoa *in natura*, observa-se que o coproduto atua como um repositório destas frações bioativas, mantendo o potencial funcional da matéria-prima original.

A atividade antioxidante total determinada ($31,83 \times 10^{-4} \mu\text{M Trolox} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$) é uma resposta direta à presença concomitante de polifenóis e flavonoides. Segundo Ji et al. (2024), os polifenóis vegetais são reconhecidos pela sua capacidade de sequestrar radicais livres, exercendo funções de ação antioxidante, anti-inflamatória e bloqueadoras do crescimento de células cancerígenas. De modo semelhante, os flavonoides identificados no coproduto reforçam essa série de benefícios para a saúde, incluindo ainda propriedades antiproliferativas e cardioprotetoras (ZHENG; ZHANG; ZENG, 2025).

Comparativamente ao concentrado proteico obtido de ACC descrito por Carmo et al. (2025), o coproduto apresenta-se como uma alternativa de alto valor agregado. Enquanto os concentrados tendem a perder compostos hidrossolúveis durante as sucessivas etapas de lavagem e precipitação isoelétrica, o coproduto retém uma matriz complexa de fibras e fitonutrientes. Portanto, este material não deve ser visto apenas como um resíduo proteico, mas como um ingrediente funcional com multi constituintes, capaz de enriquecer massas alimentícias tanto do ponto de vista nutricional quanto na proteção contra processos oxidativos durante o armazenamento do produto final.

5.1.8 Propriedades tecnofuncionais

As propriedades tecnofuncionais do coproduto são apresentadas na Tabela 7. As propriedades tecnofuncionais refletem as interações físico-químicas entre as macromoléculas (proteínas, amido e fibras) e a matriz de água ou óleo, que podem ser sensíveis ao processamento, e induzir modificações estruturais, como a desnaturação proteica ou a ruptura de ligações glicosídicas, alterando a solubilidade, hidrofobicidade e as capacidades de absorção (PONTES, 2024).

Tabela 7 – Propriedades tecnofuncionais do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju

Determinações**	Coproduto*
Densidade aparente (g.mL ⁻¹)	0,44 ± 0,01
Solubilidade em água (g. 100 g ⁻¹)	6,02 ± 0,13
Capacidade de absorção de óleo (g.g ⁻¹)	1,01 ± 0,03
Capacidade de absorção de água (g.g ⁻¹)	3,44 ± 0,03
Poder de intumescimento (g.g ⁻¹)	0,77 ± 0,01

*Coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju.

**Resultados expressos como média ± desvio padrão de determinações em quintuplicata.

Fonte: elaborada pela autora.

A densidade aparente do coproduto (0,44 g.mL⁻¹) apresentou-se inferior à relatada por Lima et al. (2021) para a amêndoa de caju desengordurada. Essa redução na densidade sugere que o processo de extração proteica conferiu ao material uma estrutura mais porosa e menos compacta, o que é vantajoso para a formulação de massas, facilitando a hidratação e a percepção de volume no produto final (OYEYINKA; BASSEY, 2025).

Quanto à solubilidade em água do coproduto (6,02 g. 100 g⁻¹), observou-se um valor superior ao do concentrado proteico de ACC descrito por Rocha (2023) (5,40 g. 100 g⁻¹). No entanto, quando comparado ao trabalho de Carmo et al. (2025), que obteve maior solubilidade em concentrados purificados por rota alcalina, percebe-se que a presença de fibras estruturais e proteínas remanescentes menos solúveis no coproduto limita sua dissolução total. Segundo Liu et al. (2018), a baixa solubilidade em pH próximo ao ponto isoelétrico é comum em proteínas de oleaginosas, mas no coproduto, a interação com carboidratos residuais pode criar uma rede que favorece a suspensão, compensando a baixa

solubilidade proteica.

A capacidade de absorção de água coproduto ($3,44 \text{ g.g}^{-1}$) destacou-se por ser significativamente superior aos valores encontrados por Lima et al. (2021) ($1,85 \text{ g.g}^{-1}$) e Ogunwolu et al. (2009) ($1,74 \text{ g.g}^{-1}$) para concentrados proteicos de ACC. Este aumento expressivo pode ser atribuído à natureza multicomponente do coproduto. Além do teor proteico ($25,01 \text{ g.100 g}^{-1}$), a presença de fibras e carboidratos complexos, identificados nas análises de FTIR e RMN, amplia a capacidade de retenção de água através de pontes de hidrogênio. Conforme discutido por Carmo et al. (2025), ingredientes que retêm maior quantidade de água são fundamentais em massas alimentícias, pois garantem a maciez e evitam o ressecamento durante e após a cocção.

Em relação à capacidade de absorção de óleo ($1,01 \text{ g.g}^{-1}$), os valores foram inferiores aos isolados proteicos puros ($4,42 \text{ g.g}^{-1}$) (OGUNWOLU *et al.*, 2009). Contudo, a interação proteína-lipídio no coproduto é funcionalmente relevante para a retenção de sabor e melhoria da palatabilidade. Liu et al. (2018) reforçam que a presença de grupos laterais não polares das proteínas de castanhas favorece a ligação com gorduras, o que, no caso das massas, contribui para uma textura mais aveludada e redução da pegajosidade. Pontes (2024) obteve em seus estudos valores próximos ao desta pesquisa ($1,19 \text{ g.g}^{-1}$) na farinha de tremoço da semente inteira e cozida.

O poder de intumescimento ($0,77 \text{ g.g}^{-1}$), embora inferior ao de farinhas ricas em amido como a de aveia ($4,96 \text{ g.g}^{-1}$), reflete a capacidade de expansão da matriz fibrosa do coproduto. A migração de água para o interior das partículas durante o aquecimento promove um relaxamento das cadeias de amilopectina residuais (HWANG et al., 2022). Esta propriedade, em conjunto com a elevada capacidade de absorção de água, sugere que o coproduto atuará como um agente estruturante eficiente em massas alimentícias, auxiliando na formação de um gel estável que suporta a rede de glúten ou substitui funções estruturais em produtos sem glúten.

5.2 Comportamento de fluidez do pó do coproduto

As propriedades físicas relacionadas à fluidez do coproduto são apresentadas nas Tabelas 8 e 9. A avaliação dos parâmetros de densidade aparente e compactada, razão de Hausner, índice de compressibilidade, ângulo de atrito com a parede e função de fluxo é fundamental para compreender o comportamento do material durante operações unitárias, incluindo estocagem, transporte, dosagem e processamento industrial, especialmente em

aplicações em escala industrial (SUHAG; KELLIL; RAZEM, 2024).

Tabela 8 – Propriedades de fluidez do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju

Parâmetros**	Coproduto*
Densidade aparente (Kg.m ⁻³)	321,1
Densidade compactada (Kg.m ⁻³)	651,3
Razão de Hausner	2,03
Índice de compressibilidade (%)	50,6

*Coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju.

**Resultados expressos como média ± desvio padrão de determinações em heptaplicata.

Fonte: elaborada pela autora.

A densidade aparente de 321,4 Kg.m⁻³, permitiu caracterizar o coproduto como material *bulky* (volumoso), ou seja, pouco compactado, com elevado volume de vazios intergranulares. Tal comportamento é característico de pós finos obtidos por moagem e secagem, processos que tendem a gerar estruturas com maior oclusão de ar e menor densidade de empacotamento. Em contrapartida, a densidade compactada, determinada sob a maior tensão principal de consolidação aplicada no ensaio de função de fluxo, atingiu 651,3 kg.m⁻³ (Tabela 8), evidenciando uma expressiva capacidade de compactação do material quando submetido a tensões mecânicas.

Essa diferença acentuada entre as densidades reflete-se diretamente na razão de Hausner (2,03) e no índice de compressibilidade (50,6%), valores que, segundo critérios amplamente adotados na engenharia de pós, caracterizam materiais com fluidez ruim a muito ruim. Tais resultados indicam que o coproduto apresenta elevada sensibilidade à consolidação, com tendência significativa à redução de volume e aumento da coesão interna sob carregamento.

O comportamento observado pode ser atribuído, em grande parte, à composição do material. Pós ricos em proteínas apresentam elevada área superficial específica e forte capacidade de interação intermolecular, incluindo ligações de hidrogênio e forças de Van der Waals, o que favorece a coesão entre partículas. Além disso, a remoção parcial de lipídios durante o processo de concentração proteica tende a reduzir o efeito lubrificante da fase oleosa, contribuindo para o aumento da resistência ao escoamento.

A análise da função de fluxo reforça essa interpretação. Os valores do índice de

fluxo (IF), obtidos a partir da razão entre a tensão principal de consolidação (σ_1) e a tensão não confinada de escoamento (σ_c), variaram aproximadamente entre 2,0 e 3,2, com valor próximo de 2,5 na maior tensão aplicada (Tabela 9). De acordo com a classificação proposta por ASTM D6128/Jenike (ASTM, 2016), esse intervalo enquadra o coproduto como um material coesivo, indicando dificuldade de escoamento gravitacional livre, especialmente após períodos de estocagem sob carga.

Tabela 9 – Tensão principal de consolidação (σ_1), tensão não confinada de escoamento (σ_c) e índice de fluxo (IF) do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju

Coproducto*		
σ_1 (kPa)**	σ_c (kPa)**	IF = σ_1 / σ_c ****
0,791	0,391	2,02
1,602	0,551	2,91
3,242	1,000	3,24
6,555	2,085	3,14
13,257	5,266	2,52

*Coproducto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju.

** σ_1 : tensão principal de consolidação; σ_c : Tensão não confinada de escoamento.

***IF=Índice de fluxo (Jenike): valor correspondente à maior tensão de consolidação e indica o quão facilmente o pó escoia quando descarregado após consolidação.

Fonte: elaborada pela autora.

Resultados semelhantes são reportados por Carmo (2024), ao avaliar insumos proteicos obtidos da amêndoa de castanha de caju por diferentes rotas de processamento. O autor destaca que materiais com maior teor proteico e menor teor lipídico residual apresentam comportamento mais coesivo, com baixa fluidez e elevada compressibilidade, dificultando operações de manuseio e dosagem. Esses achados corroboram os resultados obtidos no presente estudo, evidenciando que o coproduto avaliado compartilha limitações físicas semelhantes às observadas em outros ingredientes proteicos derivados da castanha de caju.

No estudo de Carmo et al. (2025), embora o foco principal seja o potencial do concentrado proteico de castanha de caju como ingrediente para a indústria emergente de proteínas alternativas, os autores ressaltam desafios tecnológicos associados à aplicação industrial de pós proteicos, incluindo problemas relacionados à fluidez, formação de

aglomerados e estabilidade durante o armazenamento. Assim, os resultados deste trabalho complementam a literatura ao fornecer uma caracterização reológica detalhada, fundamental para a viabilidade industrial desses insumos.

Resultados semelhantes são relatados para pós proteicos vegetais, como concentrados de soja, ervilha e arroz, os quais apresentam alta compressibilidade e baixa fluidez, especialmente quando obtidos por via úmida, demandando a adoção de estratégias tecnológicas, como aglomeração, granulação ou o uso de agentes carreadores, para viabilizar sua aplicação industrial. De forma consistente com esses relatos, o coproduto avaliado apresentou comportamento característico de pó coesivo, com elevada compressibilidade e baixa fluidez, em consonância com os achados de Carmo (2024), Carmo et al. (2025) e outros estudos da literatura, evidenciando implicações relevantes para o planejamento de processos industriais, armazenamento e aplicação como ingrediente plant-based.

No que se refere ao ângulo de atrito com a parede, os valores obtidos variaram entre 10,8° e 12,7° (Tabela 10), indicando uma interação relativamente favorável entre o material e a superfície avaliada. Apesar da elevada coesão interna observada, esses ângulos relativamente baixos sugerem que, sob condições adequadas de projeto de silos e tremonhas, o atrito com a parede não constitui o principal fator limitante do escoamento, sendo a coesão interna do material o aspecto mais crítico a ser considerado.

Tabela 10 – Valores máximos e mínimo do ângulo de atrito com a parede do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju

Ângulo de atrito com a parede	Coproduto*
Máximo (°)	12,7
Mínimo (°)	10,8

*Coproducto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju.

**Resultados expressos como média ± desvio padrão de determinações em heptaplicata.

Fonte: elaborada pela autora.

5.3 Caracterização nutricional, físico-química, estrutural e microestrutural das massas alimentícias à base do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju

5.3.1 Composição centesimal e físico-química

A composição centesimal e as características físico-químicas das massas alimentícias, em sua forma fresca (Tabela 11), refletem o equilíbrio entre o aporte nutricional conferido pelo coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa da castanha de caju e a ação dos agentes estruturantes, representados pela farinha de arroz e pelo polvilho azedo.

Tabela 11 – Composição nutricional e caracterização físico-química das massas alimentícias sem glúten à base do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju

Parâmetros ^{*,**}	Formulação 1	Formulação 2	Formulação 3
Composição centesimal e Valor nutricional			
Umidade (g.100 g ⁻¹)	52,20 ± 0,37 a	52,40 ± 0,42 a	52,12 ± 0,25 a
Cinzas (g.100 g ⁻¹)	1,92 ± 0,02 a	2,02 ± 0,22 a	1,87 ± 0,02 a
Proteína (g.100 g ⁻¹)	11,64 ± 0,24 a	9,77 ± 0,19 b	9,60 ± 0,18 b
Lipídios (g.100 g ⁻¹)	4,19 ± 0,10 a	4,30 ± 0,12 a	4,21 ± 0,22 a
Carboidratos Totais (g.100 g ⁻¹)	29,95 ± 0,03 b	31,34 ± 0,11 a	32,13 ± 0,08 a
Valor energético (kcal.100 g ⁻¹) ^{***}	204,16 ± 1,73a	203,19 ± 0,78 a	204,85 ± 1,77a
Propriedades físico-químicas			
pH	6,97 ± 0,08 b	6,86 ± 0,05 c	7,19 ± 0,05a
Acidez total titulável (% ácido málico)	0,23 ± 0,01 b	0,28 ± 0,02 a	0,20 ± 0,01c
Atividade de água (Aw)	0,99 ± 0,01 a	0,99 ± 0,01 a	0,99 ± 0,01a

Massas alimentícias frescas sem glúten, em sua forma crua: Formulação 1 (40% coproduto + 10% farinha de arroz + 0% polvilho azedo), Formulação 2 (40% coproduto + 5% farinha de arroz + 5% polvilho azedo), Formulação 3 (40% coproduto + 0% farinha de arroz + 10% polvilho azedo).

*Resultados expressos como média ± desvio padrão de determinações em quintuplicata.

**Médias seguidas por letras iguais, na mesma linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância (p > 0,05).

***Valor energético estimado por cálculo indireto, utilizando os fatores de conversão de Atwater.

Fonte: elaborada pela autora.

Os teores de umidade das massas (52,12 a 52,40 g.100 g⁻¹) não apresentaram

diferença estatisticamente significativa entre si ($p > 0,05$), contudo sendo superiores ao do coproduto ($4,53 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$, Tabela 2). Este aumento é intrínseco ao processo de elaboração de massas frescas, onde a água é o agente plastificante essencial.

O teor de cinzas não apresentou diferença estatística significativa ($p > 0,05$) entre as três formulações, com valores variando de $1,87 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ a $2,02 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$. Ao comparar com o coproduto ($4,59 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$), observa-se uma redução esperada devido ao efeito de diluição pelos demais ingredientes. No entanto, os valores permanecem superiores aos de massas tradicionais exclusivas de arroz ($1,4 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$) ou milho ($0,2 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$) (SILVA; ASCHERI; ASCHERI, 2016). Segundo Lima et al. (2021), a amêndoa de castanha de caju é um repositório denso de minerais (fósforo, magnésio e zinco) e a manutenção de cerca de 2% de cinzas nas massas frescas indica que o coproduto transferiu com sucesso uma carga mineral relevante para o produto final, aumentando sua densidade micromineral.

Em relação às proteínas, a Formulação 1 ($11,64 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$) apresentou o maior teor, diferenciando-se das demais ($p < 0,05$). Embora o coproduto seja a principal fonte proteica ($25,01 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$), a substituição gradativa da farinha de arroz, que possui média de $7,3 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ de proteína (SEVERO; MORAES; RUIZ, 2010) pelo polvilho azedo (essencialmente amido) nas formulações 2 e 3 causou uma redução desse nutriente. Comparativamente, as massas de Lopes, Vieira e Oliveira (2025) com farinha de baru atingiram $17,42 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ de proteína, porém utilizando uma proporção de substituição distinta. Ainda assim, as massas do presente estudo podem ser consideradas fontes proteicas relevantes no mercado de produtos livres de glúten.

As massas alimentícias não diferiram entre si quanto ao teor de lipídios, que variou de $4,19 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ a $4,30 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$. No entanto, esses valores são superiores aos de massas tradicionais de arroz ($2,6 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$) (SILVA; ASCHERI; ASCHERI, 2016), as quais, conforme Liu et al. (2018), o teor de lipídios pode auxiliar na lubrificação da massa e melhoria da textura e da palatabilidade, reduzindo a pegajosidade característica de produtos sem glúten.

Os carboidratos totais foram os componentes que apresentaram as variações mais acentuadas entre as formulações. As Formulações 3 ($32,13 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$) e 2 ($31,34 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$) não diferiram estatisticamente entre si ($p > 0,05$), porém apresentaram valores significativamente superiores aos observados para a Formulação 1 ($29,95 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$) ($p < 0,05$). Esse comportamento era esperado, uma vez que o polvilho azedo é um ingrediente predominantemente amiláceo, e sua maior proporção na Formulação 3 contribui diretamente para o aumento da fração glicídica da massa em relação ao coproduto e a farinha de arroz.

O teor de carboidratos das massas variou de $29,95$ a $32,13 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$, o que é

desejável do ponto de vista tecnológico, pois a presença de amido favorece a formação de uma matriz com estrutura gomosa e consistência adequada, especialmente em sistemas sem glúten.

Quanto ao valor energético, não houve diferença estatística significativa ($p > 0,05$) entre as formulações, com valores situando-se entre 203,19 e 204,85 kcal.100 g⁻¹. Embora a Formulação 1 possua mais proteínas e a Formulação 3 mais carboidratos, o balanço calórico final ficou equilibrado pela similaridade nos teores de umidade e lipídios. Estes conteúdos energéticos são inferiores à do coproduto (304,8 kcal.100 g⁻¹) devido à hidratação da massa fresca (umidade, em média 52 g·100 g⁻¹), o que resulta em um produto final nutricionalmente denso, mas com calorias moderadas por porção.

Os valores de pH (6,86 a 7,19) e acidez total (0,20 a 0,28 g·100 g⁻¹ em ácido málico) das massas apresentaram diferença estatísticas ($p < 0,05$) entre si. A Formulação 2 apresentou a maior acidez, o que pode ser atribuído à fermentação natural característica do polvilho azedo, que introduz ácidos orgânicos à matriz. Comparando-se ao estudo de Barros et al. (2021) com massas elaboradas com resíduos de açaí e bacaba (acidez 0,52 a 0,76 g·100 g⁻¹), as massas alimentícias à base do coproduto apresentaram um teor mais ácido.

A atividade de água (A_w) de 0,99 em todas as formulações indica que o produto é altamente perecível, em contraste com a estabilidade do coproduto ($A_w = 0,23$). Esse valor de atividade água é condizente com massas frescas e, segundo Barbosa-Cánovas et al. (2020), exige armazenamento sob refrigeração e consumo rápido, ou a aplicação de processos de secagem para extensão da vida útil. Resultados similares foram observados por Llavata, Albors e Martin-Esparza (2019) em massas de chufa e grão-de-bico, reforçando que a matriz proteica de oleaginosas retém água livre de forma eficiente, mantendo a maciez do produto.

5.3.2 Perfil mineral

O perfil mineral das massas alimentícias em sua forma fresca (Tabela 12) evidencia que a incorporação de 40% do coproduto elevou substancialmente o valor nutricional do produto final, superando as deficiências comuns em produtos sem glúten convencionais.

Tabela 12 – Perfil de minerais das massas alimentícias frescas sem glúten à base do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju

Minerais (mg.100 g⁻¹)*,**	Formulação 1	Formulação 2	Formulação 3
Cálcio	62,00 ± 1,00 a	59,33 ± 0,57 b	60,33 ± 0,57 ab
Cobre	1,00 ± 0,01 a	1,23 ± 0,32 a	1,00 ± 0,01 a
Enxofre	138,66 ± 0,57 a	136,33 ± 2,30 a	129,66 ± 2,08 b
Ferro	8,43 ± 0,05 a	8,43 ± 0,11 a	8,36 ± 0,20 a
Fósforo	437,00 ± 15,58 a	433,33 ± 4,93 a	421,33 ± 5,13 a
Magnésio	266,00 ± 7,21 a	261,66 ± 2,08 a	256,66 ± 3,78 a
Manganês	1,93 ± 0,05 a	1,90 ± 0,00 a	1,83 ± 0,05 a
Potássio	303,66 ± 5,03 a	298,66 ± 2,88 ab	292,33 ± 4,04 b
Sódio	103,66 ± 1,15 a	103,33 ± 1,52 a	104,00 ± 1,73 a
Zinco	6,60 ± 0,17 a	6,46 ± 0,05 ab	6,26 ± 0,05 b

Massas alimentícias frescas sem glúten, em sua forma crua: Formulação 1 (40% coproduto + 10% farinha de arroz + 0% polvilho azedo), Formulação 2 (40% coproduto + 5% farinha de arroz + 5% polvilho azedo), Formulação 3 (40% coproduto + 0% farinha de arroz + 10% polvilho azedo).

*Resultados expressos como média ± desvio padrão de determinações em quintuplicata.

**Médias seguidas por letras iguais, na mesma linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância ($p > 0,05$).

Fonte: elaborada pela autora.

O fósforo (421,33 – 437,00 mg.100 g⁻¹), o potássio (292,33 – 303,66 mg.100 g⁻¹) e o magnésio (256,66 – 266,00 mg.100 g⁻¹) foram os macrominerais mais abundantes, tanto no coproduto (Tabela 3) quanto nas formulações de massas alimentícias. Esse perfil é uma herança direta do coproduto, que concentra esses minerais naturalmente presentes na amêndoa de castanha de caju. Observou-se que não houve diferença estatística ($p > 0,05$) entre as formulações para o fósforo e magnésio, indicando que a variação entre farinha de arroz e polvilho azedo não alterou significativamente o aporte desses nutrientes, os quais são garantidos majoritariamente pelo coproduto.

