

INSTITUTO DE TECNOLOGIA DE ALIMENTOS
Centro de Ciência e Qualidade de Alimentos

ANDRIÉLI APARÍCIO COELHO

**FARINHA AMILÁCEA DE FEIJÃO CARIOCA: APLICAÇÃO E MODIFICAÇÃO POR
MICRO-ONDAS**

CAMPINAS

2025

ANDRIÉLI APARÍCIO COELHO

**FARINHA AMILÁCEA DE FEIJÃO CARIOCA: APLICAÇÃO E MODIFICAÇÃO POR
MICRO-ONDAS**

*Dissertação apresentada ao Instituto de
Tecnologia de Alimentos para obtenção do
título de Mestre em Ciência e Tecnologia
de Alimentos.*

Aluno: Andriéli Aparício Coelho

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria Teresa
Bertoldo Pacheco

Coorientadora: Dr^a. Elizabeth Harumi
Nabeshima

Este exemplar corresponde à versão final da Dissertação defendida pelo aluno Andriéli Aparício Coelho e orientada pelo Prof(a). Dr(a). Maria Teresa Bertoldo Pacheco.

CAMPINAS

2025

Agência(s): O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).
Nº do proc.: 2023/03401-8

FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha elaborada pela bibliotecária Vangri de Oliveira Camargo CRB/8 6919-0
- Núcleo de Documentação Científica do Instituto Agrônômico

C672f Coelho, Andriéli Aparício

Farinha amilácea de feijão carioca: Aplicação e modificação por micro-ondas / Andriéli Aparício Coelho. Campinas, 2025. 105 fls.

Orientadora: Maria Teresa Bertoldo Pacheco

Coorientadora: Elizabeth Harumi Nabeshima

Dissertação (Mestrado) em Ciência e Tecnologia De Alimentos – ITAL

1. Amido. 2. Fracionamento a seco. 3. Propriedades tecnofuncionais;
4. Modificação física. 5. Tecnologia emergente. I. Pacheco, Maria Teresa Bertoldo. II. Nabeshima, Elizabeth Harumi III. Título.

CDD. 664.2

Título em inglês: Carioca bean starch flour: application and modification by microwave.

Key-words: Starch; dry fractionation; techno-functional properties; physical modification; pulses.

Titulação: Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos

Banca Examinadora: Dr.^a Kaciane Andreola (titular), Dr.^a Denise Fabiana Silvestre Becker de Almeida (titular), Dr.^o Flávio Martins Montenegro (suplente), Dr.^a Maria Teresa Bertoldo Pacheco (orientadora), Dr.^a Elizabeth Harumi Nabeshima (coorientadora).

Data da Defesa: 28 de abril de 2025.

Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos

BANCA EXAMINADORA

Este exemplar corresponde à redação final da Dissertação de Mestrado defendida por Andriéli Aparício Coelho, aprovada pela Comissão Julgadora em 28 de abril de 2025.

Prof.(a) Dr.(a) Maria Teresa Bertoldo Pacheco
CCQA (Presidente)

Prof.(a) Dr.(a) Elizabeth Harumi Nabeshima
CEREAL CHOCOTECH (coorientadora)

Dr.(a) Kaciane Andreola
CCQA (titular)

Dr.(a) Denise Fabiana Silvestre Becker de Almeida
Ingredion (titular)

Dr.(a) Flávio Martins Montenegro
CEREAL CHOCOTECH (suplente)

A ata de defesa de dissertação de mestrado com as respectivas assinaturas dos membros da banca encontra-se arquivada junto à documentação do aluno.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, minha mãe Cristiane, aos meus irmãos Tamyris, Franciele e Leon, meus sobrinhos Maria Luíza, Gael e Thales, meu cunhado Marcos e meu namorado Daniel por todo suporte, motivação, acolhimento, carinho e força em todos os momentos dessa trajetória. Eu amo muito vocês.

À minha orientadora Maria Teresa Bertoldo Pacheco, agradeço pela oportunidade em fazer parte desse projeto, pela confiança, paciência e auxílio em cada etapa desse projeto.

À minha co-orientadora Elizabeth Harumi Nabeshima, por ter aceitado fazer parte desse projeto, pelo apoio e parceria.

À Kaciane Andreola e a Elaine Kaspchak por todas as contribuições para a realizações desse projeto. A participação de vocês foi fundamental.