Vivar-Quintana et al. (2023) identificaram esses mesmos elementos como predominantes em farinhas de leguminosas e cereais, reforçando que o uso de subprodutos de oleaginosas, como a ACC, é uma estratégia eficaz para atingir perfis minerais semelhantes ou superiores aos de fontes vegetais comerciais. Comparativamente, as massas deste estudo apresentaram teores de magnésio cerca de 10 vezes superiores aos relatados por Mostafa et al. (2025) para massas de arroz puro (27,64 mg.100 g⁻¹), demonstrando o efeito de fortificação

natural do coproduto.

Um dos resultados mais expressivos foi o teor de ferro nas massas alimentícias (8,36 – 8,43 mg.100 g⁻¹), que não apresentou diferença estatística entre as formulações, mas foi bem superior ao encontrado em massas convencionais à base de trigo. Em um contexto em que o enriquecimento de farinhas de trigo com ferro é obrigatório por lei devido à sua carência populacional (JEANES et al., 2022), as massas à base do coproduto gerado no processo de concentração de proteínas de amêndoa de castanha de caju apresentam-se como uma alternativa de enriquecimento intrínseco. Além disso, o teor de ferro observado é aproximadamente 16 vezes maior que o de massas de arroz (0,51 mg.100 g⁻¹) descritas por Mostafa et al. (2025).

O zinco (6,26 – 6,60 mg.100 g⁻¹, Tabela 12) apresentou uma leve redução estatística na Formulação 3, sugerindo que a farinha de arroz (presente na Formulação 1) contribui com frações complementares desse mineral em relação ao polvilho azedo. Ainda assim, todos os valores são expressivos, visto que o zinco é essencial para a resposta imunológica e proteção contra agentes patogênicos (MITRA et al., 2022). O cálcio, o enxofre e o potássio também apresentaram reduções sutis na Formulação 3 (10% polvilho), confirmando que o polvilho, por ser um amido isolado, atua reduzindo levemente a densidade mineral quando comparado à farinha de arroz.

Muitos produtos sem glúten apresentam baixos teores de minerais e, portanto, são considerados nutricionalmente inferiores aos alimentos à base de trigo que substituem (BETROUCHE et al., 2022). No entanto, o coproduto deste estudo reverte essa tendência. Conforme Lima et al. (2021), a castanha de caju possui uma matriz mineral robusta que resiste ao processamento de concentração proteica. A presença de teores relevantes de cobre (1,00 – 1,23 mg.100 g⁻¹) e manganês (1,80 – 1,3 mg.100 g⁻¹) em todas as formulações do presente estudo consolida essas massas como alimentos funcionais de alta densidade de micronutrientes, capazes de suprir lacunas nutricionais importantes na dieta de celíacos e consumidores de produtos *plant-based*.

5.3.3 Perfil funcional

A Tabela 13 apresenta o teor de compostos bioativos e a atividade antioxidante das massas alimentícias, em sua forma fresca. Os resultados demonstram que, embora a base de coproduto tenha sido mantida constante (40%), a interação com os demais ingredientes e o processamento tecnológico influenciaram o perfil de compostos bioativos.

Tabela 13 – Teor de compostos bioativos e atividade antioxidante das massas alimentícias frescas sem glúten à base do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju

Determinações ^{*,**}	Formulação 1	Formulação 2	Formulação 3
Polifenóis totais (mg EAG·100 g ⁻¹)	18,32 ± 0,31c	28,06 ± 0,56 b	34,86 ± 0,46 a
Flavonoides (mg·100 g ⁻¹)	6,45 ± 0,21 a	5,95 ± 0,45 a	4,63 ± 0,40 b
Atividade antioxidante total (ABTS• ⁺) (μM Trolox·100 g ⁻¹)	0,02 a	0,94 a	1,28 a

Massas alimentícias frescas sem glúten, em sua forma crua: Formulação 1 (40% coproduto + 10% farinha de arroz + 0% polvilho azedo), Formulação 2 (40% coproduto + 5% farinha de arroz + 5% polvilho azedo), Formulação 3 (40% coproduto + 0% farinha de arroz + 10% polvilho azedo).

*Resultados expressos como média ± desvio padrão de determinações em triplicata.

**Médias seguidas por letras iguais, na mesma linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância ($p > 0,05$).

Fonte: elaborada pela autora.

As formulações de massas alimentícias diferiram significativamente entre si ($p < 0,05$) quanto aos teores de polifenóis totais, flavonoides, e atividade antioxidante total. A Formulação 3 destacou-se por apresentar o maior teor de polifenóis totais (34,86 mg EAG·100 g⁻¹), valor muito próximo ao do coproduto (38,55 mg EAG·100 g⁻¹). Esse resultado sugere que a substituição da farinha de arroz pelo polvilho azedo na Formulação 3, favoreceu a estabilidade desses compostos na matriz da massa. Por outro lado, a Formulação 1 apresentou o menor teor (18,32 mg EAG·100 g⁻¹), indicando que a combinação entre o coproduto e 10% de farinha de arroz pode ter gerado interações proteína-polifenol mais fortes, dificultando a detecção analítica desses compostos ou promovendo a sua redução no produto (BORRELLI et al., 2023). Oniszczyk et al. (2019) também observou o aumento no teor de polifenóis em massas alimentícias à medida que aumentava a quantidade de farinha de castanha, obtendo o maior teor (5,72 mg EAG·100 g⁻¹) na formulação com 50% de adição.

Os teores de flavonoides nas formulações variaram entre 4,63 e 6,45 mg·100 g⁻¹. A formulação 3 apresentou o menor conteúdo desses compostos bioativos, diferindo estatisticamente das demais ($p < 0,05$). Esse resultado sugere que a composição da matriz pode ter influenciado a estabilidade e/ou retenção dos flavonoides, possivelmente em função de interações com outros constituintes, variações no pH ou diferenças na proporção dos ingredientes. De acordo com Lana et al. (2024), o processamento mecânico e a exposição ao oxigênio durante a homogeneização da massa podem induzir a oxidação de flavonoides.

Ainda assim, os valores observados para as massas alimentícias deste estudo foram superiores aos reportados por Oniszczyk et al. (2019) em massas enriquecidas com castanhas, o que reforça o potencial do coproduto avaliado como veículo de compostos

funcionais. Por outro lado, Smuda, Mohamed e Abdelmaksoud (2024), ao desenvolverem uma massa sem glúten enriquecida com grão-de-bico, alfarroba e beterraba, reportaram teor de flavonoides de $72,16 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$, valor substancialmente superior ao encontrado no presente estudo.

Quanto à atividade antioxidante total, as massas alimentícias frescas apresentaram uma redução drástica em relação ao coproduto (que possuía $31,83 \text{ } \mu\text{M Trolox} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$). Nas massas, os valores variaram entre 0,02 e $1,28 \text{ } \mu\text{M Trolox} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$, sem diferença estatística entre as formulações ($p > 0,05$). Essa perda expressiva pode ser explicada pelo efeito da água livre na massa fresca (A_w de 0,99), que facilita reações degradativas, e pela possível complexação dos antioxidantes com a rede proteica e amilácea formada.

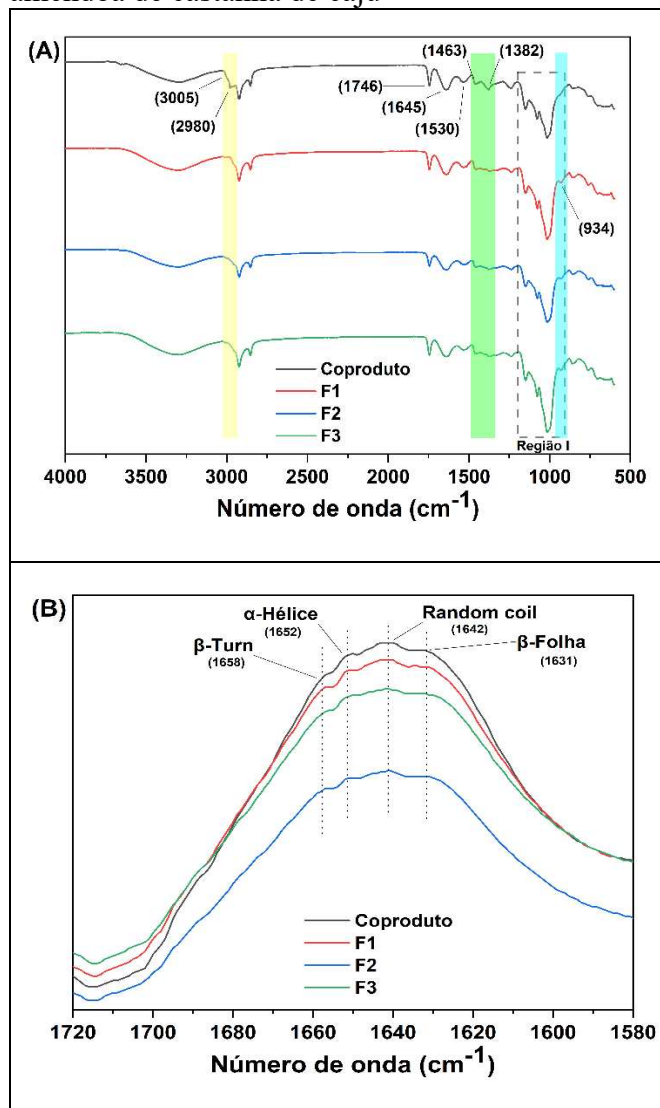
Apesar da redução, a presença de atividade residual é um indicador positivo de funcionalidade. Segundo Musika et al. (2024), massas sem glúten à base de arroz tendem a apresentar baixo potencial antioxidante, o que é amenizado neste estudo pela inclusão do coproduto gerado após processamento dos concentrados proteicos. Mesmo ocorrendo perdas durante o processamento, essas massas apresentaram valores desses compostos superiores aos encontrados em massas convencionais. Portanto, o coproduto conferiu às massas um potencial funcional, mesmo que parcial, comprovando que é possível seu uso como ingrediente no desenvolvimento de alimentos com valor nutricional agregado, auxiliando na proteção contra o estresse oxidativo celular (JI et al., 2024).

5.3.4 Caracterização dos grupos funcionais

A análise por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) permitiu identificar os principais grupos funcionais presentes em massas alimentícias frescas sem glúten à base do coproduto gerado no processamento de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa da castanha de caju (Figura 14).

Os espectros obtidos por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) das formulações de massas alimentícias frescas sem glúten (F1, F2 e F3), apresentadas na Figura 14A, evidenciam perfis espectrais semelhantes, o que é esperado em função da padronização da incorporação de 40% do coproduto gerado do processo de concentração proteica da amêndoa da castanha de caju em todas as formulações. A similaridade entre os espectros indica que as variações observadas decorrem principalmente das diferenças na composição dos demais ingredientes utilizados em cada formulação.

Figura 14 – Análise dos espectros obtidos por espectroscopia de FTIR dos principais grupos funcionais presentes nas massas alimentícias frescas sem glúten à base do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju



A) Gráfico dos compostos no número de ondas de 500 a 4000 cm^{-1} : coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju; F1: (40% coproduto + 10% farinha de arroz + 0% polvilho azedo); F2: (40% coproduto + 5% farinha de arroz + 5% polvilho azedo); F3: (40% coproduto + 0% farinha de arroz + 10% polvilho azedo). B) Ampliação dos estiramentos das vibrações das estruturas secundárias (α -hélice, β -folha, β -turn e *random coil*) no número de ondas de 1580 a 1720. Fonte: elaborada pela autora.

A banda larga em aproximadamente 3500 cm^{-1} (Figura 14A), atribuída ao estiramento de grupos hidroxila ($-\text{OH}$) e amida ($\text{N}-\text{H}$), conforme descrito para o coproduto no item 5.1.5, reflete a natureza hidrofílica das massas. Esta região indica a presença de locais

ativos para a formação de ligações de hidrogênio, fundamentais para a hidratação e o desenvolvimento da textura em produtos sem glúten (LI *et al.*, 2017). A variação da intensidade dessas bandas, pressupõe uma natureza hidrofílica dos componentes das formulações.

Nas regiões de 3005 cm^{-1} (C–H olefínicas) e 2980 cm^{-1} (estiramento de $-\text{CH}_3$), Figura 14A, observa-se que o coproduto apresenta bandas mais intensas em comparação às formulações. Isso sugere que a incorporação dos demais ingredientes (arroz e polvilho) promoveu uma diluição da fração lipídica residual original da amêndoa. Comportamento similar ocorre em 1746 cm^{-1} (C=O de ésteres), onde a redução de intensidade, especialmente na F3, indica um menor teor de triacilgliceróis na matriz final (RODSAMRAN; SOTHORNVIT, 2018). Segundo Carmo *et al.* (2025), a manutenção dessas bandas, ainda que em menor intensidade, é positiva para a palatabilidade, uma vez que os lipídios residuais auxiliam na lubrificação da massa.

A integridade das proteínas nas massas foi confirmada pelas bandas Amida I (1645 cm^{-1}) e Amida II (1530 cm^{-1}). A permanência da banda Amida I com intensidade significativa em todas as formulações comprova que o alto teor proteico do coproduto ($25,01\text{ g}\cdot 100\text{ g}^{-1}$) foi efetivamente transferido para o produto final (MIRANDA *et al.*, 2023a). O detalhamento da Amida I (Figura 14B) e o ajuste matemático ($R^2 > 0,999$) permitiram compreender a distribuição conformacional das proteínas após a incorporação na matriz e sua interação com outros ingredientes (Tabela 14).

Tabela 14 – Estrutura secundária de proteínas das massas alimentícias frescas sem glúten à base do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju

Estruturas Secundárias (%)*	α-Hélice	β-Folha	β-Turn	<i>Random coil</i>	R^2
Formulação 1	10,42	59,28	14,86	15,44	0,9993
Formulação 2	10,22	54,64	16,82	18,33	0,9993
Formulação 3	10,40	51,49	17,42	17,72	0,9994

Estruturas secundárias no coproduto: α -Hélice (13,90%); β -Folha (45,40%); β -Turn (21,25%) e *Random coil* (19,45%).

*Massas alimentícias frescas sem glúten, em sua forma crua: Formulação 1 (40% coproduto + 10% farinha de arroz + 0% polvilho azedo), Formulação 2 (40% coproduto + 5% farinha de arroz + 5% polvilho azedo), Formulação 3 (40% coproduto + 0% farinha de arroz + 10% polvilho azedo).

Fonte: elaborada pela autora.

Observou-se que a β -Folha tornou-se a conformação majoritária em todas as

massas (51,49% a 59,28%), em relação ao coproduto isolado (45,40%). A Formulação 1 (59,28%) exibiu o maior percentual desta estrutura. O aumento da β -Folha nas massas, em comparação à matéria-prima, indica um aumento na agregação proteica e na formação de redes interconectadas durante a hidratação e mistura, conferindo estabilidade térmica e rigidez estrutural à massa (ZHAO et al., 2011). Segundo Carmo et al. (2025) e Zhao et al. (2011), teores elevados de β -Folha estão frequentemente associados a uma maior estabilidade térmica e rigidez estrutural, o que é altamente desejável em massas alimentícias para garantir que o produto mantenha sua integridade durante a cocção.

A redução gradual da β -Folha da Formulação 1 para a Formulação 3 (51,49%), Tabela 14, sugere que o polvilho azedo, por ser um amido com características expansivas e maior acidez, pode dificultar levemente a compactação das proteínas em β -Folha quando comparado à farinha de arroz.

Em contrapartida, a proporção de α -Hélice sofreu uma leve redução em relação ao coproduto original (de 13,90% para ~10% nas massas), sugerindo um sutil arranjo das estruturas intracadeia durante a homogeneização da massa, contribuindo para a formação da nova matriz polimérica.

As estruturas de β -Turn e *Random Coil* representam as frações menos ordenadas da proteína. Nas massas, os valores de β -Turn (14,86% a 17,42%), Tabela 14, foram inferiores aos do coproduto (21,25%), sugerindo que parte dessas alças de conexão se reorganizou em estruturas mais estáveis (β -Folha) ao formarem a matriz da massa. Essas conformações, nas massas, em número equilibrado, são essenciais para garantir a flexibilidade e elasticidade tecnológica do produto (HONG et al., 2025).

Já os valores de *Random Coil* mantiveram-se relativamente estáveis (15,44% a 18,33%), em relação ao coproduto (19,45%). A manutenção dessa fração desordenada é importante para a flexibilidade da massa. De acordo com Hong et al. (2025), um equilíbrio entre estruturas ordenadas β -Folha e desordenadas é o que permite que proteínas vegetais atuem como agentes estruturantes eficazes, conferindo ao mesmo tempo firmeza e elasticidade, propriedades essenciais para a qualidade tecnológica de massas sem glúten.

Na região de "impressão digital" (1200–900 cm^{-1}), a Formulação 1 apresentou maior intensidade de absorção nos picos de 1077 e 1016 cm^{-1} (estiramentos C–O e C–C do amido). Isso se deve à maior participação da farinha de arroz, naturalmente mais rica em amido do que o polvilho azedo e o coproduto (BHUIYAN; NGADI, 2023). Em contraste, as formulações 2 e 3 exibiram perfis mais próximos ao do coproduto, indicando uma matriz com menor predominância amilácea e maior contribuição relativa das fibras residuais da amêndoa

(v C–O e C–O–C).

A sobreposição dos espectros dos ingredientes individuais com as formulações finais (Figura 15) confirma que a interação entre o coproduto e os amidos ocorre majoritariamente por forças físicas e ligações de hidrogênio, sem a detecção de novos picos que indiquem ligações covalentes de síntese fortes entre as proteínas e os amidos.

Figura 15 – Análise dos espectros obtidos por espectroscopia de FTIR dos principais grupos funcionais presentes nos ingredientes utilizados nas massas alimentícias frescas sem glúten à base do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju

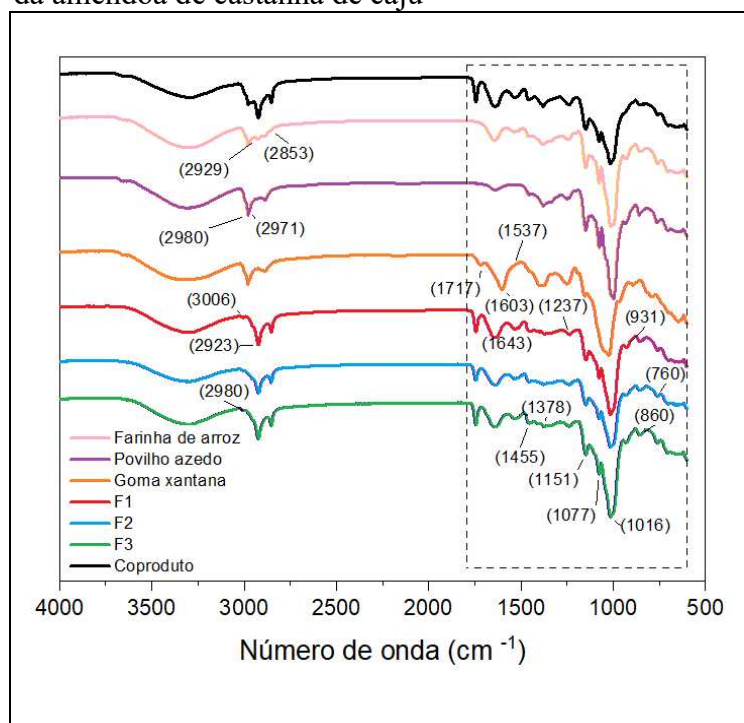


Gráfico dos compostos no número de ondas de 500 a 4000 cm^{-1} das formulações de massas alimentícias sem glúten à base de coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju e seus ingredientes (coproduto, farinha de arroz; póvilho azedo e goma xantana).

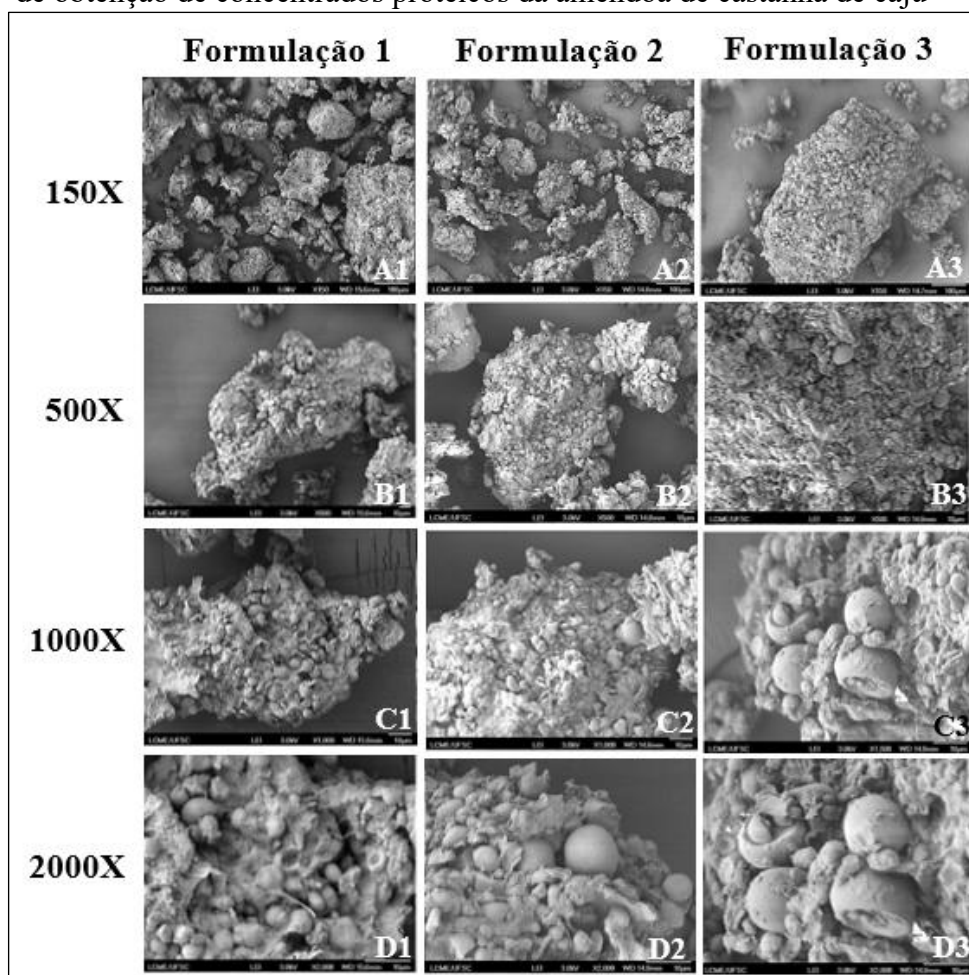
Fonte: elaborada pela autora.

A coexistência de grupos hidrofílicos, alifáticos e peptídicos consolida o potencial do coproduto como um ingrediente estruturante multimodal. As propriedades finais das massas, como a capacidade de absorção de água e a textura após a cocção, serão governadas pelas características individuais de cada polímero preservado na matriz e pelas interações de baixa energia (ligações de hidrogênio e forças físicas), garantindo um produto *plant-based* com integridade estrutural após a cocção (BORBA; GOMEZ-ZAVAGLIA, 2023).

5.3.5 Caracterização das microestruturas

A Figura 16 apresenta as caracterizações morfoestruturais das massas alimentícias frescas sem glúten, em sua forma crua, (Formulação 1, Formulação 2 e Formulação 3), respectivamente, evidenciando a organização espacial da matriz e a interação entre os grânulos de amido e a rede proteica do coproduto gerado no processo de concentração de proteínas da amêndoa de castanha de caju.

Figura 16 – Micrografias por microscopia eletrônica de varredura (MEV) das massas alimentícias sem glúten à base do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju



Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da massa alimentícia frescas sem glúten F[X], formulada com 40% de coproduto da amêndoa de castanha de caju (ACC) e diferentes proporções de farinha de arroz e polvilho azedo: Formulação 1 (40% coproduto + 10% farinha de arroz + 0% polvilho azedo), Formulação 2 (40% coproduto + 5% farinha de arroz + 5% polvilho azedo), Formulação 3 (40% coproduto + 0% farinha de arroz + 10% polvilho azedo).

As imagens evidenciam a organização morfoestrutural da matriz e as interações entre os grânulos de amido e a rede proteico-fibrosa do coproduto. Aumento: (A) 150×, (B) 500×, (C) 1000× e (D) 2000×.

Fonte: elaborada pela autora.

A microestrutura da formulação 1 (Figura 16 A1 a D1) refletiu diretamente as características morfológicas do coproduto observadas na Figura 13. Em 150× (Figura 16 A1), são visíveis agregados irregulares com menos espaços vazios, além do início da formação de uma estrutura mais compacta, ainda que com porosidades remanescentes. Esse comportamento sugere um sistema em que a fase particulada apresenta melhor empacotamento em comparação ao coproduto isolado, embora ainda mantenha certa heterogeneidade estrutural. Tal padrão já foi descrito em massas sem glúten formuladas predominantemente com farinhas ricas em amido, como a farinha de arroz, especialmente na ausência de agentes estruturantes ou amidos modificados (SIVARAMAKRISHNAN; SENGE; CHATTOPADHYAY, 2004).

Em 500× (Figura 16 B1), os grânulos de amido de arroz apareceram parcialmente expostos, com recobrimento incompleto pela matriz proteico-fibrosa do ACC, indicando interações limitadas entre as fases amilácea e proteica. Nas ampliações de 1000× e 2000× (Figuras 16 C1 e D1, respectivamente), observou-se uma rede descontínua, com microfissuras e vazios intergranulares, resultado compatível com sistemas sem glúten nos quais a estrutura depende predominantemente de interações físicas fracas (MARTI; PAGANI, 2013). A literatura indica que essa configuração estrutural está associada a menor coesão da massa, maior fragilidade mecânica e maior susceptibilidade à perda de sólidos durante o cozimento (ROSELL; MARCO, 2008).

A formulação 2 apresentou evolução evidente na organização morfoestrutural. Na ampliação de 150× (Figura 16 A2), a matriz mostrou-se mais compacta e contínua, sugerindo melhor integração entre seus constituintes. Os agregados apresentaram-se maiores e mais densos, com menor ocorrência de espaços vazios e maior incidência de grânulos esféricos bem definidos. Esse comportamento pode ser atribuído à presença do polvilho azedo, cuja capacidade de expansão e gelatinização favorece a formação de uma rede mais coesa em sistemas sem glúten (DEMIATE; KOTOVICZ, 2011).

Na ampliação de 500× (Figura 16 B2), observou-se maior recobrimento dos grânulos de amido pela matriz constituída por proteínas e fibras do coproduto de ACC, comportamento coerente com a morfologia porosa e rugosa previamente observada (Figura 13), a qual favorece interações interfaciais e retenção de água. Nas ampliações de 1000× e 2000× (Figuras 16 C2 e 16 D2, respectivamente), a rede proteico-amilácea apresentou-se mais interconectada e com redução significativa dos vazios estruturais.

Estudos envolvendo massas enriquecidas com coprodutos vegetais ricos em fibras e proteínas relatam que essa configuração estrutural está associada à melhoria da estabilidade

da massa e do desempenho tecnológico, especialmente quanto à textura e à retenção de sólidos durante o cozimento (BOUKID et al., 2017; SABANIS; TZIA, 2011).

A formulação 3 apresentou a organização morfoestrutural mais coesa e estruturada entre as amostras avaliadas. Na ampliação de 150× (Figura 16 A3), a matriz evidenciou elevada compactação e continuidade, com grânulos esféricos maiores e mais numerosos, indicando interação mais eficiente entre o polvilho azedo e o coproduto de ACC. Na ampliação de 500× (Figura 16 B3), observou-se que os grânulos de amido estavam fortemente ancorados à matriz proteico-fibrosa, distribuídos de forma homogênea e com reduzida presença de regiões porosas abertas. Nas ampliações de 1000× e 2000× (Figuras 16 C3 e 16 D3, respectivamente), verificou-se a formação de uma rede contínua e densamente interconectada, na qual as microcavidades do coproduto — previamente evidenciadas na Figura 13 — parecem atuar como sítios de ancoragem para a fase amilácea gelatinizada.

Esse comportamento é consistente com estudos que demonstram que coprodutos vegetais com elevada rugosidade superficial e porosidade favorecem maior interação interfacial e formação de matrizes estruturais mais resistentes em massas sem glúten (BRENNAN; TUDORICA, 2008; CARMO et al., 2025). Tal configuração estrutural está associada a maior resistência mecânica, menor perda de sólidos e maior firmeza após o cozimento, atributos tecnológicos desejáveis nesse tipo de produto.

De forma integrada, os resultados demonstraram que a morfologia intrínseca do coproduto, caracterizada por superfície rugosa, estrutura porosa e preservação das fibras, exerceu papel determinante na organização da matriz das massas sem glúten. A evolução estrutural observada da Formulação 1 para a Formulação 3 indica que a substituição progressiva da farinha de arroz por polvilho azedo potencializou o aproveitamento das propriedades tecnofuncionais do coproduto, promovendo interações mais eficientes entre amido, proteínas e fibras, conforme descrito na literatura para sistemas sem glúten enriquecidos com coprodutos vegetais.

A convergência dos dados espectroscópicos e morfológicos confirma a viabilidade tecnológica das formulações. A ausência de fendas profundas ou separação nítida de fases nas micrografias demonstra que a homogeneização e o uso da goma xantana foram eficazes em promover a coesão física entre os polímeros. Essa organização macroscópica está em estrita consonância com os dados de FTIR, nos quais o predomínio de estruturas secundárias do tipo β -folha sinaliza uma agregação proteica estável, conferindo integridade física à matriz.

Do ponto de vista tecnológico, essa morfologia densa e bem estruturada é um

indicativo de qualidade superior para massas sem glúten. A rede proteica derivada do coproduto de castanha de caju atua como uma barreira física resiliente durante a cocção, sendo capaz de limitar o inchamento excessivo dos grânulos de amido e reduzir a perda de sólidos na água. Como resultado, a massa preserva sua forma, firmeza e textura desejáveis mesmo após o tratamento térmico.

5.4 Propriedades tecnofuncionais das farinhas de massas alimentícias

Os resultados das propriedades tecnofuncionais das farinhas de massas alimentícias estão apresentados na Tabela 15. A análise estatística das propriedades tecnofuncionais dessas amostras evidencia que as formulações não se comportaram de maneira uniforme, sendo possível distinguir grupos estatisticamente semelhantes e diferentes do ponto de vista funcional, sendo possível identificar quais parâmetros diferenciam estatisticamente os sistemas e quais refletem a contribuição do coproduto da concentração proteica da amêndoa de castanha de caju, bem como as interações entre proteínas, fibras e frações amiláceas da farinha de arroz e do polvilho azedo.

Tabela 15 – Propriedades tecnofuncionais das farinhas de massas alimentícias à base do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju

Determinações ^{*,**}	Formulação 1	Formulação 2	Formulação 3
Densidade aparente (g.mL ⁻¹)	0,59 ± 0,01 a	0,58 ± 0,01 a	0,55 ± 0,01 b
Solubilidade em água (g. 100 g ⁻¹)	5,81 ± 0,44 c	8,45 ± 0,21 a	6,47 ± 0,16 b
Capacidade de absorção de água (g.g ⁻¹)	2,54 ± 0,09 a	2,42 ± 0,05 a	2,52 ± 0,07 a
Capacidade de absorção de óleo (g.g ⁻¹)	0,82 ± 0,13 a	0,76 ± 0,05 a	0,80 ± 0,07 a
Poder de intumescimento (g.g ⁻¹)	0,44 ± 0,01 c	0,55 ± 0,01 b	0,58 ± 0,01 a

Farinhas para massas alimentícias sem glúten: Formulação 1 (40% coproduto + 10% farinha de arroz + 0% polvilho azedo); Formulação 2 (40% coproduto + 5% farinha de arroz + 5% polvilho azedo); Formulação 3 (40% coproduto + 0% farinha de arroz + 10% polvilho azedo).

*Resultados expressos como média ± desvio padrão de determinações em quintuplicata

**Médias seguidas por letras iguais, na mesma linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância (p > 0,05).

Fonte: elaborada pela autora.

Esses resultados reforçam que pequenas variações na matriz amilácea, quando associadas a um coproduto funcionalmente ativo, são suficientes para promover alterações estruturais mensuráveis. Conforme discutido por Pontes (2024), essas propriedades são altamente dependentes das interações físico-químicas entre macromoléculas e da estrutura

induzida pelos processos de extração e formulação, sendo determinantes para o desempenho da solubilidade, hidrofobicidade, capacidade de absorção de água e óleo, viscosidade e formação de espumas de massas alimentícias.

A densidade aparente (0,55 a 0,59 g.mL⁻¹) apresentou diferença estatisticamente significativa apenas para a Formulação 3, que exibiu valor inferior às Formulações 1 e 2 ($p < 0,05$) (Tabela 15), as quais não diferiram entre si. Esse comportamento indica que a variação observada não decorre do coproduto em si, uma vez que este apresentou densidade ainda menor (0,44 g.mL⁻¹), quando avaliado isoladamente, mas sim da interação entre o coproduto e a matriz amilácea. A estrutura porosa e menos compacta do coproduto, resultante do processo de extração proteica, favorece a redução da densidade do sistema, efeito que se torna mais evidente quando associado ao polvilho azedo, o qual potencializou a formação de uma farinha mais leve, refletindo posteriormente em maior reorganização estrutural da massa durante a cocção (OYEYINKA; BASSEY, 2025).

A interação entre água/óleo e as farinhas utilizadas como ingredientes geralmente está ligada às propriedades funcionais. Elas são associadas a características como estrutura proteica, propriedades reológicas, densidade proteica e consistência com outros ingredientes alimentares. Portanto, a capacidade de ligação de água e óleo depende de fatores intrínsecos como a composição de aminoácidos, a conformação da proteína e a polaridade ou hidrofobicidade da superfície (KAKAR et al., 2022).

A capacidade de absorção de água das farinhas manteve-se elevada e estatisticamente semelhante entre as formulações (2,42 a 2,54 g.g⁻¹) (Tabela 15), embora inferior à observada para o coproduto isolado (3,44 g.g⁻¹). Essa redução era esperada, uma vez que a menor proporção relativa das frações fibrosa e proteica na matriz, em decorrência da maior participação do amido, tende a reduzir o número de sítios disponíveis para ligação com a água.

Ainda assim, os valores obtidos da capacidade de absorção de água indicam bom potencial tecnológico, especialmente para massas sem glúten, nas quais a retenção de água é essencial para a formação de uma matriz coesa e estável, fundamentais para manter a viscosidade, textura e rendimento em produtos cozidos (TORRES; LEMA; GALEANO, 2021). Segundo Carmo (2024), ingredientes derivados da ACC com elevada capacidade de absorção de água são estratégicos para compensar a ausência do glúten, favorecendo maciez e reduzindo perdas estruturais durante a cocção.

De forma semelhante, a capacidade de absorção de óleo (0,76 a 0,82 g.g⁻¹), (Tabela 15), não diferiu significativamente entre as formulações. Os valores observados nas

farinhas foram inferiores ao do coproduto isolado ($1,01 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$), o que pode ser atribuído à menor proporção relativa de proteínas na matriz, em decorrência da maior participação da fração amilácea. Essa alteração composicional reduz a densidade de grupos hidrofóbicos disponíveis para interação com lipídios. Ainda assim, mesmo em níveis mais baixos, essa propriedade permanece funcionalmente relevante, contribuindo para a retenção de compostos lipossolúveis e para a melhoria da palatabilidade. Estudos indicam que proteínas de oleaginosas, como as da ACC, mantêm afinidade por lipídios mesmo após processos de extração, favorecendo sua aplicação em produtos *plant-based* com melhor perfil sensorial (LIU et al., 2018; CARMO et al., 2025).

Por fim, o poder de intumescimento apresentou diferenças estatisticamente significativas entre todas as formulações ($p < 0,05$), aumentando progressivamente da Formulação 1 ($0,44 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$) para a Formulação 3 ($0,58 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$) (Tabela 15), acompanhando o incremento da proporção de polvilho azedo. Esse comportamento evidencia a contribuição do amido fermentado na expansão volumétrica do sistema, resultado da maior mobilidade das cadeias de amilopectina durante o aquecimento. Embora os valores observados para o poder de intumescimento sejam inferiores aos de farinhas ricas em amido puro, a combinação entre intumescimento moderado e elevada absorção de água do coproduto ($0,77 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$), sugere um efeito sinérgico importante para a estabilidade das massas. Hwang et al. (2022) destacam que sistemas ricos em fibras e proteínas tendem a apresentar intumescimento controlado, o que é desejável para evitar colapso estrutural e perda excessiva de sólidos.

5.5 Qualidade de cocção

Os parâmetros de qualidade de cocção das massas alimentícias encontram-se compilados na Tabela 16. Os dados revelam que, apesar de compartilharem o mesmo tempo de cocção ideal, as formulações diferem significativamente quanto à capacidade de hidratação, expansão e estabilidade estrutural sob tratamento térmico. Tais variações decorrem da interação entre o coproduto da amêndoa de castanha de caju e a matriz amilácea, o que modula as propriedades tecnofuncionais e, por conseguinte, influencia a aceitabilidade sensorial do produto (SHOLICHAH et al., 2021).

O tempo de cocção ideal permaneceu constante em 2 minutos para todas as formulações (Tabela 16). Esse resultado indica que a incorporação do coproduto, mantido em proporção constante, contribuiu para uma taxa de gelatinização e amolecimento da massa semelhante entre os sistemas, independentemente da variação da fonte amilácea. A elevada

capacidade de absorção de água do coproduto favoreceu a rápida hidratação da matriz, reduzindo o tempo necessário para que a massa atingisse o ponto ideal de cocção. Rocha (2020), ao desenvolver uma formulação de massa alimentícia sem glúten à base de amido extraído da semente de jaca, obteve o tempo de cocção ideal de 10 minutos, superior ao encontrado neste estudo, o que pode estar relacionado às diferenças na composição dos ingredientes utilizados.

Tabela 16 – Qualidade de cocção das massas alimentícias à base do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju

Determinações^{*,**}	Formulação 1	Formulação 2	Formulação 3
Tempo de cocção ideal (min)	2,00 ± 0,01 a	2,00 ± 0,01 a	2,00 ± 0,01 a
Aumento de peso (g.100 g ⁻¹)	29,59 ± 0,27 c	30,43 ± 0,06 b	34,05 ± 0,01 a
Aumento de volume (g.100 g ⁻¹)	31,48 ± 0,07 b	31,53 ± 0,11 b	32,57 ± 0,05 a
Perda de massa (g.100 g ⁻¹)	0,30 ± 0,01 c	0,31 ± 0,01 b	0,38 ± 0,01 a

Massas alimentícias frescas sem glúten, em sua forma crua: Formulação 1 (40% coproduto + 10% farinha de arroz + 0% polvilho azedo); Formulação 2 (40% coproduto + 5% farinha de arroz + 5% polvilho azedo); Formulação 3 (40% coproduto + 0% farinha de arroz + 10% polvilho azedo).

* Resultados expressos como média ± desvio padrão de determinações em quintuplicata

** Médias seguidas por letras iguais, na mesma linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância ($p > 0,05$).

Fonte: elaborada pela autora.

Em contrapartida, o aumento de peso apresentou diferenças estatisticamente significativas entre todas as formulações ($p < 0,05$), com valores crescentes da Formulação 1 (29,59 g.100 g⁻¹) para a Formulação 3 (34,05 g.100 g⁻¹) (Tabela 16). Esse comportamento está diretamente associado à maior capacidade de absorção de água e ao maior poder de intumescimento das formulações com maior teor de polvilho azedo. A Formulação 3, que apresentou maior intumescimento (0,58 g.g⁻¹), absorveu maior quantidade de água durante a cocção, resultando em maior ganho de peso. Valor semelhante de aumento de peso (32,87%) foi obtido por Pontes (2024) na massa alimentícia elaborada com adição de 30% de farinha de tremço. Em suma, os resultados apresentados estão alinhados com as propriedades tecnofuncionais das massas, nas quais a expansão do sistema ocorre em função da gelatinização do amido e da retenção hídrica promovida pela fração proteico-fibrosa do coproduto (ITUSACA-MALDONADO et al., 2024; JONGRATTANAVIT; PINKAEW, 2025).

De forma semelhante, o aumento de volume também apresentou diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$), com a Formulação 3 (32,57 g.100 g⁻¹) exibindo valor

superior às Formulações 1 (31,48 g.100 g⁻¹) e Formulação 2 (31,53 g.100 g⁻¹) (Tabela 16), que não diferiram entre si. Esse resultado indica que o incremento do polvilho azedo favoreceu a expansão volumétrica da massa durante a cocção. Contudo, a presença do coproduto atuou como elemento estruturante, limitando a expansão excessiva e contribuindo para a manutenção da forma da massa, o que é desejável em produtos sem glúten. Com relação ao aumento de volume, valor inferior aos desta pesquisa (2,12%) foi obtido por Rocha (2020) na massa alimentícia sem glúten à base de amido extraído da semente de jaca.

A perda de sólidos durante a cocção apresentou diferenças estatisticamente significativas entre as formulações ($p < 0,05$), com um aumento progressivo da Formulação 1 (0,30 g.100 g⁻¹) para a Formulação 3 (0,38 g.100 g⁻¹) (Tabela 16). Observou-se que, embora a Formulação 3 tenha exibido maior capacidade de hidratação e expansão, esse comportamento resultou em uma maior lixiviação de sólidos para a água. Contudo, os valores absolutos permaneceram baixos em todas as amostras, sugerindo uma integridade estrutural satisfatória, atribuída à atuação do coproduto como agente de coesão na matriz amilácea.

As perdas de massa durante o cozimento são um critério essencial de desempenho, influenciando a percepção do consumidor e o rendimento industrial. Esse parâmetro decorre, primordialmente, da dissolução e liberação de amidos gelatinizados da superfície da massa (HUSSEIN et al., 2025). Para produtos considerados de alta qualidade, a literatura estabelece que a liberação de matéria seca não deve exceder 8% (CHOPERA et al., 2024), patamar respeitado por todas as formulações deste estudo. Os resultados obtidos foram superiores (ou seja, apresentaram menores perdas) aos relatados por Smuda, Mohamed e Abdelmaksoud (2024), que observaram uma perda de 6,23% em massas sem glúten enriquecidas com farinha de grão-de-bico, alfarroba e espinafre.

Vale ressaltar que, em produtos isentos de glúten, a ausência de uma rede proteica estruturante geralmente predispõe a massa a uma menor estabilidade e maior perda de componentes solúveis (ZHAO et al., 2024). Entretanto, o desempenho positivo das formulações desenvolvidas pode ser explicado pela presença de hidrocolóides, como a goma xantana. Essa goma atua na formação de uma rede com comportamento de gel durante o tratamento térmico, conferindo coesão estrutural e restando eficazmente os sólidos na matriz (ALINOVI et al., 2023).

5.6 Cor

A cor é um atributo fundamental na aceitação de massas alimentícias frescas,

sendo diretamente influenciada pelos ingredientes utilizados e pelo processamento térmico. Os parâmetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* , C^* e h°) das massas alimentícias sem glúten frescas, cruas e cozidas, estão apresentados na Tabela 17. Para uma compreensão integral do comportamento da cor na matriz alimentar fresca e crua, faz-se necessário correlacionar esses resultados com os valores obtidos para a matéria-prima base (coproduto gerado do processo de concentração de proteínas da amêndoa de castanha de caju), cujos dados foram discutidos anteriormente no item 5.1.1.

Tabela 17 – Parâmetros de cor das massas alimentícias frescas sem glúten, em suas formas cruas e cozidas, elaboradas à base do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju

Parâmetros ^{2,3,4}	Massas alimentícias frescas sem glúten cruas ¹		
	Formulação 1	Formulação 2	Formulação 3
L^*	66,72 ± 0,33 a	61,65 ± 0,30 c	63,13 ± 0,78 b
a^*	1,45 ± 0,03 a	1,51 ± 0,04 a	1,57 ± 0,06 a
b^*	10,65 ± 0,29 a	10,24 ± 0,16 a	10,21 ± 0,11 a
C^*	10,74 ± 0,29 a	10,35 ± 0,17 a	10,33 ± 0,12 a
Hue (h°)	82,21 ± 0,11 a	81,60 ± 0,10 b	81,25 ± 0,25 b
	Massas alimentícias frescas sem glúten cozidas ¹		
	Formulação 1	Formulação 2	Formulação 3
L^*	65,41 ± 0,86 a	65,52 ± 0,89 a	66,93 ± 0,67 a
a^*	0,95 ± 0,42 a	0,78 ± 0,23 a	0,68 ± 0,16 a
b^*	7,77 ± 1,15 a	8,01 ± 0,58 a	7,87 ± 0,51 a
C^*	7,83 ± 1,19 a	8,05 ± 0,59 a	7,90 ± 0,52 a
Hue (h°)	83,24 ± 2,06 a	84,50 ± 1,23 a	85,08 ± 0,94 a

¹ Massas Alimentícias fresca sem glúten, em suas formas cruas e cozidas: Formulação 1 (40% ACC + 10% farinha de arroz + 0% polvilho azedo); Formulação 2 (40% ACC + 5% farinha de arroz + 5% polvilho azedo); Formulação 3 (40% ACC + 0% farinha de arroz + 10% polvilho azedo).