Ao Flávio Martins Montenegro agradeço as contribuições para a aplicação da modificação por micro-ondas no projeto e por ter se disponibilizado para acompanhar todos os ensaios, dando o suporte necessário.

A todos da plataforma IV do PBIS, pelo comprometimento, dedicação e conhecimento compartilhado, em especial, a Sarah pela parceria.

Aos pesquisadores, técnicos e demais colaboradores do ITAL, sobretudo dos Centos de Ciência e Qualidade de Alimentos (CCQA) e de Tecnologia de Cereais e Chocolates (Cereal Chocotec), por cederem a infraestrutura para realização deste projeto, pelo aprendizado e trabalho conjunto.

Aos meus professores, pelo conhecimento compartilhado, por serem profissionais essenciais a nossa sociedade e uma fonte de inspiração e admiração para mim.

Ao Instituto de Tecnologia de Alimentos, por proporcionar um ensino de qualidade, capacitação profissional e infraestrutura para a realização desse projeto.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela concessão da bolsa de mestrado e auxílio em eventos científicos.

Aos meus amigos, vocês são essenciais na minha vida em todos os momentos.

A todos que contribuíram até aqui, gratidão.

RESUMO

A farinha amilácea do feijão carioca (FAF), obtida através do processo de fracionamento a seco do grão, destaca-se pelo seu rendimento superior a 70%. Diante desse potencial, torna-se crucial estudar suas propriedades tecnofuncionais, visando contribuir para a sua aplicação industrial e agregação de valor dessa fração. No entanto, o amido em sua forma nativa apresenta limitações, como a susceptibilidade à retrogradação e baixa resistência ao processo. Para superar esses desafios, a aplicação de micro-ondas surge como uma tecnologia emergente para a modificação de suas propriedades. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo estudar as propriedades da FAF obtida por classificação por ar e aplicá-la em um sistema alimentício, bem como estudar o efeito da radiação de micro-ondas pulsada em suas propriedades. Inicialmente, a FAF foi submetida a uma caracterização físico-química e morfológica e suas propriedades térmicas, reológicas (perfil de viscosidade), físicas (dureza) e tecnofuncionais (absorção de água e óleo e, solubilidade) foram determinadas. Para avaliar sua aplicação em sistemas alimentícios foi realizada um planejamento experimental fatorial completo 2^3 , considerando as variáveis independentes: concentração de proteína (CP, 1,50% - 3,00%), açúcar (CA, 0 - 3,50%) e óleo (CO, 0 - 3,00%). Os ensaios foram realizados usando o equipamento Thermomix (5000 rpm, 13 min. a 90°C e massa de 2000g) e avaliados quanto a viscosidade final (VF), tendência a retrogradação (TR), dureza das pastas e diferença de cor (ΔE). A modificação por micro-ondas foi conduzida em um equipamento piloto (frequência de 5,8GHz e potência máxima de 700W) através de um planejamento composto central rotacional 2^2 , com as variáveis independentes: potência (120W - 680W) e pulso (1 - 5 com intervalo de 1 minuto). As variáveis de resposta analisadas foram a VF, TR, índice de absorção de água e índice de solubilidade em água das farinhas amiláceas tratadas por micro-ondas. A análise físico-química da FAF apresentou uma composição de 16,39% de proteína, 53,02% de amido com 38,71% de amilose e 11,43% de amido danificado, o que favoreceu a capacidade de absorção de água (3,56 g/g) e a solubilidade (20,86%). A interação dos corpos proteicos com os grânulos de amido foi observada na caracterização morfológica da FAF. Na aplicação em um sistema modelo a base de farinha amilácea, a concentração de proteína na farinha demonstrou ser a variável com maior influência na TR, VF, dureza e ΔE . Utilizando-

se a TR como principal critério de seleção, as condições dos ensaios 1 (CP: 1,50%), 3 (CP: 1,50% e CA: 3,50%) e 5 (CP: 1,50% e CO: 3,00%) apresentaram menores valores, mostrando-se promissoras para futuras aplicações em formulações alimentícias. Na aplicação de micro-ondas, as variáveis potência e pulso não se mostraram significativas ($p < 0,05$) nas respostas estudadas dentro do domínio experimental aplicado. Conclui-se que a FAF demonstra potencial para o desenvolvimento de novos produtos alimentícios. Sugere-se a realização de estudos adicionais, explorando uma faixa mais ampla de umidade e um intervalo maior para os pulsos na modificação por micro-ondas, com a finalidade de otimizar ainda mais suas propriedades.