² L^* : luminosidade (0 = preto; 100 = branco); a^* : variação do verde (-) ao vermelho (+); b^* : variação do azul (-) ao amarelo (+); C^* : croma, indica a intensidade/saturação da cor; Hue (h°): ângulo de matiz, define a tonalidade predominante da cor.

³ Resultados expressos como média ± desvio padrão de determinações em quintuplicata.

⁴ Médias seguidas por letras iguais, na mesma linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância ($p > 0,05$).

Fonte: elaborada pela autora.

Ao comparar a cor das massas alimentícias sem glúten frescas, em sua forma crua, com a do coproduto puro, observa-se um impacto imediato da etapa de mistura e hidratação. O coproduto apresentou elevada luminosidade ($L^* = 77,34$), característica de pós finos que refletem a luz de forma difusa. Após a incorporação de água e dos demais ingredientes (farinha de arroz e polvilho), verificou-se redução nos valores de L^* nas massas frescas cruas, que oscilaram entre 61,65 e 66,72 (Tabela 17).

Esse escurecimento aparente constitui um fenômeno físico esperado na formação de massas alimentícias e pode ser explicado pela substituição das interfaces ar-sólido por interfaces água-sólido (JUNTUNEN et al., 2024). A água altera o índice de refração da superfície e preenche os espaços intergranulares, aumentando a absorção de luz pela matriz e reduzindo sua refletância (WANG et al., 2021).

Além disso, deve-se considerar a natureza bioquímica do coproduto. Por ser rico em substratos fenólicos e enzimas, como a polifenoloxidase, a exposição ao oxigênio e à umidade durante o boleamento pode ter desencadeado reações iniciais de escurecimento enzimático, contribuindo para os menores valores de L^* observados nas massas em comparação ao pó seco.

No que tange à influência específica dos ingredientes amiláceos na luminosidade das massas alimentícias frescas cruas, observou-se uma diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$) entre as formulações (Tabela 17). A Formulação 1, contendo 10% de farinha de arroz e isenta de polvilho azedo, destacou-se pela maior luminosidade (66,72). Esse resultado evidencia a contribuição da farinha de arroz como um agente de opacidade. Os grânulos de amido de arroz são conhecidos por sua dimensão reduzida e alta capacidade de dispersão de luz, o que confere uma coloração branca intensa ("*whitening effect*") que atenua a cor natural mais escura do coproduto nas formulações.

Em contrapartida, a substituição parcial ou total da farinha de arroz pelo polvilho azedo (Formulações 2 e 3) resultou em massas frescas cruas com menores valores de L^* (61,65 e 63,13, respectivamente). O polvilho azedo, um amido de mandioca modificado por fermentação e secagem solar, apresenta propriedades ópticas distintas. Quando hidratado, seus grânulos tendem a formar uma rede mais translúcida em comparação à opacidade da farinha de arroz (NDJANG et al., 2025). Essa translucidez permite que a luz penetre mais profundamente na massa crua, sendo absorvida pelos pigmentos do coproduto em vez de ser refletida, resultando em uma percepção visual de menor luminosidade. Portanto, a Formulação 2 (mais escura) reflete o ponto de interação onde a redução da farinha de arroz diminui a

opacidade, enquanto a presença do polvilho favorece a translucidez, expondo a cor de base do coproduto utilizado.

Para as coordenadas cromáticas a^* (verde/vermelho) e b^* (azul/amarelo), bem como para a saturação (C^*), não foram verificadas diferenças significativas ($p > 0,05$) entre as massas alimentícias frescas e cruas. Todas as formulações apresentaram valores positivos para a^* (tendência ao vermelho) e altos valores positivos para b^* (tendência ao amarelo).

A predominância do componente amarelo (b^* , 10,2 – 10,6, Tabela 17) em detrimento do vermelho (a^* , 1,4 – 1,5), é coerente com a coloração natural esperada para produtos derivados da castanha de caju, indicando que o coproduto é o principal determinante da cor base da massa crua. Adicionalmente, esse perfil cromático pode ter sido influenciado por reações oxidativas iniciais, como a oxidação enzimática, durante o boleamento da massa crua, promovendo leve deslocamento da coloração para tons mais saturados de vermelho e amarelo, sobrepondo-se às possíveis variações decorrentes da proporção entre farinha de arroz e polvilho. Bouziane et al. (2024) analisou a massa de arroz e milho sem glúten encontrando valores de 56,7 para L^* e 22,2 para b^* , indicando uma massa de cor clara e amarelada.

O ângulo de matiz (h°) variou entre $81,25^\circ$ e $82,21^\circ$ (Tabela 17), localizando as amostras frescas e cruas no primeiro quadrante do diagrama cromático, próximo ao eixo amarelo (90°). Embora a variação seja sutil, a Formulação 1 diferiu estatisticamente das demais, apresentando uma tonalidade ligeiramente mais afastada do vermelho em comparação às formulações com polvilho.

O processo de cozimento promoveu alterações importantes no perfil de cor das massas alimentícias, revertendo em parte as tendências observadas na massa fresca e distanciando o produto final das características da matéria-prima original. Diferentemente do observado nas massas frescas, a luminosidade (L^*) das massas cozidas não apresentou diferença significativa entre as formulações, variando de 65,41 a 66,93, como também não houve diferença significativa ($p > 0,05$) entre as formulações para nenhum dos outros parâmetros avaliados, indicando que a gelatinização do amido durante a cocção homogeneizou a aparência das amostras, independentemente da proporção arroz/polvilho observadas nas massas cruas.

Ao comparar os estados cru e cozido, nota-se uma redução geral nos valores das coordenadas cromáticas a^* e b^* . O valor de b^* (amarelo), por exemplo, decresceu de uma média próxima a 10,3 (fresca) para cerca de 7,8 (cozida) (Tabela 17). A diminuição da intensidade da cor amarela e da saturação (C^*) após o cozimento é um fenômeno comum em massas alimentícias e pode ser explicada por dois fatores principais: e (ii) alterações

estruturais decorrentes da absorção de água, que promovem expansão da matriz e redistribuição dos pigmentos no interior da estrutura gelatinizada, reduzindo a intensidade cromática por unidade de área analisada (WANG et al., 2024).

Apesar dessa redução na intensidade, o ângulo de matiz aumentou ligeiramente nas massas cozidas ($83,24^\circ - 85,08^\circ$), proximando-se dos valores observados no coproduto ($83,74^\circ$). Esse resultado indica que, embora tenha ocorrido diminuição da saturação, a tonalidade intrínseca associada ao coproduto foi preservada no produto final, mantendo a identidade visual do ingrediente base.

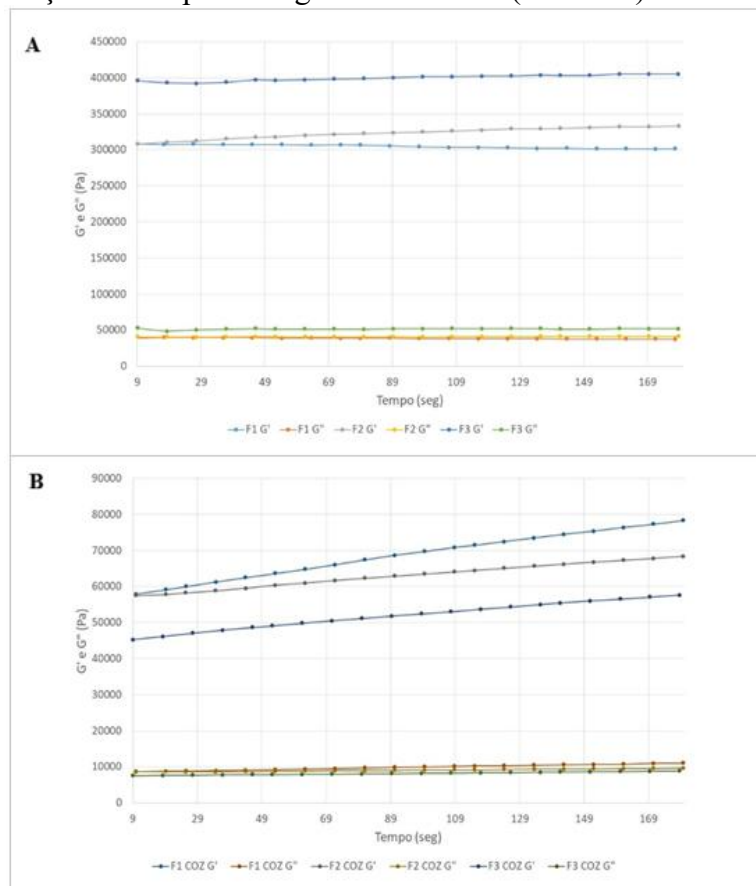
5.7 Comportamento reológico e estabilidade viscoelástica

A Figura 17 apresenta o comportamento reológico das massas alimentícias, em suas forma crua e cozida, avaliado por meio de ensaio de varredura no tempo (*time sweep*), no qual foram monitorados os módulos de armazenamento (G' , associado ao comportamento elástico) e de perda (G'' , associado ao comportamento viscoso). Esse ensaio permitiu avaliar a estabilidade estrutural da rede formada e a natureza viscoelástica do material, que exibiu caráter predominantemente sólido ($G' > G''$) em todas as amostras, ao longo do tempo (0 a 180 s), evidenciando tanto o efeito do processo de cocção sobre as massas quanto as diferenças entre as formulações antes e após o cozimento.

Reologicamente, as características elásticas (deformação recuperável) observadas, predominaram sobre as viscosas (fluxo). Esse comportamento é desejável em massas alimentícias, pois sugere capacidade de manter a forma durante o manuseio e o cozimento. Esse comportamento sugere que a combinação entre proteínas residuais do coproduto, fibras dietéticas e amidos provenientes da farinha de arroz e do polvilho azedo foi eficaz na formação de uma matriz coesa, mesmo na ausência de glúten. Resultados semelhantes foram reportados em sistemas sem glúten nos quais proteínas vegetais e fibras atuam como elementos estruturantes, contribuindo para a resistência mecânica da massa (MIRONEASA; CODINA; UNGUREANU-IUGA, 2019).

No gráfico referente às massas cruas (Formulação 1, Formulação 2 e Formulação3, Figura 17A), observa-se uma magnitude elevada dos módulos elásticos, variando aproximadamente entre 300.000 Pa e 400.000 Pa. As curvas de G' e G'' apresentaram-se praticamente constantes ao longo dos 180 segundos (linhas horizontais). Isso demonstra que a estrutura da massa crua é estável e não sofreu ruptura ou reestruturação significativa sob a tensão oscilatória aplicada durante o tempo do teste.

Figura 17 – Comportamento viscoelástico das massas alimentícias frescas sem glúten (cruas e cozidas) elaboradas com coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju em função do tempo em regime oscilatório (0 a 180 s)



Espectro mecânico das massas alimentícias frescas sem glúten: cruas (A) e cozidas (B), em função da varredura do tempo (0 a 180 s). Módulos de armazenamento (G') e de perda (G'') expressos em Pa. F1 – Formulação 1: 40% ACC + 10% farinha de arroz; F2 – Formulação 2: 40% ACC + 5% farinha de arroz + 5% polvilho azedo; F3 – Formulação 3: 40% ACC + 10% polvilho azedo. Fonte: elaborada pela autora.

Quanto ao efeito dos ingredientes na reologia das massas alimentícias cruas, observa-se uma hierarquia clara na rigidez estrutural: Formulação 3 > Formulação 2 > Formulação 1. A Formulação 3 apresentou os maiores valores de G' (~400.000 Pa), indicando comportamento mais elástico e maior resistência à deformação, ou seja, maior predominância do caráter sólido da matriz. Por outro lado, a Formulação 1 apresentou os menores valores (305.700 Pa), evidenciando estrutura menos rígida.

A maior rigidez observada em F3 pode ser atribuída à maior proporção de polvilho azedo, que contribui para um empacotamento mais eficiente da fase particulada e maior interação física entre amido, proteínas e fibras, mesmo antes da gelatinização. Já a Formulação

2 apresentou valores intermediários (322.800 Pa), sugerindo que a combinação entre farinha de arroz e polvilho azedo resultou em matriz com organização estrutural parcialmente consolidada.

As diferenças observadas podem estar relacionadas à presença de proteínas na farinha de arroz, que interferem na organização do sistema amiláceo ainda não plastificado. Como o amido encontra-se em estado granular na massa crua, sua contribuição estrutural depende majoritariamente do empacotamento físico e das interações intermoleculares, e não de gelatinização, o que explica a variação nos valores de G' entre as formulações (SUN et al., 2023).

Reforçando, a principal diferenciação entre as formulações reside na natureza da fonte amilácea empregada: a farinha de arroz e a fécula de mandioca fermentada, comercialmente denominada polvilho azedo. Esses ingredientes derivam de espécies vegetais distintas, um cereal (*Oryza sativa*) e uma raiz tuberosa (*Manihot esculenta*), e são submetidos a processos tecnológicos diferentes. Enquanto a farinha de arroz é obtida pela moagem mecânica do grão, preservando em sua matriz constituintes como proteínas (predominantemente oryzenina) e fibras, o polvilho azedo é o resultado de um processo de extração da fécula seguido de fermentação natural e secagem solar.

Quimicamente, essa distinção reflete-se na pureza do polímero: a farinha de arroz apresenta teores de amido em torno de 80%, mantendo componentes não amiláceos que exercem influência direta na reologia, ao passo que o polvilho possui uma concentração de amido cerca de 10% superior, caracterizando-se como uma matriz amilácea quase purificada e com propriedades de expansão diferenciadas.

Apesar da pequena concentração, os componentes não amiláceos podem exercer grande influência nas propriedades do amido, principalmente devido à formação de complexos com as cadeias poliméricas de amilose, fenômeno mais frequente em amidos de cereais como trigo, arroz e milho (SUN et al., 2023). Outro aspecto relevante é a própria característica estrutural do amido presente em cada ingrediente.

Marcon et al. (2011), ao analisarem diferentes marcas de polvilho azedo, encontraram teores de amilose variando entre 18 e 22%. A proporção de amilose e amilopectina, bem como a massa molar dessas frações e o tipo de estrutura cristalina (A, B ou C), influenciam diretamente o comportamento do amido na matriz. Antes da plastificação ou gelatinização, essas características determinam o grau de empacotamento granular e a rigidez da rede física formada na massa crua. Após a plastificação, passam a influenciar a viscosidade, a capacidade de retrogradação e a firmeza do produto final.

Quanto à análise das massas cozidas em função da varredura do tempo (0 a 180 s), observou-se que o processo de cozimento alterou drasticamente o perfil reológico das amostras. Houve uma redução significativa na magnitude de G' , caindo de uma faixa de 300.000-400.000 Pa (fresca) para 45.000-80.000 Pa (cozida) (Figura 17 B). Essa queda nos módulos é um fenômeno esperado, decorrente da gelatinização completa dos amidos e da absorção de água, que plastifica a matriz, tornando-a mais macia e menos rígida. Diferentemente das massas frescas, as massas cozidas apresentaram uma inclinação positiva nas curvas de G' ao longo do tempo (as linhas sobem da esquerda para a direita). Isso sugere um processo de reestruturação ou retrogradação inicial rápida do amido logo após o cozimento e resfriamento na placa de medição, resultando em um aumento progressivo da firmeza.

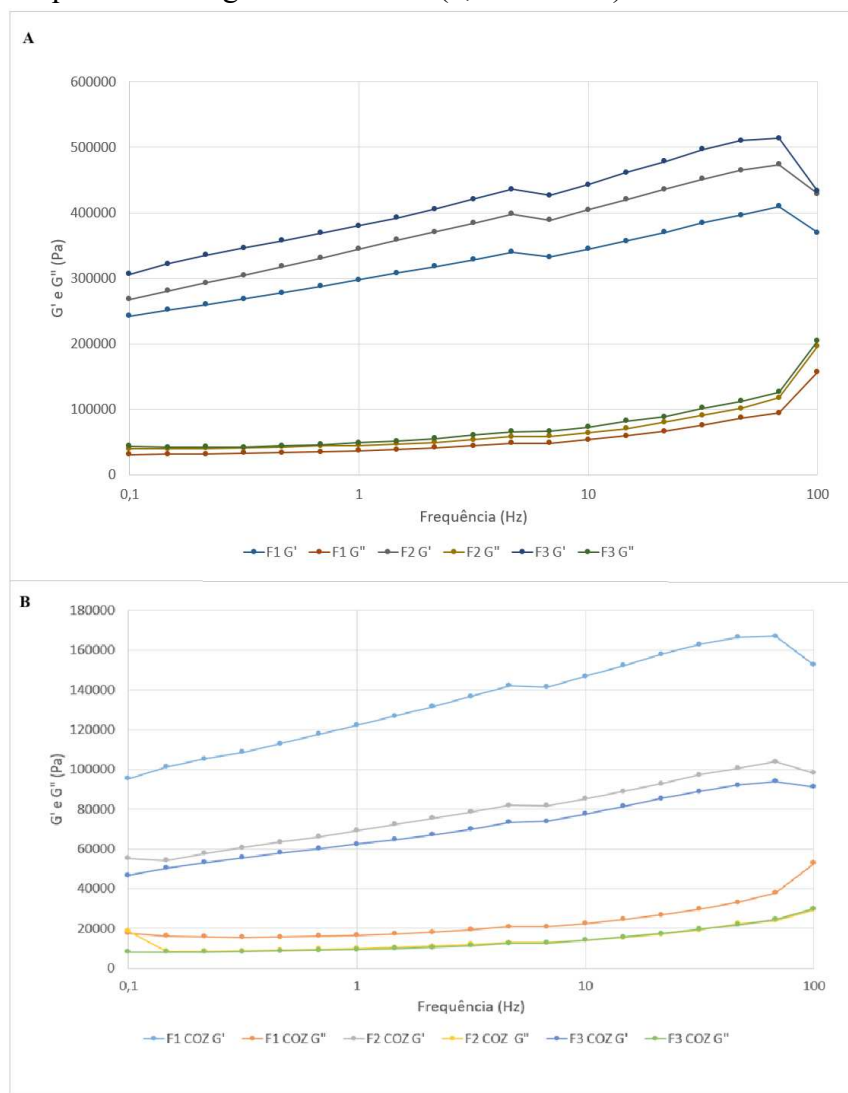
Mesmo após o cozimento, a ordem de elasticidade se manteve: Formulação 3 cozida > Formulação 2 cozida > Formulação 1 cozida. A Formulação 3 cozida atingiu valores de G' próximos a 80.000 Pa ao final do teste, enquanto a Formulação 1 cozida ficou abaixo de 60.000 Pa. Isso comprova que a inclusão do polvilho azedo contribuiu para uma massa cozida mais firme (*al dente*), evitando que o produto se desmanche ou fique excessivamente mole, uma falha comum em massas sem glúten à base apenas de arroz.

A Figura 18 apresenta o comportamento viscoelástico das massas cruas e cozidas em função da frequência oscilatória (0,1 a 100 Hz). Esse ensaio é fundamental para compreender a natureza das interações moleculares da rede (física ou química) e como o material se comporta em diferentes escalas de tempo (frequências baixas simulam repouso ou processos lentos; frequências altas simulam processamento rápido ou mastigação).

Assim como observado na varredura de tempo, os espectros mecânicos de todas as formulações (cruas e cozidas) demonstraram que o módulo de armazenamento (G') permanece superior ao módulo de perda (G'') em toda a faixa de frequência avaliada. A ausência de um ponto de cruzamento (*crossover*) entre G' e G'' indica que não houve transição de fase ou ruptura estrutural sob as frequências aplicadas.

Este perfil, onde $G' > G''$ e ambos os módulos apresentam uma leve dependência da frequência (as curvas sobem suavemente com o aumento dos Hz), é característico de géis fracos ou estruturas de emaranhamento físico. Isso significa que a rede de glúten (substituída aqui pelas proteínas da castanha e amidos) e polissacarídeos é estabilizada por interações físicas (pontes de hidrogênio, forças de Van der Waals) que podem se rearranjar sob tensão, mas mantêm a integridade global do material.

Figura 18 – Comportamento viscoelástico das massas alimentícias frescas sem glúten (cruas e cozidas) elaboradas com coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju em função da frequência em regime oscilatório (0,1 a 100 Hz)



Espectro mecânico das massas alimentícias frescas sem glúten: cruas (A) e cozidas (B) em função da varredura da frequência (0,1 a 100 Hz). Módulos de armazenamento (G') e de perda (G'') expressos em Pa. Formulação 1 (40% ACC + 10% farinha de arroz); Formulação 2 (40% ACC + 5% farinha de arroz + 5% polvilho azedo); Formulação 3 (40% ACC + 10% polvilho azedo).
Fonte: elaborada pela autora.

Nas massas cruas, confirma-se a tendência observada anteriormente: a presença do polvilho azedo fortalece a estrutura. A Formulação 3 (maior teor de polvilho) apresentou os maiores módulos elásticos, situando-se no topo do gráfico (Figura 18 A), seguida pela Formulação 2 e, por fim, a Formulação 1. O aumento progressivo de G' com a frequência sugere que, em tempos de relaxamento muito curtos (altas frequências), a massa se comporta de maneira mais rígida, pois as cadeias poliméricas não têm tempo suficiente para se

desembaraçar ou fluir. A estabilidade da Formulação 3 indica que o polvilho azedo confere uma rede mais elástica e resiliente ao manuseio industrial.

Já para o comportamento das massas cozidas na varredura de frequência (Figura 18 B), foi possível observar nuances interessantes sobre a matriz amilácea gelatinizada e a desnaturação proteica, que resultaram em uma queda acentuada na magnitude de G' e G'' em comparação às massas cruas, confirmando o amolecimento térmico da estrutura. Esse perfil reológico é indicativo de sistemas estruturados, nos quais as interações físicas entre proteínas, fibras e amido são suficientes para compensar a ausência da rede de glúten, conforme observado em estudos com massas sem glúten formuladas com coprodutos agroindustriais (MARTÍNEZ; DÍAZ; GÓMEZ et al., 2014; FOSCHIA et al., 2017).

Diferentemente da varredura de tempo (onde a F3 se mostrou mais rígida) (Figura 17 B), nesse ensaio de frequência, a Formulação 1 (maior teor de farinha de arroz) passou a apresentar maior rigidez residual, com valores elevados de módulo elástico (G') de 68.850 Pa (Figura 18 B), superando a Formulação 3 (51.830 Pa) em diversos pontos da curva. Esse fenômeno pode ser atribuído à natureza do amido de arroz. Por possuir geralmente maior teor proteico e capacidade de formar complexos amilose-lipídio superiores ao da mandioca (polvilho), o arroz tende a formar géis mais rígidos e propensos à retrogradação rápida (*setback*), criando uma estrutura cristalina que responde com alta rigidez às oscilações de frequência (SUN et al., 2023). Já a Formulação 3 (rica em polvilho) cozida, embora tenha mostrado alta estabilidade no tempo, formou um gel que, sob espectro de frequência, apresentou-se ligeiramente menos rígido que o de arroz puro, característica típica de géis de mandioca que são mais "longos" (coesivos e elásticos) porém menos duros que os de cereais.

Em suma, as diferenças observadas entre as formulações podem ser relacionadas às propriedades tecnofuncionais das farinhas utilizadas. A Formulação 3, que apresentou maior poder de intumescimento, também exibiu maiores valores de G' após a cocção, sugerindo maior capacidade de retenção de água e expansão da matriz amilácea. Em contrapartida, formulações com maior teor de farinha de arroz apresentaram comportamento reológico ligeiramente menos rígido, o que pode estar associado à menor contribuição do amido fermentado do polvilho azedo na formação da rede estrutural.

Esses resultados estão diretamente associados à qualidade de cocção das massas. A Formulação 3, embora tenha apresentado maior aumento de peso e volume após a cocção, também exibiu maior perda de massa, indicando que o excesso de intumescimento pode comprometer parcialmente a integridade da matriz, mesmo diante de um comportamento reológico mais rígido. Ainda assim, os valores de perda de massa observados foram baixos

para todas as formulações, o que está em consonância com o perfil reológico observado, no qual a predominância de G' indica uma estrutura capaz de resistir à lixiviação de sólidos durante a cocção (UNGUREANU-IUGA; DIMIAN; MIRONEASA, 2020).

5.8 Perfil de textura instrumental das massas alimentícias: efeito da cocção e da composição da formulação

Os parâmetros do perfil de textura instrumental (TPA) das massas alimentícias, avaliadas nas formas crua e cozida (Tabela 18), evidenciaram o impacto do processo de cocção e da variação na proporção de farinha de arroz e polvilho azedo sobre o comportamento mecânico das formulações, mantendo-se constante o teor do coproduto da amêndoa da castanha de caju.

Tabela 18 – Parâmetros do perfil de textura instrumental das massas alimentícias frescas sem glúten, em suas formas cruas e cozidas, elaboradas à base do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju

Parâmetros ^{**} , ^{***}	Massas alimentícias frescas sem glúten e cruas [*]		
	Formulação 1	Formulação 2	Formulação 3
Dureza (g)	160,92 ± 16,53 a	157,78 ± 18,48 a	149,20 ± 16,53 a
	Massas alimentícias frescas sem glúten e cozidas [*]		
	Formulação 1	Formulação 2	Formulação 3
Dureza (g)	105,27 ± 39,37 a	113,17 ± 62,21 a	110,03 ± 40,38 a
Elasticidade	0,013 ± 0,007 a	0,018 ± 0,005 a	0,014 ± 0,008 a
Coabilidade	0,22 ± 0,04 b	0,26 ± 0,07 ab	0,33 ± 0,05 a
Mastigabilidade (g.mm)	0,30 ± 0,03 a	0,41 ± 0,03a	0,52 ± 0,04 a

*Massas Alimentícias sem glúten: Formulação 1: (40% ACC + 10% farinha de arroz + 0% polvilho azedo); Formulação 2: (40% ACC + 5% farinha de arroz + 5% polvilho azedo); Formulação 3: (40% ACC + 0% farinha de arroz + 10% polvilho azedo).

** Resultados expressos como média ± desvio padrão de determinações em triplicata

*** Médias seguidas por letras iguais, na mesma linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,10$).

Fonte: elaborada pela autora.

Para as massas cruas, o parâmetro dureza não apresentou diferença estatisticamente significativa entre as formulações ($p > 0,10$), com valores médios próximos entre Formulação 1, 2 e 3, variando de 149,20 a 160,92 g (Tabela 18). Esse comportamento indica que, antes da cocção, a estrutura mecânica das massas é predominantemente governada pela matriz úmida formada pela combinação do coproduto proteico-fibroso, água e

hidrocoloide, sendo pouco sensível às variações relativas entre farinha de arroz e polvilho azedo. A ausência de diferenças significativas sugere boa homogeneidade estrutural no estado cru, aspecto desejável para o processamento e a moldagem das massas.

Após a cocção, observou-se redução geral nos valores de dureza (médias entre 105,27 a 113,17 g) em comparação às massas cruas (149,20 a 160,92 g), Tabela 18, refletindo o efeito plastificante da água absorvida e a gelatinização do amido, fenômenos típicos em sistemas de massas. Ainda assim, a dureza não diferiu estatisticamente entre as formulações ($p > 0,10$), indicando que o equilíbrio entre os ingredientes estruturantes foi suficiente para manter consistência semelhante após o cozimento.

Em contraste, a coesividade apresentou diferença significativa entre as formulações, com aumento progressivo da Formulação 1 cozida para a Formulação 3 cozida, sendo a Formulação 3 (0,33) estatisticamente superior à Formulação 1 (0,22) ($p < 0,10$), Tabela 18. Esse resultado indica maior integridade estrutural interna nas massas com maior teor de polvilho azedo, o qual, após a cocção, contribui para a formação de uma rede mais coesa em sistemas sem glúten. A Formulação 2 apresentou comportamento intermediário (0,26), não diferindo significativamente das demais, sugerindo uma condição de transição estrutural.

A elasticidade manteve-se baixa (valores variando de 0,013 a 0,018, Tabela 18) e estatisticamente semelhante entre as formulações ($p > 0,10$), característica típica de massas sem glúten, nas quais a ausência da rede de glúten limita a recuperação elástica após a deformação.

A mastigabilidade apresentou tendência de aumento da Formulação 1 (0,30 g.mm) para a Formulação 3 (0,52 g.mm), embora sem diferença estatística significativa ($p > 0,10$) (Tabela 18). Esse comportamento está associado ao aumento concomitante da coesividade e da dureza, indicando que formulações com maior teor de polvilho azedo demandam maior energia para desintegração durante a mastigação, resultando em uma textura mais firme e estruturada após a cocção.

De forma integrada, os resultados indicam que as massas cruas apresentaram comportamento mecânico semelhante entre as formulações, enquanto as diferenças texturais tornaram-se mais evidentes após a cocção, especialmente no parâmetro coesividade. A Formulação 3 destacou-se por apresentar estrutura interna mais coesa, enquanto a Formulação 1 resultou em massas mais macias, permitindo direcionar a aplicação culinária das massas de acordo com o perfil textural desejado. Esses achados reforçam o papel do polvilho azedo como agente estruturante e demonstram que a incorporação do coproduto proteico não compromete

a qualidade textural das massas sem glúten.

5.9 Qualidade microbiológica

Os resultados da avaliação microbiológica das massas alimentícias cozidas estão apresentados na Tabela 19 e indicam que todas as formulações atenderam aos padrões microbiológicos estabelecidos pela Resolução RDC nº 724/2022 (Brasil, 2022), evidenciando adequada qualidade higiênico-sanitária dos produtos desenvolvidos.

Tabela 19 – Avaliação microbiológica das massas alimentícias à base do coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa de castanha de caju

Análise microbiológica ^{*,**}	Formulação 1	Formulação 2	Formulação 3
<i>Escherichia coli</i> (NMP/g)	< 3	< 3	< 3
Bolores e leveduras (UFC/g)	2,0 x10 ⁴	1,2 x10 ⁴	2,1 x10 ⁴
<i>Staphylococcus aureus</i> (UFC/g)	< 100	< 100	< 100
<i>Salmonella</i> spp. (em 25 g)	Ausência	Ausência	Ausência

Massas Alimentícias sem glúten cozidas: Formulação 1 (40% ACC + 10% farinha de arroz + 0% polvilho azedo); Formulação 2 (40% ACC + 5% farinha de arroz + 5% polvilho azedo); Formulação 3 (40% ACC + 0% farinha de arroz + 10% polvilho azedo).

*Resultados expressos como média de determinações em triplicata.

**Padrões microbiológicos estabelecidos conforme RDC nº 724/2022 (Brasil, 2022).

Fonte: elaborada pela autora.

A contagem de *Escherichia coli* foi inferior a 3 NMP/g em todas as formulações, resultado que indica a adoção eficaz de boas práticas de higiene e de processamento, bem como a ausência de contaminação fecal. A baixa presença desse microrganismo é especialmente relevante em produtos frescos e crus, caracterizados por elevada atividade de água, condição que favorece o crescimento microbiano quando não são observados controles sanitários adequados.

Em relação aos bolores e leveduras, observaram-se valores entre $1,2 \times 10^4$ e $2,1 \times 10^4$ UFC/g, com variação entre as formulações. Embora esses microrganismos estejam associados predominantemente a processos de deterioração e não representem, necessariamente, riscos imediatos à saúde, sua presença é esperada em produtos frescos e minimamente processados. As diferenças observadas podem estar relacionadas às variações na composição das massas, especialmente à proporção de farinha de arroz e polvilho azedo, ingredientes que influenciam tanto o teor de umidade quanto a disponibilidade de substratos fermentescíveis, impactando o crescimento microbiano.

A contagem de *Staphylococcus aureus* coagulase positiva foi inferior a 100 UFC/g

em todas as formulações, atendendo plenamente aos limites estabelecidos pela legislação vigente. Esse resultado reforça a adequação das condições de manipulação e higiene pessoal, uma vez que esse microrganismo é comumente associado à contaminação por manipuladores de alimentos.

A ausência de *Salmonella* spp. em 25 g de amostra em todas as formulações constitui um achado de elevada relevância do ponto de vista da segurança alimentar, considerando que esse patógeno está entre os principais agentes causadores de surtos de doenças transmitidas por alimentos. Esse resultado indica que as etapas de processamento, manipulação e armazenamento foram conduzidas de forma adequada, minimizando riscos à saúde do consumidor.

De forma geral, os resultados demonstram que as três formulações de massas alimentícias sem glúten apresentaram qualidade microbiológica satisfatória, estando aptas para consumo do ponto de vista sanitário. Além disso, os dados indicam que a incorporação do coproduto, nas proporções estudadas, não comprometeu a segurança microbiológica do produto, reforçando seu potencial de aplicação tecnológica no desenvolvimento de massas alimentícias sem glúten.

5.10 Percepção sensorial qualitativa e potencial de aplicação gastronômica das massas alimentícias

A avaliação sensorial de natureza qualitativa, realizada por meio do teste Grupo Focal, permitiu identificar diferenças perceptíveis entre as três formulações de massas alimentícias sem glúten elaboradas com o coproduto gerado no processo de obtenção de concentrados proteicos da amêndoa da castanha de caju, bem como discutir o potencial de aplicação gastronômica dos produtos desenvolvidos.

No que se refere à aparência das massas cruas, a Formulação 1 foi descrita como apresentando maior ressecamento e friabilidade, com tendência à quebra, características associadas à menor capacidade de retenção de água da matriz. Em contraste, a Formulação 2 destacou-se pela aparência mais homogênea e maior firmeza estrutural, sugerindo melhor equilíbrio entre os componentes estruturantes da formulação. A Formulação 3, por sua vez, apresentou aspecto mais úmido, o que resultou em maior pegajosidade, comportamento compatível com o maior teor de polvilho azedo presente na formulação. A coloração mais escura observada nas massas foi associada a produtos de perfil integral e considerada aceitável pelos participantes, sobretudo quando combinada com molhos ou estratégias de embalagem

atrativa, capazes de valorizar visualmente o produto.

Após o processo de cocção, a Formulação 2 manteve-se como a mais bem avaliada, apresentando melhor separação dos fios e superfície mais uniforme, aspectos desejáveis do ponto de vista sensorial e de aplicabilidade culinária. A Formulação 3 demonstrou maior aderência entre os fios, possivelmente em decorrência do aumento da gelatinização do amido, enquanto a Formulação 1 apresentou fios mais soltos, porém com menor integridade estrutural, indicando fragilidade após o cozimento.

Em relação ao aroma e ao sabor, todas as formulações foram descritas como neutras a levemente farináceas, sem presença de aromas desagradáveis ou sabores residuais indesejáveis, característica considerada positiva para produtos baseados em coprodutos vegetais. Quanto à textura, os participantes relataram atributos típicos de produtos sem glúten, destacando-se novamente a Formulação 2, que apresentou melhor firmeza e mastigabilidade, atributos coerentes com os resultados instrumentais de textura.

No que concerne ao potencial de aplicação gastronômica, as massas foram consideradas adequadas para consumo como prato principal, especialmente quando associadas a molhos brancos ou à base de tomate, que contribuem para complementar sabor e textura. Entre os principais pontos positivos, foram ressaltados o fato de o produto ser isento de glúten, bem como o apelo nutricional relacionado ao teor elevado de proteínas e fibras provenientes do coproduto.

De forma geral, os resultados indicam que a incorporação do coproduto da amêndoa da castanha de caju é promissora para o desenvolvimento de massas alimentícias sem glúten com valor nutricional agregado. Entretanto, os achados sensoriais sugerem que ajustes tecnológicos adicionais, especialmente voltados à melhoria da textura e da integridade estrutural, são fundamentais para otimizar o desempenho sensorial e ampliar a aceitação do produto no contexto gastronômico.

6 CONCLUSÃO

O presente estudo demonstra que o coproduto gerado no processo de concentração de proteínas da amêndoa da castanha de caju apresenta elevado potencial para aplicação em sistemas alimentares isentos de glúten, configurando-se como um ingrediente funcional capaz de agregar valor nutricional e tecnológico a massas alimentícias frescas. A proposta de aproveitamento desse coproduto atende às demandas por alimentos seguros para indivíduos com distúrbios relacionados ao glúten e se alinha aos princípios de sustentabilidade e valorização de resíduos agroindustriais.

A caracterização do coproduto evidencia perfil nutricional relevante, com destaque para o teor proteico e fibras alimentares, a presença de compostos bioativos e um perfil mineral significativo, incluindo macro e microminerais essenciais. Do ponto de vista tecnológico, o coproduto apresenta propriedades tecnofuncionais favoráveis, como elevada capacidade de absorção de água, comportamento típico de pó coesivo e características físico-químicas compatíveis com aplicações em matrizes alimentares hidratadas, confirmando sua aptidão como ingrediente estruturante em formulações sem glúten.

A incorporação do coproduto nas massas alimentícias frescas sem glúten promove incremento da densidade nutricional das formulações, com aumento do teor proteico, de fibras e do perfil mineral, quando comparadas a massas sem glúten convencionais baseadas predominantemente em amidos refinados. As massas desenvolvidas apresentam qualidade microbiológica adequada, comportamento reológico predominantemente elástico e parâmetros de cocção compatíveis com produtos frescos, indicando que a substituição parcial de ingredientes amiláceos por um ingrediente proteico-fibroso não compromete a estabilidade do produto.

Os resultados instrumentais de textura, cor e microestrutura indicam que as propriedades tecnológicas das massas variam significativamente em função da proporção entre farinha de arroz e polvilho azedo, mantendo-se constante o teor do coproduto. Entre as formulações avaliadas, a Formulação 2 destaca-se de forma consistente, apresentando melhor equilíbrio entre firmeza, mastigabilidade, coesão estrutural, estabilidade durante a cocção e aplicabilidade culinária, resultado corroborado pela percepção sensorial qualitativa de especialistas em gastronomia.

De modo geral, a utilização do coproduto da amêndoa da castanha de caju constitui uma estratégia viável e inovadora para o desenvolvimento de massas alimentícias frescas sem glúten, permitindo a superação parcial das limitações tecnológicas e nutricionais

típicas das matrizes amiláceas convencionais. Além disso, a abordagem adotada amplia o conhecimento científico sobre a funcionalidade de coprodutos proteicos vegetais e reforça seu potencial de aplicação em alimentos plant-based e sistemas alimentares mais sustentáveis.

Por fim, os resultados obtidos indicam perspectivas promissoras para estudos futuros, incluindo a otimização de formulações, a avaliação da vida útil, testes sensoriais quantitativas e de aceitação com consumidores, além da ampliação da aplicação do coproduto em outras categorias de alimentos isentos de glúten, consolidando sua relevância tecnológica e nutricional no contexto da inovação em alimentos.

REFERÊNCIAS

- AACC INTERNACIONAL. Pasta and Noodle Cooking Quality-Firmness. In: **AACC International Approved Methods**. 11. ed. St. Paul, MN, U.S.A.: AACC International, p. 1200, 2011.
- ABIMAPI. **Massas alimentícias industrializadas: nutrição com praticidade e sabor**. 1. ed. São Paulo: ITAL; BB Editora; Abimapi, p. 60, 2021.
- ABRAÃO, Alyne Elias; PAULA, Janyne Santos de. **Elaboração de massa alimentícia mista fresca tipo macarrão com substituição parcial da farinha de trigo (*Triticum durum*) por farinha de casca da jabuticaba (*Myrciaria cauliflora berg*)**. 2022. 35 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Goiás, Inhumas, 2022.
- AGUIAR, Etienne V. et al. An integrated instrumental and sensory techniques for assessing liking, softness and emotional related of gluten-free bread based on blended rice and bean flour. **Food Research International**, v. 154, p. 110999, 2022.
- ALINOVI, Marcello et al. Effect of chestnut flour fortification on physico-chemical characteristics of gluten-free fresh pasta. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 58, n. 6, p. 3360-3370, 2023.
- ALPHAFOLD Protein Structure Database. **Model AF-P08488-F1: Glutenin, high molecular weight subunit 12 (*Triticum aestivum*)**, 2022. Disponível em: <https://alphafold.ebi.ac.uk/entry/P08488>. Acesso em: 22 dez. 2025.
- AL-TOMA, Abdulbaqi et al. European Society for the Study of Coeliac Disease 2025 updated guidelines on the diagnosis and management of coeliac disease in adults. Part 1: diagnostic approach. **United European Gastroenterology Journal**, v. 13, n. 10, p. 1855-1886, 2025.
- ALVARENGA, Natália Teixeira et al. Sensibilidade ao glúten não celíaca: um diagnóstico desafiador entre as desordens associadas ao glúten. **Brazilian Journal of Implantology and Health Sciences**, v. 6, n. 5, p. 196-213, 2024.
- ANDREWS, Wallace H. et al. BAM Chapter 5: Salmonella. **Bacteriological Analytical Manual: Food and Drug Administration**, 2023. Disponível em: <https://www.fda.gov/food/laboratory-methods-food/bam-chapter-5-salmonella>. Acesso em: 15 mar. 2025.
- ANKOM TECHNOLOGY. **Method 2: rapid determination of oil/fat utilizing high temperature solvent extraction**. Macedon, NY, USA: Ankom Technology, p. 2, 2009.
- AOAC - ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. **Official Methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists**. Editor: Dr. George W. Latimer, Jr. Rockville, MD, USA, 22 ed., 2023.

AOAC INTERNATIONAL - Association of Official Analytical Chemists International. Method 991.43. In: **Official Methods of Analysis of the AOAC International**. Editor: Gaithersburg, MD, USA, 18. ed., 3. rev., 2010.

AOCS – AMERICAN OIL CHEMISTS’ SOCIETY. **Official methods and recommended practices of the American Oil Chemists’ Society**. Champaign: AOCS, 2005. 6 ed., 2005.

ARANTES, MATHEUS ST et al. Farinhas sem glúten: uma revisão bibliométrica e avaliação de tendência. **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, v. 42, n. 2, p. 1-7, 2025.

ARIF, Muhammad Rehan et al. A review on gluten-free and low-glycemic index bakery products, especially corn based breads, noodles, and multigrain flours. **Discover Applied Sciences**, v. 7, n. 6, p. 541, 2025.

ARORA, Kashika et al. Physicochemical, nutritional, and functional characterization of gluten-free ingredients and their impact on the bread texture. **LWT**, v. 177, p. 114566, 2023.

ARUL ARASAN, Tamil Selvan et al. Advances in mechanisms of anaphylaxis in wheat allergy: utility of rodent models. **Foods**, v. 14, n. 5, p. 883, 2025.

ASCHEMANN-WITZEL, Jessica; STANGHERLIN, Isadora Do Carmo. Upcycled by-product use in agri-food systems from a consumer perspective: A review of what we know, and what is missing. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 168, p. 120749, 2021.

ASLAM, Nabila et al. Exploring the potential of cashew waste for food and health applications-A review. **Future Foods**, v. 9, p. 100319, 2024.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D6128-16: Standard Test Method for Shear Testing of Bulk Solids Using the Jenike Shear Cell**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2016.

AZEREDO, Bruna Melo. **Impacto da substituição da farinha de trigo (*Triticum spp.*) nas propriedades tecnológicas e sensoriais nos produtos de panificação e massas alimentícias**. 2022. 62 f. Trabalho de conclusão de curso (Tecnólogo em Alimentos) – Centro de tecnologia e Desenvolvimento Regional, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2022.

BANU, Iuliana; APRODU, Iuliana. Investigations on functional and thermo-mechanical properties of gluten free cereal and pseudocereal flours. **Foods**, v. 11, n. 13, p. 1857, 2022.

BARBOSA, Antonia Eclenia Dias. **Perfil sensorial de amêndoa de castanha de caju avaliado por análise descritiva quantitativa**. 2023. 44 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Alimentos) – Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.

BARBOSA-CÁNOVAS, Gustavo V. et al. **Water Activity in Foods: Fundamentals and Applications**. 2. ed. Hoboken: Wiley-Interscience, 2020.

BARCELOS, Carolina Gonçalves et al. Doença Celíaca: diagnóstico, tratamento e desafios na prática clínica. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 10, n. 8, p. 641-652, 2024.

BARTH, Andreas. Infrared spectroscopy of proteins. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics**, v. 1767, n. 9, p. 1073-1101, 2007.

BARROS, Samara Kelly Amaral et al. Elaboração de massa alimentícia fresca sem glúten enriquecida com farinha de resíduo de açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) e bacaba (*Oenocarpus bacaba* Mart.). **Research, Society and Development**, v. 10, n. 6, p. e1810613722-e1810613722, 2021.

BETROUCHE, Amel et al. Antioxidant properties of gluten-free pasta enriched with vegetable by-products. **Molecules**, v. 27, n. 24, p. 8993, 2022.

BHUIYAN, Md Hafizur Rahman; NGADI, Michael O. SR-FTIR microspectroscopy: Emerging 2D structural-chemical analytical technique for food quality and safety monitoring. **Food Bioscience**, v. 56, p. 103392, 2023.

BIGLIARDI, Barbara et al. Circular economy in the food supply chain: A literature review. **Procedia Computer Science**, v. 232, p. 3024-3033, 2024.

BISINOTTO, Mariana Sisoneto et al. Bioaccessibility of cashew nut kernel flour compounds released after simulated in vitro human gastrointestinal digestion. **Food Research International**, v. 139, p. 109906, 2021.

BOLIA, Rishi; THAPAR, Nikhil. Celiac disease in children: a 2023 update. **Indian Journal of Pediatrics**, v. 91, n. 5, p. 481-489, 2024.

BONGIANINO, Nicolás Francisco et al. Technological and sensory quality of gluten-free pasta made from flint maize cultivars. **Foods**, v. 12, n. 14, p. 2780, 2023.

BORBA, Bruna Carolina Rosalinski; DE OLIVEIRA, Renata Carvalho; CORREA, Deize. Doença Celíaca e Sensibilidade ao glúten: Revisão narrativa e desenvolvimento de material educativo. **Epitaya E-books**, v. 1, n. 27, p. 96-111, 2023.

BORBA, Ana; GOMEZ-ZAVAGLIA, Andrea. Infrared spectroscopy: an underexploited analytical tool for assessing physicochemical properties of food products and processing. **Current Opinion in Food Science**, v. 49, p. 100953, 2023.

BORRELLI, Grazia Maria et al. Antioxidants and phenolic acid composition of wholemeal and refined-flour, and related biscuits in old and modern cultivars belonging to three cereal species. **Foods**, v. 12, n. 13, p. 2551, 2023.

BOUKID, Fatma; GASPARRE, Nicola; ROSELL, Cristina M. Guiding trust: The role of labeling information in the market for gluten-free pasta (2019–2023). **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 136, p. 106766, 2024.

BOUZIANE, Meryem et al. Effect of alkaline salts and whey protein isolate on the quality of rice-maize gluten-free pasta. **Lwt**, v. 191, p. 115623, 2024.

BOZORG, Soran R. et al. The economic iceberg of celiac disease: more than the cost of gluten-free food. **Gastroenterology**, v. 167, n. 1, p. 172-182, 2024.

BRASIL. Instrução Normativa nº 2, de 06 de fevereiro de 2017. Aprova o regulamento técnico para a amêndoa de castanha de caju. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF. Seção 1, p. 187, 17 fev. 2017. Disponível em: http://www.puntofocal.gob.ar/notific_otros_miembros/bra325r1a1_t.pdf. Acesso em: 12 nov. 2024.

BRASIL. Resolução - RDC nº 93, de 31 de outubro de 2000. Dispõe sobre o regulamento técnico para fixação de identidade e qualidade de massa alimentícia. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2000. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2000/rdc0093_31_10_2000.html. Acesso em: 15 jun. 2024.

BRASIL. Instrução Normativa nº 161, de 01 de julho de 2022. Estabelece os padrões microbiológicos dos alimentos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF. Seção 1, ed. 126, p. 235, 06 jul. 2022. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/instrucao-normativa-in-n-161-de-1-de-julho-de-2022-413366880>. Acesso em: 25 jun. 2025.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Resolução da Diretoria Colegiada – RDC nº 724, de 1º de julho de 2022. Dispõe sobre os padrões microbiológicos dos alimentos e sua aplicação. **Diário Oficial da União**, seção 1, Brasília, DF, 6 jul. 2022.

CABANILLAS, Beatriz. Gluten-related disorders: Celiac disease, wheat allergy, and nonceliac gluten sensitivity. **Critical reviews in food science and nutrition**, v. 60, n. 15, p. 2606-2621, 2020.

CAETANO, Ivanize Daniella Elvira. **Conservação e uso da variabilidade genética do cajueiro: um estudo sobre a composição nutricional do banco ativo de germoplasma da Embrapa Agroindústria Tropical**. 2024. 67f. Dissertação (Mestrado em Sistemática, Uso e Conservação da biodiversidade) – Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.

CAPPELLI, Alessio; OLIVA, Noemi; CINI, Enrico. A systematic review of gluten-free dough and bread: Dough rheology, bread characteristics, and improvement strategies. **Applied Sciences**, v. 10, n. 18, p. 6559, 2020.

CARDOSO, Louise Thomé et al. **Doença celíaca e a utilização de novos alimentos sem glúten**. 1 ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2021.

CARMO, Ciríaca Arcangela Ferreira de Santana et al. Métodos de análise de tecidos vegetais utilizados na Embrapa Solos. **Circular Técnica**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2000. n. 6, p. 47, 2000.

CARMO, Jéssica Silva do et al. Cashew nut protein concentrate as a potential ingredient for the emerging alternative protein industry. **Food Chemistry**, v. 496, p. 146855, 2025.

CARMO, Jéssica Silva do. **Obtenção de insumos proteicos de amêndoa de castanha de caju por diferentes rotas e aplicação em produtos plant-based**. 2024. 115 f. Dissertação

(Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.

CATASSI, Carlo et al. Coeliac disease. **The Lancet**, v. 399, n. 10344, p. 2413-2426, 2022.

CENNI, Sabrina et al. The role of gluten in gastrointestinal disorders: A review. **Nutrients**, v. 15, n. 7, p. 1615, 2023.

CHAKRABORTY, Ishita et al. An insight into the gelatinization properties influencing the modified starches used in food industry: A review. **Food and Bioprocess Technology**, v. 15, n. 6, p. 1195-1223, 2022.

CHAMORRO, Andrés Felipe; PALENCIA, Manuel; LERMA, Tulio Armando. Physicochemical characterization and properties of cassava starch: a review. **Polymers**, v. 17, n. 12, p. 1663, 2025.

CHEN, Lan; OPARA, Umezuruike Linus. Approaches to analysis and modeling texture in fresh and processed foods—A review. **Journal of food Engineering**, v. 119, n. 3, p. 497-507, 2013.

CHEN, Zijian et al. The influence of cereal dietary fiber structure on starch gelatinization: A review. **International Journal of Biological Macromolecules**, p. 148874, 2025.

CHEN, Xu et al. Advances in Starch–Lipid–Protein Interactions in Starch-Based Food Systems: Bridging Structural Complexity With Functional Design. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 25, n. 1, p. e70314, 2026.

CHINMA, Chiemela Enyinnaya; ADEWUYI, Olufemi; ABU, Joseph Oneh. Effect of germination on the chemical, functional and pasting properties of flour from brown and yellow varieties of tigernut (*Cyperus esculentus*). **Food Research International**, v. 42, n. 8, p. 1004-1009, 2009.

CHOPERA, Prosper et al. Development, optimisation and the organoleptic properties of extruded sorghum-based gluten-free pasta. **Food and Feed Research**, v. 51, n. 1, p. 1-17, 2024.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Castanha de Cajú: Análise Mensal – Novembro 2023**. Brasília: CONAB, 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuario-e-extrativista/analises-do-mercado/historico-mensal-de-castanha-de-caju>. Acesso em: 29 set. 2024.

CULETU, Alina et al. Nutritional and functional properties of gluten-free flours. **Applied Sciences**, v. 11, n. 14, p. 6283, 2021a.

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, 2021b.

CUNHA, Josiane Araújo et al. From seed to flour: Sowing sustainability in the use of cantaloupe melon residue (*Cucumis melo* L. var. *reticulatus*). **PloS one**, v. 15, n. 1, p. e0219229, 2020.

DAS, Mohan et al. Gluten proteins: A comprehensive review. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 62, p. 103437, 2024.

DE ANGELIS, Davide et al. Antinutritional factors, mineral composition and functional properties of dry fractionated flours as influenced by the type of pulse. **Heliyon**, v. 7, n. 2, 2021.

DENDASCK, Carla. Doença celíaca: uma revisão. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, v. 9, n. 10, p. 53-69, out. 2022. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/saude/celiaca>. Acesso em: 07 set. 2025.

DI NARDO, Giovanni et al. Nutritional deficiencies in children with celiac disease resulting from a gluten-free diet: a systematic review. **Nutrients**, v. 11, n. 7, p. 1588, 2019.

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.

DONMEZ, Dila et al. Characterization of starch–water interactions and their effects on two key functional properties: Starch gelatinization and retrogradation. **Current Opinion in Food Science**, v. 39, p. 103-109, 2021.

EMELIKE, Nkechi Juliet; BARBER, Lucretia Ifeoma; EBERE, Chinweoke. Proximate, mineral and functional properties of defatted and non-defatted cashew almond flour (*Anacardium occidentale* Linn.). **European Journal of Food Science and Technology**, v. 3, n. 4, p. 11-19, 2015.

ESPINOZA-HERRERA, Javier et al. Methods for the modification and evaluation of cereal proteins for the substitution of wheat gluten in dough systems. **Foods**, v. 10, n. 1, p. 118, 2021.

EVANGELISTA, Thais Aparecida Oliveira et al. Plant-Based: proteínas alternativas como substitutos da carne. **Scientia Naturalis**, v. 7, n. 1, 2025.

FAJARDO, Violeta et al. Updated food composition database for cereal-based gluten free products in Spain: is reformulation moving on? **Nutrients**, v. 12, n. 8, p. 2369, 2020.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Protein and amino acid requirements in human nutrition**. Geneva: World Health Organization, 2007. WHO Technical Report Series, 935, 2007. Disponível em: <https://iris.who.int/handle/10665/43411>. Acesso em: 04 nov. 2024.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Standard for foods for special dietary use for persons intolerant to gluten (Codex Stan 118-1979, revised 2008). **Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations**. World Health Organization, 2008.

FENACELBRA - Federação Nacional das Associações de Celíacos do Brasil. **Dados sobre a prevalência da doença celíaca no Brasil**. Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.fenacelbra.com.br>. Acesso em: 07 set. 2025.

- FENG, Peter et al. BAM Chapter 4: Enumeration of Escherichia coli and the coliform bacteria. **Bacteriological Analytical Manual: Food and Drug Administration**, 2020. Disponível em: <https://www.fda.gov/food/laboratory-methods-food/bam-chapter-4-enumeration-escherichia-coli-and-coliform-bacteria#references>. Acesso em: 15 mar. 2025.
- FERREIRA, Cássia Berlesi Brigatto et al. Revolutionizing Gluten-Free Baking: the Role of Cassava Sour Starch in Specialty Breads. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 68, p. e25241051, 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.
- FOSCHIA, Martina et al. Legumes as functional ingredients in gluten-free bakery and pasta products. **Annual review of food science and technology**, v. 8, p. 75-96, 2017.
- FORTUNE BUSINESS INSIGHTS. **Gluten-free food market size, share & COVID-19 impact analysis, by product type (bakery, pasta & noodles, and others)**. Pune, 2024. Relatório de mercado. Disponível em: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/gluten-free-food-market-10018>. Acesso em: 22 dez. 2025.
- FRANCIS, Francis John. Analysis of anthocyanins. In: **Anthocyanins as food colors**. MARKAKIS, P. (Ed.). New York: Academic Press, p.181-207, 1982.
- FUSSELL, Maya et al. Essential amino acid density: differences in animal-and plant-based dietary patterns designed for older women. **Nutrition Today**, v. 56, n. 2, p. 70-75, 2021.
- GAO, Zihan et al. Psyllium fibre inclusion in gluten-free buckwheat dough improves dough structure and lowers glycaemic index of the resulting bread. **Foods**, v. 13, n. 5, p. 767, 2024.
- GARSKE, Raquel Pischke. **Desenvolvimento e caracterização de pães sem glúten produzidos com ingredientes tratados por micro-ondas em substituição ao uso de aditivos**. 2021. 122 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Instituto de Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.
- GASPARRE, Nicola; ROSELL, Cristina M. Wheat gluten: A functional protein still challenging to replace in gluten-free cereal-based foods. **Cereal Chemistry**, v. 100, n. 2, p. 243-255, 2023.
- GOMES, Sandra M.; MIRANDA, Rita; SANTOS, Lúcia. Enhancing the biological properties of white chocolate: Moringa oleifera leaf extract as a natural functional ingredient. **Foods**, v. 14, n. 3, p. 359, 2025.
- GUTIÉRREZ-PAZ, Carina et al. Identification and quantification of bioactive compounds in cashew pseudofruit and its by-products. **Food Chemistry**, p. 145971, 2025.
- HAGEN, Steven R.; FROST, Beverly; AUGUSTIN, Jorg. Precolumn phenylisothiocyanate derivatization and liquid chromatography of amino acids in food. **Journal of the Association of Official Analytical Chemists**, v. 72, n. 6, p. 912-916, 1989.

HAMDANI, Afshan Mumtaz; WANI, Idrees Ahmed; BHAT, Naseer Ahmad. Gluten free cookies from rice-chickpea composite flour using exudate gums from acacia, apricot and karaya. **Food Bioscience**, v. 35, p. 100541, 2020.

HASSAN, Hussein F. et al. Perceptions towards gluten free products among consumers: A narrative review. **Applied Food Research**, v. 4, n. 2, p. 100441, 2024.

HONG, Tingting et al. Influence of zein on viscoelastic properties and gluten network development during dough formation. **Food Chemistry: X**, v. 27, p. 102437, 2025.

HUSSEIN, Ahmed MS et al. Development and evaluation of gluten free pasta from brown rice, quinoa, and chickpeas for celiac disease patients. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 20212, 2025.

HWANG, Jonghyun et al. Swelling, softening, and elastocapillary adhesion of cooked pasta. **Physics of Fluids**, v. 34, n. 4, 2022.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estimativa de novembro de 2023 é de safra de 316,3 milhões de toneladas: castanha de caju (amêndoa)**. Rio de Janeiro: IBGE, 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.

JEANES, Yvonne et al. Calcium and iron content of cereal-based gluten-free products. **Foods**, v. 11, n. 14, p. 2001, 2022.

JI, Wenmin et al. Research in advances in the bioactivity of plant polyphenols. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 59, n. 11, p. 8037-8044, 2024.

JIA, Ruoyu et al. A review of starch swelling behavior: Its mechanism, determination methods, influencing factors, and influence on food quality. **Carbohydrate Polymers**, v. 321, p. 121260, 2023.

JIANG, Yongli et al. Effect of dietary fiber-rich fractions on texture, thermal, water distribution, and gluten properties of frozen dough during storage. **Food Chemistry**, v. 297, p. 124902, 2019.

JONGRATTANAVIT, Kankanit; PINKAEW, Panyapathk. Development of nutrient-enriched gluten-free pasta using brown rice flour and green leafy vegetables as natural sources of calcium and dietary fiber. **Discover Food**, v. 5, n. 1, p. 240, 2025.

JUNTUNEN, Cory et al. Refractive index measurement of pharmaceutical powders in the short-wave infrared range using index matching assisted with phase imaging. **Powder Technology**, v. 438, p. 119621, 2024.

KARIM, Ahasanul et al. A review on the hydration properties of dietary fibers derived from food waste and their interactions with other ingredients: Opportunities and challenges for

their application in the food industry. **Critical reviews in food science and nutrition**, v. 64, n. 32, p. 11722-11756, 2024.

KARR-LILIENTHAL, Lisa K. et al. Chemical composition and protein quality comparisons of soybeans and soybean meals from five leading soybean-producing countries. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 52, n. 20, p. 6193-6199, 2004.

KAKAR, Attaullah et al. Oil and water absorption capacity of wheat, rice and gram flour powders. **International Journal of Ecosystems & Ecology Sciences**, v. 12, n. 2, 2022.

KNEŽEVIĆ, Nada et al. Consumer satisfaction with the quality and availability of gluten-free products. **Sustainability**, v. 16, n. 18, p. 8215, 2024.

KOTZE, Lorete Maria da Silva et al. Reproductive aspects in Brazilian celiac women. **Arquivos de Gastroenterologia**, v. 57, n. 01, p. 107-109, 2020.

KRAWĘCKA, Ada; SOBOTA, Aldona; SYKUT-DOMAŃSKA, Emilia. Physicochemical, sensory, and cooking qualities of pasta enriched with oat β -glucans, xanthan gum, and vital gluten. **Foods**, v. 9, n. 10, p. 1412, 2020.

KUASOSKI, Marli; DOLIVEIRA, Sérgio Luis Dias. Transição para a sustentabilidade no sistema agroalimentar: uma revisão sistemática com foco nas perdas e desperdício de alimentos. **REUNIR Revista de Administração Contabilidade e Sustentabilidade**, v. 13, n. 4, p. 52-66, 2023.

KUSUMAYANTI, Heny; HANDAYANI, Noer Abyor; SANTOSA, Herry. Swelling power and water solubility of cassava and sweet potatoes flour. **Procedia Environmental Sciences**, v. 23, p. 164-167, 2015.

LANA, Valéria Silva et al. Impact of processing on polyphenols content in food: A nutritional and statistical analysis of Brazilian menus. **Food Research International**, v. 196, p. 115115, 2024.

LEE, Anne R. Dietary management of coeliac disease. **Alimentary Pharmacology & Therapeutics**, v. 56, p. S38-S48, 2022.

LLAVATA, Beatriz; ALBORS, Ana; MARTIN-ESPARZA, M. Eugenia. High fibre gluten-free fresh pasta with tiger nut, chickpea and fenugreek: Technofunctional, sensory and nutritional properties. **Foods**, v. 9, n. 1, p. 11, 2019.

LI, Shuzhao et al. Preparation of branched canola protein isolate and effects of molecular architecture on solution flow properties. **LWT-Food Science and Technology**, v. 79, p. 287-293, 2017.

LI, Diming et al. Pea-Protein-Stabilized Emulsion as a High-Performance Cryoprotectant in Frozen Dough: Effects on the Storage Stability and Baking Performance. **Foods**, v. 13, n. 23, p. 3840, 2024.

LI, Cheng. Recent progress in understanding starch gelatinization-An important property determining food quality. **Carbohydrate Polymers**, v. 293, p. 119735, 2022.

LI, Wendong et al. Effect of protein on the gelatinization behavior and digestibility of corn flour with different amylose contents. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 249, p. 125971, 2023.

LI, Mengyuan et al. Interaction of wheat bran dietary fiber-gluten protein affects dough product: A critical review. **International journal of biological macromolecules**, v. 255, p. 128199, 2024a.

LIMA, Antonia Carlota de Souza et al. Flowability of spray-dried sapodilla pulp powder. **Journal of Food Process Engineering**, v. 45, n. 9, p. e14092, 2022a.

LIMA, Janice Ribeiro et al. Isolado proteico obtido de subproduto do processamento da castanha de caju. **Boletim de pesquisa e desenvolvimento**. Brasília: Embrapa Agroindústria de Alimentos, 2022. v. 39, p. 15, jan. 2022b.

LIMA, Janice Ribeiro; PINTO, Gustavo Adolfo Saavedra; MAGALHÃES, Hilton Cesar Rodrigues. Óleo da amêndoa da castanha-de caju: Métodos de extração. **Boletim de pesquisa e desenvolvimento**. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2018. v. 165, p. 13, jun. 2018.

LIMA, Simone Kelly Rodrigues et al. Formulação de barras alimentícias a base de coproduto do pedúnculo de caju (*Anacardium occidentale* L) e soro de leite. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 1, p. e7010111213-e7010111213, 2021.

LIMA, Simone Kelly Rodrigues et al. Valorization of fruit co-product flours for human nutrition: Challenges, applications, and perspectives. **Sustainability**, v. 15, n. 18, p. 13665, 2023.

LIMA, Antônio Calixto et al. Obtenção e caracterização da torta da amêndoa de castanha de caju para formulação de produtos plant-based. **Editora Licuri**, p. 50-58, 2023a.

LIU, Cheng-mei et al. Molecular and functional properties of protein fractions and isolate from cashew nut (*Anacardium occidentale* L.). **Molecules**, v. 23, n. 2, p. 393, 2018.

LIU, Yijun et al. Analysis of physicochemical properties, lipid composition, and oxidative stability of cashew nut kernel oil. **Foods**, v. 12, n. 4, p. 693, 2023.

LOPES, Karina; VIEIRA, Marcella Alvares; DE OLIVEIRA, Tatianne Ferreira. Enriquecimento de massas frescas pela substituição percentual da farinha de trigo por farinhas feitas a partir de *Dipteryx alata* Vog.(baru). **DEMETRA: Alimentação, Nutrição & Saúde**, v. 20, p. e84420-e84420, 2025.

LÓPEZ-CALABOZO, Rocío et al. The influence of the nutritional and mineral composition of vegetable protein concentrates on their functional properties. **Foods**, v. 14, n. 3, p. 509, 2025.

LUCAS, Bernardo; SOTELO, Angela. Effect of different alkalies, temperature, and hydrolysis times on tryptophan determination of pure proteins and of foods. **Analytical biochemistry**, v. 109, n. 1, p. 192-197, 1980.

LUIZ, Selma Francisco et al. Análise de glúten em produtos industrializados rotulados como isentos de glúten. **Alimentos: Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente**, v. 1, n. 9, p. 1-14, 2020.

LUO, Shunjing et al. The quality of gluten-free bread made of brown rice flour prepared by low temperature impact mill. **Food Chemistry**, v. 348, p. 129032, 2021.

MALEKI, Mohsen et al. Prevalence of celiac disease and its related factors in children aged 2–6 years old: a case–control study. **Nutrition and health**, v. 31, n. 1, p. 247-254, 2025.

MANFRÉ, Daniela Leandro et al. Massas alimentícias sem glúten: uma análise das informações nutricionais, ingredientes e aditivos expressos nos rótulos. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, v. 22, n. 6, p. e5123-e5123, 2024.

MARCON, Maria Janete Angeloni et al. Análises rápidas para prever a expansão do polvilho azedo. **Revista do Instituto Adolfo Lutz**, v. 70, n. 2, p. 199-205, 2011.

MARTÍNEZ, Mario M.; DÍAZ, Álvaro; GÓMEZ, Manuel. Effect of different microstructural features of soluble and insoluble fibres on gluten-free dough rheology and bread-making. **Journal of Food Engineering**, v. 142, p. 49-56, 2014.

MARTINS, Ana Carolina dos Santos et al. **Doença celíaca: hábitos alimentares e aspectos nutricionais**. 2022. 47 p. Trabalho de conclusão de curso (Curso Técnico em Nutrição e Dietética), Escola Técnica Estadual ETEC de Cidade Tiradentes, São Paulo, 2022.

MAURO, Raúl Ricardo; VELA, Antonio José; RONDA, Felicidad. Impact of starch concentration on the pasting and rheological properties of gluten-free gels. Effects of amylose content and thermal and hydration properties. **Foods**, v. 12, n. 12, p. 2281, 2023.

MCCLEMENTS, David Julian; GROSSMANN, Lutz. Next-generation plant-based foods: Challenges and opportunities. **Annual review of food science and technology**, v. 15, 2024.

MELATI, Janaína et al. Alimentos sem glúten - uma necessidade para celíacos. **Ciência e Tecnologia de Alimentos: Pesquisa e Práticas Contemporâneas**, v. 2, p. 39-58, 2021.

MELO, Thaís Sader et al. Desafios da panificação sem glúten: uma breve revisão. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, v. 22, n. 9, p. e6866-e6866, 2024.

MERRILL, Annabelle Lee; WATT, Bernice Kunerth. **Energy value of foods: basis and derivation**. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, 1973. (Agriculture Handbook, n. 74).

MIEDZIANKA, Joanna et al. Comparative evaluation of the antioxidant, antimicrobial and nutritive properties of gluten-free flours. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 10385, 2021.

MITRA, Saikat et al. Exploring the immune-boosting functions of vitamins and minerals as nutritional food bioactive compounds: a comprehensive review. **Molecules**, v. 27, n. 2, p. 555, 2022.

MIRANDA, Cristiane Grella et al. Influence of ohmic heating on lentil protein structure and protein-pectin interactions. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 87, p. 103413, 2023a.

MIRANDA, Marta Expósito et al. Non-celiac gluten sensitivity: Clinical presentation, etiology and differential diagnosis. **Gastroenterología y Hepatología (English Edition)**, v. 46, n. 7, p. 562-571, 2023b.

MIRONEASA, Silvia; CODINA, Gabriela Geanina; UNGUREANU-IUGA, Mihaela. Rheological properties of doughs formulated with gluten-free flours and proteins. **Food Science and Technology International**, v. 25, n. 4, p. 295–307, 2019.

MOKRZYCKI, W. S.; TATOL, Maciej. Colour difference ΔE - A survey. **Mach. Graph. Vis**, v. 20, n. 4, p. 383-411, 2011.

MORAES, Etiara de Mattos; DA SILVA, Leomar Hackbart. Substituintes da farinha de trigo na elaboração de produtos de panificação sem glúten-uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 3, p. e3512328931-e3512328931, 2023.

MORDOR INTELLIGENCE. **Brazil gluten-free foods and beverages market – growth, trends and forecast (2020–2025)**. [S. l.], 2024. Relatório de mercado. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/brazil-gluten-free-foods-beverages-market-industry>. Acesso em: 25 out. 2024.

MORDOR INTELLIGENCE. **Plant-Based Food Market Size & Share Analysis - growth trends and forecasts (2025 - 2030)**. [S. l.], 2025. Relatório de mercado. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/plant-based-food-market>. Acesso em: 27 out. 2025.

MOREIRA, Inaê Corrêa. **Riscos de contaminação cruzada por glúten em serviço de nutrição hospitalar que fornece preparações para portadores de doença celíaca: um estudo de caso**. 2024. 40 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Nutrição) – Curso de Nutrição, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

MORENO-ARAIZA, Oscar et al. Pretreated green pea flour as wheat flour substitutes in composite bread making. **Foods**, v. 12, n. 12, p. 2284, 2023.

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

MUSIKA, Jirayu et al. Enhancing nutritional and functional properties of gluten-free Riceberry rice pasta supplemented with cricket powder using D-optimal mixture design. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 8, p. 1417045, 2024.

MUMOLO, Maria Gloria et al. Is gluten the only culprit for non-celiac gluten/wheat sensitivity? **Nutrients**, v. 12, n. 12, p. 3785, 2020.

MYHRSTAD, Mari CW et al. Nutritional quality and costs of gluten-free products: a case-control study of food products on the Norwegian market. **Food & nutrition research**, v. 65, p. 10.29219/fnr.v65.6121, 2021.

- NDJANG, Marie Madeleine Nanga et al. Structural, molecular, and morphological properties of cassava starch (*Manihot esculenta*): effect of fermentation and legumes flour incorporation. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 60, n. 1, p. vvaf099, 2025.
- NETO, José Pinheiro Lopes et al. Propriedade de fluxo e característica de escoabilidade de rações avícolas para dimensionamento de silos. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, n. 3, p. 851-859, 2007.
- NUNES, Grasiella Moura. **Massas alimentícias sem glúten de farinhas formuladas à base de arroz e feijão**. 2020. 122 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2020.
- OBANDA, Martin; OWUOR, P. Okinda; TAYLOR, Sarah J. Flavanol composition and caffeine content of green leaf as quality potential indicators of Kenyan black teas. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 74, n. 2, p. 209-215, 1997.
- OGUNWOLU, Semiu Olalekan et al. Propriedades funcionais de concentrados e isolados proteicos produzidos a partir da castanha de caju (*Anacardium occidentale* L.). **Química de alimentos**, v. 115, n. 3, p. 852-858, 2009.
- OKEZIE, B. Onuma; BELLO, A. B. Physicochemical and functional properties of winged bean flour and isolate compared with soy isolate. **Journal of Food science**, v. 53, n. 2, p. 450-454, 1988.
- OKURA, Yuu et al. Characterizations of a neutralizing antibody broadly reactive to multiple gluten peptide: HLA-DQ2. 5 complexes in the context of celiac disease. **Nature communications**, v. 14, n. 1, p. 8502, 2023.
- OLATIDOYE, Olawale Paul et al. Nutritional profile, protein quality, and biological value of raw and roasted cashew kernels (*Anacardium occidentale*) grown in southwest Nigeria. **Croatian journal of food science and technology**, v. 12, n. 1, p. 11-19, 2020.
- OLIVEIRA, Dafne Cristine Lima de; SILVA, Vânia Maria Barboza da; SILVA, Luísa Margareth Carneiro da. Desafios da adesão à dieta sem glúten. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 2, p. e34411226008, 2022b.
- OLIVEIRA, Juliana Carolina et al. Aceitabilidade de bolo de banana sem glúten à base de farinha de sorgo integral. **Revista Inova Ciência & Tecnologia/Innovative Science & Technology Journal**, p. e0211099-e0211099, 2021.
- OLIVEIRA, Jaine; SOUZA, Natália Tolfó; POLESÍ, Luís Fernando. Elaboração de massa alimentícia sem glúten a partir de farinha de babaçu e pupunha. In: CORDEIRO, Carlos Alberto Martins. (Org.). **Tecnologia de Alimentos: tópicos físicos, químicos e biológicos** - 1 ed. Guarujá, SP: Científica Digital, v. 2, p. 259-278, 2020.
- OLIVEIRA, Karla Aurianne Sales et al. A importância da avaliação do estado nutricional em pacientes portadores de doença celíaca. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 5, p. e51911528749-e51911528749, 2022a.

OLIVEIRA, Matheus Almeida de. **Coprodutos do caju na alimentação de frangos de corte: revisão de literatura**. 2023. 28p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Zootecnia) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.

OLIVEIRA, Raquel Martins da Silva Fernandes et al. Exploring Plant Agro-Industrial By-Products as a Source of Fibrous Food Ingredients: A Review of Extraction Methods and Technological Properties. **Journal of Food Science**, v. 90, n. 7, p. e70408, 2025.

ONISZCZUK, Anna et al. Content of phenolic compounds and antioxidant activity of new gluten-free pasta with the addition of chestnut flour. **Molecules**, v. 24, n. 14, p. 2623, 2019.

OLUWOLE, Oladeji Solomon et al. Next-generation gluten-free noodles: integration of hydrocolloids, fibers, and bioactive compounds: Oladeji Solomon Oluwole et al. **Food Science and Biotechnology**, p. 1-19, 2026.

OYHEYINKA, Samson A.; BASSEY, Ini-Abasy V. Composition, functionality, and baking quality of flour from four brands of wheat flour. **Journal of Culinary Science & Technology**, v. 23, n. 1, p. 87-107, 2025.

PADALINO, Lucia; CONTE, Amalia; DEL NOBILE, Matteo Alessandro. Overview on the general approaches to improve gluten-free pasta and bread. **Foods**, v. 5, n. 4, p. 87, 2016.

PAOLETTI, Alyssa; COURTNEY-MARTIN, Glenda; ELANGO, Rajavel. Determining amino acid requirements in humans. **Frontiers in Nutrition**, v. 11, p. 1400719, 2024.

PARK, Jiyoung; KIM, Hong-Sik. Rice-based gluten-free foods and technologies: A review. **Foods**, v. 12, n. 22, p. 4110, 2023.

PARSAMAJD, Mahan et al. Synergistic Effects of Hydrocolloid Combinations on Gluten-Free Batter and Bread Characteristics. **Food Science & Nutrition**, v. 13, n. 10, p. e71107, 2025.

PETITOT, Maud; ABECASSIS, Joël; MICARD, Valérie. Structuring of pasta components during processing: impact on starch and protein digestibility and allergenicity. **Trends in Food Science & Technology**, v. 20, n. 11-12, p. 521-532, 2009.

PI, Xiaowen et al. A review of wheat allergy: Allergens characteristic, the impact of processing on allergenicity and future perspective. **Trends in Food Science & Technology**, p. 105244, 2025.

PINHEIRO, Raquel da Costa et al. Estudo do resíduo sólido do processamento da Castanha-do-Brasil para a obtenção de subprodutos com valor agregado. **Conjecturas**, v. 22, n. 11, p. 672-691, 2022.

PIOTIN, Anays; DE BLAY, Frédéric. Investigando a sensibilidade ao trigo não celíaca: uma revisão abrangente da fisiopatologia subjacente às implicações clínicas. **Clinical Reviews in Allergy & Immunology**, v. 68, n. 1, p. 94, 2025.

POISSON (Org.). **Ciência e tecnologia dos alimentos**. v. 15. Belo Horizonte, MG: Poisson, 2023. Disponível em:

https://www.poisson.com.br/livros/alimentos/volume15/Alimentos_vol15.pdf. Acesso em: 19 set. 2024.

PONTES, Claudilane Martins. **Métodos de tratamentos na semente de tremoço (*lupinus albus*) para elaboração de farinha: propriedades nutricionais, tecnofuncionais e aplicação em massas alimentícias frescas**. 2024. 136 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.

RABBI, Mohammad Fazle; AMIN, Mohammad Bin. Circular economy and sustainable practices in the food industry: A comprehensive bibliometric analysis. **Cleaner and Responsible Consumption**, v. 14, p. 100206, 2024.

RAITERI, Alberto et al. Current guidelines for the management of celiac disease: A systematic review with comparative analysis. **World journal of gastroenterology**, v. 28, n. 1, p. 154, 2022.

RAMOS, Nayara Jessica da Silva et al. Optimizing gluten-free pasta quality: The impacts of transglutaminase concentration and kneading time on cooking properties, nutritional value, and rheological characteristics. **LWT**, v. 189, p. 115485, 2023.

RAZZAQUE, Mohammed S.; WIMALAWANSA, Sunil J. Minerals and human health: From deficiency to toxicity. **Nutrients**, v. 17, n. 3, p. 454, 2025.

RE, Roberta et al. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. **Free radical biology and medicine**, v. 26, n. 9-10, p. 1231-1237, 1999.

RENZO, Tiziana Di et al. Effect of different hydrocolloids on the qualitative characteristics of fermented gluten-free quinoa dough and bread. **Foods**, v. 13, n. 9, p. 1382, 2024.

RESMINI, Pierpaolo; PAGANI, Maria Ambrogina. Ultrastructure Studies of Pasta. A Review. **Food structure**, v. 2, n. 1, p. 1-12, 1983.

RICO, Ricard; BULLÓ, Mònica; SALAS-SALVADÓ, Jordi. Nutritional composition of raw fresh cashew (*Anacardium occidentale* L.) kernels from different origin. **Food science & nutrition**, v. 4, n. 2, p. 329-338, 2016.

ROCHA, Nathalia Santos. **Desenvolvimento de massa alimentícia seca sem glúten à base de amido da semente de jaca (*Artocarpus heterophyllus* L.)**. 2020. 74 f. Dissertação (Mestrado em Nutrição) – Centro de Ciências da Saúde, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

ROCHA, Neilane Gomes. **Propriedades funcionais tecnológicas de concentrado proteico obtido a partir de amêndoa de castanha de caju (*Anacardium occidentale* L.)**. 2023. 72 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.

RODSAMRAN, Patrathip; SOTHORNVIT, Rungsinee. Physicochemical and functional properties of protein concentrate from by-product of coconut processing. **Food Chemistry**,

v. 241, p. 364-371, 2018.

ROSA-MILLAN, Julian de La. The Role of Molecular and Structural Characteristics of Starch, Hydrocolloids, and Gluten in Bread In Vitro Digestibility. **Polysaccharides**, v. 6, n. 2, p. 46, 2025.

RUFINO, Maria do Socorro Moura et al. Metodologia científica: determinação da atividade antioxidante total em frutas pela captura do radical livre ABTS^{o+}. **Comunicado Técnico**. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2007. v. 128, 4 p., jul. 2007.

SCARTON, Michele; CLERICI, Maria Teresa Pedrosa Silva. Gluten-free pastas: ingredients and processing for technological and nutritional quality improvement. **Food Science and Technology**, v. 42, p. e65622, 2022.

SAHIN, Yasin. Celiac disease in children: A review of the literature. **World journal of clinical pediatrics**, v. 10, n. 4, p. 53, 2021.

SANTOS, Fernanda G. et al. The impact of dough hydration level on gluten-free bread quality: A case study with chickpea flour. **International Journal of Gastronomy and Food Science**, v. 26, p. 100434, 2021.

SMUDA, Sayed S.; MOHAMED, Reda M.; ABDELMAKSOU, Tarek G. Development of gluten-free pasta with chickpeas as a wheat flour substitute and fortified with carob, beetroot, and spinach. **Food systems**, v. 7, n. 3, p. 363-367, 2024.

SELL, Vanize Priebe et al. Doença celíaca: etiologia e relação com ansiedade e depressão. **Revista Eletrônica Acervo Saúde| ISSN**, v. 2178, p. 2091, 2023.

SEVERO, Márcio Garcia; MORAES, Kelly de; RUIZ, Walter Augusto. Modificação enzimática da farinha de arroz visando a produção de amido resistente. **Química Nova**, v. 33, p. 345-350, 2010.

SHARMA, Natasha et al. Pathogenesis of celiac disease and other gluten related disorders in wheat and strategies for mitigating them. **Frontiers in nutrition**, v. 7, p. 6, 2020a.

SHARMA, Poonam et al. Valorization of cashew nut processing residues for industrial applications. **Industrial Crops and Products**, v. 152, p. 112550, 2020b.

SHARMA, Vatsala; THAKUR, Monika. FTIR Spectroscopic Characterisation of Horsegram Protein Hydrolysates: Implications for Functional Properties. In: **BIO Web of Conferences**. EDP Sciences, p. 03012, 2025.

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.

SHOLICHAH, Enny et al. Physicochemical, sensory, and cooking qualities of gluten-free pasta enriched with Indonesian edible Red Seaweed (*Kappaphycus alvarezii*). **Journal of Food and Nutrition Research**, v. 9, n. 4, p. 187-192, 2021.

SHOUKAT, Rizwan et al. Rice starch chemistry, functional properties, and industrial applications: A review. **Polymers**, v. 17, n. 1, p. 110, 2025.

SILVA, Bernadete de Lourdes Araújo; BORA, Pushkar Singh; AZEVEDO, Claudia Carneiro de. Caracterização química parcial das Proteínas das Amêndoas da Munguba (*Pachira aquatica* Aubl). **Revista do Instituto Adolfo Lutz**, v. 69, n. 3, p. 333-340, 2010.

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.

SILVA, Thauany Beatriz et al. Alimentação e sua influência sobre a microbiota intestinal em pacientes celíacos. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, v. 22, n. 10, p. e7305-e7305, 2024.

SINGLA, Deepika et al. Advances in understanding wheat-related disorders: A comprehensive review on gluten-free products with emphasis on wheat allergy, celiac and non-celiac gluten sensitivity. **Food Chemistry Advances**, v. 4, p. 100627, 2024.

SOUSA, Miguel Sales Porto; DE LIMA PRIMO, Hyanameyka Evangelista. Challenges and potential of cashew trees in Brazil: A critical review. **Exacta**, p. e29128-e29128, 2025.

SRISUWATCHARI, Witchaya; KANCHANAPOOMI, Kantima; PACHARN, Punchama. Molecular diagnosis to IgE-mediated wheat allergy and wheat-dependent exercise-induced anaphylaxis. **Clinical Reviews in Allergy & Immunology**, v. 68, n. 1, p. 47, 2025.

STORDAL, Ketil; KURPPA, Kalle. Celiac disease, non-celiac wheat sensitivity, wheat allergy—clinical and diagnostic aspects. In: **Seminars in Immunology**. Academic Press, p. 101930, 2025.

SUHAG, Rajat; KELLIL, Abdessamie; RAZEM, Mutasem. Factors influencing food powder flowability. **Powders**, v. 3, n. 1, p. 65-76, 2024.

SUN, Shenglin et al. Different starch varieties influence the complexing state and digestibility of the resulting starch-lipid complexes. **Food Hydrocolloids**, v. 141, p. 108679, 2023.

TALLENT, Sandra et al. BAM Chapter 12: Staphylococcus aureus. In: **Bacteriological Analytical Manual: Food and Drug Administration**, 2016. Disponível em: <https://www.fda.gov/food/laboratory-methods-food/bam-chapter-12-staphylococcus-aureus>. Acesso em: 15 mar. 2025.

TORRES, Olga L.; LEMA, Mariana; GALEANO, Yessica V. Effect of using quinoa flour (*Chenopodium quinoa* Willd.) on the physicochemical characteristics of an extruded pasta. **International Journal of Food Science**, v. 2021, n. 1, p. 8813354, 2021.

TROX, Jennifer et al. Bioactive compounds in cashew nut (*Anacardium occidentale* L.) kernels: effect of different shelling methods. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 58, n. 9, p. 5341-5346, 2010.

UNGUREANU-IUGA, Mădălina; DIMIAN, Mihai; MIRONEASA, Silvia. Development and quality evaluation of gluten-free pasta with grape peels and whey powders. **Lwt**, v. 130, p. 109714, 2020.

VARDHAN, Harsh et al. Starch–biomacromolecule complexes: A comprehensive review of interactions, functional materials, and applications in food, pharma, and packaging. **Carbohydrate Polymer Technologies and Applications**, p. 101001, 2025.

VERMA, Anil K. Nutritional deficiencies in celiac disease: current perspectives. **Nutrients**, v. 13, n. 12, p. 4476, 2021.

VIVAR-QUINTANA, Ana M. et al. Nutritional value, mineral composition, fatty acid profile and bioactive compounds of commercial plant-based gluten-free flours. **Applied Sciences**, v. 13, n. 4, p. 2309, 2023.

WANG, Daowen et al. Genomic and functional genomics analyses of gluten proteins and prospect for simultaneous improvement of end-use and health-related traits in wheat. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 133, n. 5, p. 1521-1539, 2020.

WANG, Jinrong et al. A review of the impact of starch on the quality of wheat-based noodles and pasta: From the view of starch structural and functional properties and interaction with gluten. **Foods**, v. 13, n. 10, p. 1507, 2024.

WANG, Che et al. Prediction of dairy powder functionality attributes using diffuse reflectance in the visible and near infrared (Vis-NIR) region. **International Dairy Journal**, v. 117, p. 104981, 2021.

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.

WESLEY, Silva David; ANDRÉ, Bolini Helena Maria; CLERICI, Maria Teresa Pedrosa Silva. Gluten-free rice & bean biscuit: characterization of a new food product. **Heliyon**, v. 7, n. 1, 2021.

WHITE, J. A.; HART, R. J.; FRY, J. C. An evaluation of the Waters Pico-Tag system for the amino-acid analysis of food materials. **The Journal of Automatic Chemistry**, v. 8, n. 4, p. 170, 1986.

WONGKHUENG, Kanyapat et al. Pasting profiles and gel properties of rice flour blended with native, cross-linked, and acetylated tapioca starch. In: **E3S Web of Conferences**. EDP Sciences, 2025. p. 02002.

YAZAR, Gamze; DEMIRKESEN, Ilkem. Linear and non-linear rheological properties of gluten-free dough systems probed by fundamental methods. **Food Engineering Reviews**, v. 15, n. 1, p. 56-85, 2023.

YE, Li et al. The role of gluten in food products and dietary restriction: Exploring the potential for restoring immune tolerance. **Foods**, v. 12, n. 22, p. 4179, 2023.

YE, Haoxuan et al. Dynamic study on water state and water migration during gluten–starch model dough development under different gluten protein contents. **Foods**, v. 13, n. 7, p. 996, 2024.

YAN, Xudong et al. Recent advances in the impact of gelatinization degree on starch: Structure, properties and applications. **Carbohydrate Polymers**, v. 340, p. 122273, 2024.

YU, Qiang et al. Dietary fiber in food industry: Extraction, preparation and component interaction. **Agricultural Products Processing and Storage**, v. 1, n. 1, p. 25, 2025.

ZANG, Peng et al. Recent advances in the study of wheat protein and other food components affecting the gluten network and the properties of noodles. **Foods**, v. 11, n. 23, p. 3824, 2022.

ZHANG, Jingwei et al. Water absorption behavior of starch: A review of its determination methods, influencing factors, directional modification, and food applications. **Trends in Food Science & Technology**, v. 144, p. 104321, 2024.

ZHANG, Zhenzhen et al. Modulation of potato starch gelatinization, rheological properties, and mechanical properties: the role of potato soluble dietary fiber with different molecular weights. **International Journal of Biological Macromolecules**, p. 147211, 2025.

ZHANG, Jiayan et al. The effect of protein–starch interaction on the structure and properties of starch, and its application in flour products. **Foods**, v. 14, n. 5, p. 778, 2025a.

ZHAO, Xin et al. Secondary structure changes and thermal stability of plasma membrane proteins of wheat roots in heat stress. **American Journal of Plant Sciences**, v. 2, n. 6, p. 816, 2011.

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.

ZHENG, Xiaoyuan; ZHANG, Xuejiao; ZENG, Fankui. Biological functions and health benefits of flavonoids in fruits and vegetables: A contemporary review. **Foods**, v. 14, n. 2, p. 155, 2025.

ANEXO A – TERMO DE CONSETIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO



TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO
NÚMERO DO PARECER NO CEP: 6.666.316 (CONEP)

Título da Pesquisa: Aproveitamento de coproduto do processo de concentração de proteína da amêndoa da castanha de caju para aplicação em massas alimentícias frescas sem glúten.

Pesquisador responsável por obter o consentimento: Deborah dos Santos Garruti

Pesquisador responsável pelos experimentos: Ana Paula Dionísio

Endereço: Rua Dra Sara Mesquita, 2270, Planalto Pici, Fortaleza, CE.

Email: deborah.garruti@embrapa.br / ana.dionisio@embrapa.br Fones: (85) 984102000 / (85) 999945252

Você está sendo convidado(a) a participar como voluntário(a) de uma pesquisa que tem como finalidade avaliar massas alimentícias sem glúten elaboradas à base do coproduto gerado no processo de concentração de proteínas da amêndoa de castanha de caju. Sua tarefa será comparecer ao Laboratório de Análise Sensorial na Embrapa Agroindústria Tropical, onde em cerca de 60 minutos realizará um teste de grupo focal produto. Você não terá nenhum tipo de despesa e nem será remunerado para participar desta pesquisa. Entretanto, esperamos que este estudo traga informações importantes para contribuir com o avanço do conhecimento científico e tecnológico na área de produtos sem glúten.

Sua participação não é obrigatória, e a qualquer momento você poderá desistir de participar e retirar seu consentimento. Sua recusa não trará nenhum prejuízo em sua relação com o pesquisador ou com a instituição. Os procedimentos adotados nesta pesquisa foram aprovados pelo Comitê de Ética em Pesquisa (CEP). O CEP é um colegiado responsável pela avaliação e acompanhamento dos aspectos éticos de todas as pesquisas envolvendo seres humanos. O papel do CEP neste estudo é garantir que as perguntas formuladas ao provador e a abordagem utilizada são eticamente adequadas de acordo com as diretrizes nacionais (Resolução nº 466/12 e Resolução nº 510/16 do Conselho Nacional de Saúde) e internacionais (CIOMS). Nenhum dos procedimentos utilizados oferece riscos à sua dignidade. O consumo deste produto também não oferece riscos à saúde, contudo se ocorrer algum desconforto durante ou até 12 h após a análise você receberá assistência médica integral e gratuita, pelo tempo que for necessário. Após a assinatura deste TCLE, caso ocorram danos à sua saúde decorrentes da sua participação nesta pesquisa, o patrocinador se responsabilizará por todos os gastos relativos aos exames e procedimentos necessários. Ainda lhe será garantido o sigilo que assegure a privacidade da sua identidade, como também a confidencialidade de todos os resultados obtidos, pois somente os pesquisadores terão acesso aos dados. Serão divulgados somente os dados relacionados aos objetivos desta pesquisa.

Após estes esclarecimentos, solicitamos o seu consentimento de forma livre para participar desta pesquisa. Se concorda, por favor preencha e assine o documento. Você receberá uma cópia deste termo, onde constam e-mail e telefone do pesquisador responsável, podendo tirar dúvidas do projeto e de sua participação.

Eu,, após ter recebido uma cópia deste Termo de Consentimento, ter lido as informações contidas no documento e ter tido a oportunidade de conversar com o pesquisador responsável para esclarecer todas as minhas dúvidas, acredito estar suficientemente informado(a) sobre o objetivo da pesquisa, os procedimentos nela envolvidos, assim como os possíveis riscos e benefícios decorrentes de minha participação. Ficou claro para mim que minha participação é voluntária e que posso retirar este consentimento a qualquer momento, sem que isso leve a qualquer penalidade. Diante do exposto expresso de espontânea vontade minha concordância em participar como voluntário do projeto de pesquisa acima descrito.

Fortaleza, de de

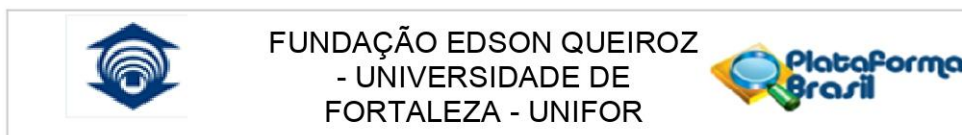
Assinatura do voluntário

Assinatura do responsável pela pesquisa

Assinatura do responsável por obter o consentimento

Endereço do Comitê de Ética: 8109 - Santa Casa de Misericórdia de Sobral
R. Antônio Crisóstomo de Melo, 919 - Centro, Sobral – CE.

ANEXO B – PARECER CONSUBSTANCIADO DO CEP



PARECER CONSUBSTANCIADO DO CEP

DADOS DO PROJETO DE PESQUISA

Título da Pesquisa: Análise sensorial como ferramenta no desenvolvimento e inovação de produtos e processos de interesse da agroindústria

Pesquisador: DEBORAH DOS SANTOS GARRUTI

Área Temática:

Versão: 1

CAAE: 77431324.2.0000.5052

Instituição Proponente: EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA

Patrocinador Principal: Financiamento Próprio

DADOS DO PARECER

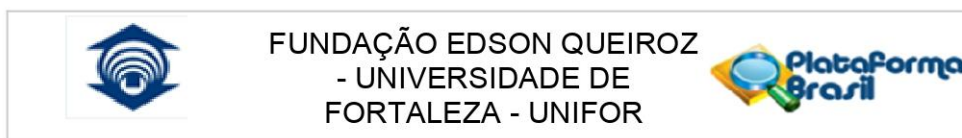
Número do Parecer: 6.666.316

Apresentação do Projeto:

O Projeto em apreciação ao Comitê de Ética-COÉTICA da Universidade de Fortaleza-UNIFOR, intitulado Análise sensorial como ferramenta no desenvolvimento e inovação de produtos e processos de interesse da agroindústria tendo como pesquisador responsável DEBORAH DOS SANTOS GARRUTI tendo como patrocinador a EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA.

A presente pesquisa trata-se de um estudo sensorial multi-métodos com testes discriminativos, triangular, dentre outros preponderantemente descritivo com aplicação em cinco etapas 1º) Seleção inicial de avaliadores: a equipe de avaliadores deverá ser composta por, no mínimo, 10 a 12 indivíduos previamente selecionados por meio de técnicas que serão apresentadas no item 6.2-Seleção de Avaliadores. 2º) Desenvolvimento da terminologia descritiva: os avaliadores avaliarão sensorialmente o produto, verbalizando as sensações percebidas e discutindo-as em grupo, com a ajuda de um moderador. O desenvolvimento dos descritores, suas definições e materiais de referência é um processo interativo que leva em média 6h, distribuídas em várias sessões com a equipe sensorial. 3º) Treinamento e seleção final dos avaliadores: o treinamento será realizado com os próprios produtos a serem avaliados, com amostras referência e a ficha de avaliação desenvolvida. Para cada descritor será associada uma escala de intensidade, de preferência linear (Apêndice 1G). Em seguida será aplicado um teste simulado no produto, com o objetivo de selecionar os avaliadores que conseguem discriminar bem as amostras, produzem

Endereço: Av. Washington Soares-1321, Bloco-M Sala-30
Bairro: Edson Queiroz **CEP:** 60.811-905
UF: CE **Município:** FORTALEZA
Telefone: (85)3477-3122 **Fax:** (85)3477-3110 **E-mail:** coetica@unifor.br



Continuação do Parecer: 6.666.316

resultados consensuais com os demais membros da equipe e apresentam boa repetibilidade em suas análises (Damasio e Costell, 1991). 4º) Teste sensorial: os testes propriamente ditos serão, então, conduzidos em cabines individuais, com todos os requisitos necessários a uma análise sensorial, com os avaliadores selecionados, no mínimo 3 repetições. 5º) Análise dos resultados: os resultados da ADQ serão avaliados por Análise de Variância (ANOVA), teste de Tukey para médias e Análise de Componentes Principais (ACP) (Meilgaard et al., 2006). As médias também poderão apresentadas em gráfico tipo radar (gráfico-aranha). Diferentes testes serão realizados (Testes de abordagem comportamental) onde se-rão recrutados funcionários de todos os setores da empresa e pessoas da comunidade local. O recrutamento dos avaliadores será feito por meio de questionários (Apêndice 2A) e entrevistas. O questionário será aplicado nos indivíduos interessados a participar dos testes após convite, que poderá ser feito por meio de contato pessoal, mensagem eletrônica (e-mail), aplicativos e cartazes espalhados na vizinhança e na universidade Federal do Ceará.

LOCAL DA PESQUISA

As atividades de pesquisa com análise sensorial serão desenvolvidas nos laboratórios da Embrapa Agroindústria Tropical, em Fortaleza, Ceará, bem como em laboratórios de empresas e universidades parceiras dos projetos de pesquisa.

Objetivo da Pesquisa:

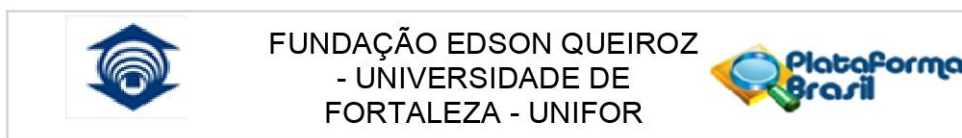
Objetivo Primário:

Utilizar métodos estatístico-sensoriais na pesquisa, desenvolvimento e inovação de produtos de interesse da agroindústria brasileira, atendendo aos projetos de pesquisa e inovação realizados na Embrapa Agroindústria Tropical, bem como em instituições par-ceiras.

Objetivo Secundário:

:• Realizar a caracterização sensorial de matérias-primas, alimentos e bebidas, identi-ficando quais atributos respondem pela sua qualidade sensorial

Endereço: Av. Washington Soares-1321, Bloco-M Sala-30
Bairro: Edson Queiroz **CEP:** 60.811-905
UF: CE **Município:** FORTALEZA
Telefone: (85)3477-3122 **Fax:** (85)3477-3110 **E-mail:** coetica@unifor.br



Continuação do Parecer: 6.666.316

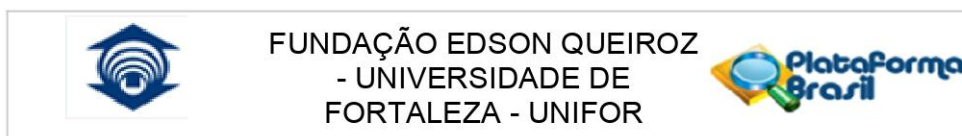
- ;• Desenvolver estudos de consumidores para avaliar a aceitabilidade de novos produtos
- ;• Desenvolver cultivares mais produtivas, com resistência natural a pragas e doenças, mas que também produzam frutos de qualidade e de boa aceitação pelo consumidor
- ;• Desenvolver novos produtos e processos de conservação de alimentos e bebidas, de forma a torná-los seguros, mas com elevado apelo sensorial para o consumidor;
- Otimizar formulações para atender às preferências do mercado, reduzir custos ou obter melhor aproveitamento de matérias-primas e subprodutos
- Determinar a vida de prateleira (validade) de matérias-primas, alimentos processados e Bebidas
- Determinar os compostos voláteis responsáveis pelo sabor dos alimentos e identificar como o processamento pode afetar a sua composição.

Avaliação dos Riscos e Benefícios:

Riscos:

Toda pesquisa com seres humanos envolve risco em tipos e gradações variados. Toda-via, por se tratar da avaliação sensorial de produtos alimentícios, a probabilidade de desconfortos é muito reduzida e os riscos mínimos. Comumente, os riscos mais prováveis são de infecções causadas por bactérias, fungos e parasitas, alergias ou intolerância a algum dos componentes do alimento. Entretanto, esses riscos serão extremamente baixos, uma vez que os produtos serão elaborados segundo as Boas Práticas de Fabricação de alimentos, com todo o rigor sanitário exigido para a manipulação de alimentos e avaliados quanto à sua carga microbiana. No caso de presença de componentes alergênicos, eles serão previamente informados aos avaliadores. Outro ponto que será levado em consideração pelo líder do projeto será o risco mínimo de constrangimento ao responder um questionário, fazendo esclarecimentos prévios ao participante da pesquisa, bem como algum desconforto advindo da ingestão dos produtos avaliados nos experimentos. Esses riscos poderão ser minimizados pela garantia do sigilo de informações e

Endereço: Av. Washington Soares-1321, Bloco-M Sala-30
Bairro: Edson Queiroz **CEP:** 60.811-905
UF: CE **Município:** FORTALEZA
Telefone: (85)3477-3122 **Fax:** (85)3477-3110 **E-mail:** coetica@unifor.br



Continuação do Parecer: 6.666.316

imagens obtidas na pesquisa, pelo anonimato dos participantes, pelos avisos aos participantes de que há substâncias ou alimentos que possam causar alergia ou danos à saúde, como advertir portadores de diabetes da presença de açúcar no produto ou portadores de doença celíaca da presença de glúten. Também será garantida a segurança por meio de análises microbiológicas. No caso de desconforto ou mal-estar, acompanhado de reações, como engasgamento e vômito, será seguida a recomendação da Resolução 466/2012, quanto ao item IV.3 sub item b, no qual será solicitado a apresentação das providências e cautelas a serem empregadas para evitar e reduzir efeitos e condições adversas que possam causar dano, considerando características e contexto do participante da pesquisa. Contudo, se ocorrer algum desconforto durante ou até 12 h após a análise, o avaliador receberá assistência médica integral e gratuita, pelo tempo que for necessário.

Benefícios:

Como o projeto é muito abrangente, envolvendo diversas pesquisas da Embrapa e parceiros, os avaliadores serão informados dos objetivos de cada projeto, e no Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE) (Apêndice 3) será explicitado o benefício que cada estudo trará para o avanço do conhecimento científico e tecnológico, para o desenvolvimento socioeconômico dos agentes envolvidos na cadeia produtiva em questão e para a sociedade como um todo.

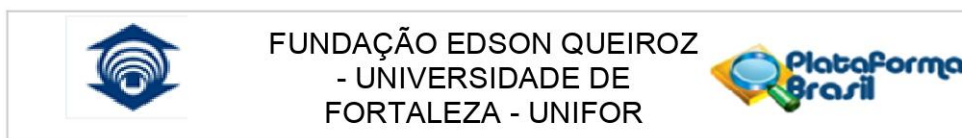
Comentários e Considerações sobre a Pesquisa:

Trata-se de um Projeto de Pesquisa apresentado ao Comitê de Ética da Universidade de Fortaleza tendo como pesquisador responsável DEBORAH DOS SANTOS GARRUTI e patrocinador a EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA que traz benefícios claros a sociedade em geral.

Considerações sobre os Termos de apresentação obrigatória:

O projeto de pesquisa traz em anexo o TERMO DE CONSENTIMENTO PÓS-ESCLARECIDO compreendendo os objetivos da pesquisa, ressaltando a ciência do respondente de que terá garantido os direitos assegurados pela Resolução 466/12 do Conselho Nacional de Saúde em seus requisitos. Documentos anexados: Carta de anuência, TCLE; informações básicas do projeto; folha de rosto; projeto detalhado, cronograma e orçamento termo de justificativa devidamente assinados e carimbados.

Endereço: Av. Washington Soares-1321, Bloco-M Sala-30
Bairro: Edson Queiroz **CEP:** 60.811-905
UF: CE **Município:** FORTALEZA
Telefone: (85)3477-3122 **Fax:** (85)3477-3110 **E-mail:** coetica@unifor.br



Continuação do Parecer: 6.666.316

Recomendações:

Após a leitura da versão apresentada, não há recomendações ao projeto de pesquisa analisado.

Conclusões ou Pendências e Lista de Inadequações:

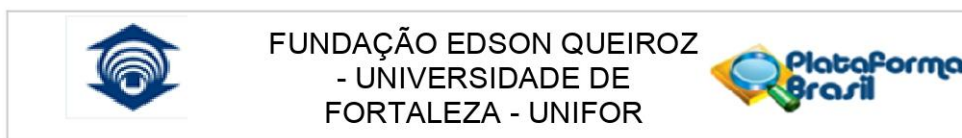
O Colegiado recomenda a Aprovação ao projeto de pesquisa visto atender, na íntegra, às determinações da Resolução CNS/MS 466/12 e diretrizes.

Considerações Finais a critério do CEP:

Este parecer foi elaborado baseado nos documentos abaixo relacionados:

Tipo Documento	Arquivo	Postagem	Autor	Situação
Informações Básicas do Projeto	PB_INFORMAÇÕES_BÁSICAS_DO_PROJETO_2280312.pdf	09/02/2024 13:21:47		Aceito
Declaração de concordância	SEI_10083934_Carta_de_Anuencia.pdf	09/02/2024 13:19:47	DEBORAH DOS SANTOS GARRUTI	Aceito
Outros	JUSTIFICATIVA_ANALISE_DOCUMENTAL.pdf	09/02/2024 10:53:28	DEBORAH DOS SANTOS GARRUTI	Aceito
Projeto Detalhado / Brochura Investigador	PROJETO_CEP_EMBRAPA_2024.pdf	09/02/2024 10:50:12	DEBORAH DOS SANTOS GARRUTI	Aceito
Folha de Rosto	folhaDeRosto_EMBRAPA_2024.pdf	09/02/2024 10:39:28	DEBORAH DOS SANTOS GARRUTI	Aceito
Informações Básicas do Projeto	PB_INFORMAÇÕES_BÁSICAS_DO_PROJETO_2280312.pdf	02/02/2024 07:32:09		Aceito
Projeto Detalhado / Brochura Investigador	PROJETO_CEP_EMBRAPA_FEV_24.pdf	02/02/2024 07:28:50	DEBORAH DOS SANTOS GARRUTI	Aceito
Projeto Detalhado / Brochura Investigador	PROJETO_CEP_EMBRAPA_FEV_24.pdf	02/02/2024 07:28:50	DEBORAH DOS SANTOS GARRUTI	Postado
TCLE / Termos de Assentimento / Justificativa de Ausência	TCLE_EMBRAPA_2024.pdf	01/02/2024 10:34:55	DEBORAH DOS SANTOS GARRUTI	Aceito
TCLE / Termos de Assentimento / Justificativa de Ausência	TCLE_EMBRAPA_2024.pdf	01/02/2024 10:34:55	DEBORAH DOS SANTOS GARRUTI	Postado
Folha de Rosto	folhaDeRosto_EMBRAPA.pdf	01/02/2024 08:30:14	DEBORAH DOS SANTOS GARRUTI	Aceito
Folha de Rosto	folhaDeRosto_EMBRAPA.pdf	01/02/2024 08:30:14	DEBORAH DOS SANTOS GARRUTI	Postado

Endereço: Av. Washington Soares-1321, Bloco-M Sala-30
Bairro: Edson Queiroz **CEP:** 60.811-905
UF: CE **Município:** FORTALEZA
Telefone: (85)3477-3122 **Fax:** (85)3477-3110 **E-mail:** coetica@unifor.br



Continuação do Parecer: 6.666.316

Situação do Parecer:

Aprovado

Necessita Apreciação da CONEP:

Não

FORTALEZA, 23 de Fevereiro de 2024

Assinado por:
ALDO ANGELIM DIAS
(Coordenador(a))

Endereço: Av. Washington Soares-1321, Bloco-M Sala-30
Bairro: Edson Queiroz **CEP:** 60.811-905
UF: CE **Município:** FORTALEZA
Telefone: (85)3477-3122 **Fax:** (85)3477-3110 **E-mail:** coetica@unifor.br

APÊNDICE A – INSTRUMENTO DE COLETA DE DADOS



Avaliação sensorial exploratória de massas alimentícias sem glúten elaboradas à base do coproduto gerado no processo de concentração de proteínas da amêndoa de castanha de caju

BLOCO 1 – Abertura

Objetivo: contextualizar e deixar os participantes confortáveis.

1. Poderiam se apresentar brevemente e comentar sua experiência com massas alimentícias e/ou produtos sem glúten?
2. Quando pensam em um macarrão de boa qualidade (tradicional ou sem glúten), quais características sensoriais vêm primeiro à mente?

BLOCO 2 – Impressão visual e tátil (antes da degustação)

Objetivo: captar expectativas iniciais.

3. Observando o macarrão cozido, como vocês descreveriam a aparência geral?
4. A cor e a superfície são compatíveis com a expectativa de uma massa sem glúten? Por quê?
5. Ao manusear o produto, que impressões vocês têm quanto à firmeza, elasticidade ou pegajosidade?

BLOCO 3 – Aroma

Objetivo: identificar notas aromáticas relevantes.

6. Que aromas vocês percebem no produto?
7. O aroma remete a algum ingrediente específico ou processo (amêndoa de castanha de caju, farinha de arroz, polvilho azedo)?
8. O aroma é agradável, neutro ou apresenta alguma limitação do ponto de vista gastronômico?

BLOCO 4 – Textura e comportamento na boca

Objetivo: avaliar o principal ponto crítico de massas sem glúten.

9. Como vocês descreveriam a textura durante a mastigação?
10. Em termos de firmeza e mastigabilidade, como este produto se compara a massas tradicionais?
11. Há percepção de arenosidade, pastosidade ou desintegração excessiva?

12. A massa mantém estrutura ao longo da mastigação ou se quebra facilmente?

Pergunta de sondagem:

- Isso seria um problema ou poderia ser aceitável dependendo da aplicação?

BLOCO 5 – Sabor e sensações residuais

Objetivo: compreender identidade sensorial e possíveis defeitos

13. Como vocês descreveriam o sabor predominante do macarrão?

14. O sabor da amêndoa de caju é perceptível? É positivo ou limitante?

15. Há sabores residuais relevantes (oleaginoso, amargo, adstringente)?

16. Alguma nota poderia ser considerada defeito sensorial?

BLOCO 6 – Aplicação gastronômica

Objetivo: conectar percepção sensorial ao uso prático

17. Em que tipos de preparações culinárias vocês utilizariam este macarrão?

18. Ele funcionaria melhor com quais tipos de molho (leves, cremosos, gordurosos, condimentados)?

19. Vocês veem este produto mais como prato principal, acompanhamento ou ingrediente funcional?

BLOCO 7 – Avaliação crítica e sugestões

Objetivo: gerar insights para melhoria e posicionamento

20. Quais são os principais pontos fortes deste produto?

21. Quais aspectos sensoriais precisariam ser melhorados?

22. Do ponto de vista gastronômico, este produto tem potencial de mercado? Em que nicho?

BLOCO 8 – Avaliação crítica e sugestões

- Registro de observações espontâneas não contempladas nas perguntas.