Palavras-chave: Amido; fracionamento a seco; propriedades tecnofuncionais; modificação física; tecnologia emergente.

ABSTRACT

Carioca bean starch flour (FAF), obtained through the process of dry fractionation of the bean, stands out for its yield of over 70%. Given this potential, it is crucial to study its techno-functional properties, with a view to contributing to its industrial application and adding value to this fraction. However, starch in its native form has limitations, such as susceptibility to retrogradation and low resistance to processing. To overcome these challenges, the microwaves application has emerged as an emerging technology for modifying its properties. Initially, the FAF was subjected to physicochemical and morphological characterization and its thermal, rheological (viscosity profile), physical (hardness) and techno-functional (water and oil absorption and solubility) properties were determined. To evaluate its application in food systems, a 2^3 factor experimental design was carried out, considering the independent variables: protein concentration (CP, 1.50% - 3.00%), sugar (CS, 0 - 3.50%) and oil (CO, 0 - 3.00%). The tests were carried out using Thermomix equipment (5000 rpm, 13 min. at 90°C and a weight of 2000g) and evaluated in terms of final viscosity (VF), setback viscosity (SV), paste hardness and color difference (ΔE). The microwave modification was carried out in a pilot plant (frequency 5.8GHz and maximum power 700W) using a 2^2 rotatable central composite design, with the independent variables: power (120W - 680W) and pulse (1 – 5, 1 minute apart). The response variables analyzed were the VF, SV, water absorption index and water solubility index of the microwave-treated starch flour. The physicochemical analysis of FAF showed a composition of 16.39% protein, 53.02% starch with 38.71% amylose and 11.43% damaged starch, which favored water absorption capacity (3.56 g/g) and solubility (20.86%). The interaction of the protein bodies with the starch granules was observed in the morphological characterization of the FAF. When applied to a model system based on starch flour, the concentration of protein in the flour proved to be the variable with the greatest influence on the SV, VF, hardness and ΔE . Using TR as the main selection criterion, the conditions of tests 1 (CP: 1.50%), 3 (CP: 1.50% and CS: 3.50%) and 5 (CP: 1.50% and CO: 3.00%) had lower values, showing promise for future applications in food formulations. In the microwave application, the power and pulse variables were not significant ($p < 0.05$) in the responses studied within the experimental domain applied. It is concluded that FAF shows potential for the development of

new food products. It is suggested that further studies be carried out, exploring a wider range of humidity and a longer interval for the microwave modification pulses, to further optimize its properties.

Keywords: Starch; dry fractionation; techno-functional properties; physical modification; emerging technology.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1. Grão de feijão carioca logo após a colheita (A) e armazenados a 25 °C e 77% UR por cinco meses (B).....	7
Figura 2. Estrutura interna e externa da semente de feijão.....	8
Figura 3. Estrutura dos polímeros de amilopectina (A) e da amilose (B).....	9
Figura 4. Estrutura da amilopectina: (A) Características essenciais e (B) Organização das regiões amorfas e cristalinas da estrutura.....	11
Figura 5. Representação esquemática do fracionamento úmido.....	13
Figura 6. Extração de amido por fracionamento a seco.....	15
Figura 7. Representação esquemática da classificação por ar centrífugo, com alimentação do produto (1), entrada de ar da dispersão (2), palhetas de guia estáticas (3), roda classificadora (4), parede de separação (5), saída da fração grossa (6).....	16
Figura 8. Representação do processo de gelatinização e retrogradação do grânulo de amido. (A) Grânulo de amido nativo e processo de intumescimento; (B) Gelatinização e lixiviação da amilose; (C) Retrogradação da amilose durante o resfriamento; e (D) Retrogradação da amilopectina durante o armazenamento.....	19
Figura 9: Curva viscoamilográfica obtida por RVA.....	22

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

- Figura 1.** Fluxograma das etapas realizadas neste trabalho.....45
- Figura 2.** Microscopia da farinha amilácea do feijão carioca: (A) microscopia óptica com iodo (destacados em verde) e aumento de 200x, (B) microscopia óptica com luz polarizada em aumento de 200x, indicada pelas setas pretas, (C) microscopia eletrônica de varredura em aumento de 500x e (D) Microscopia eletrônica de varredura em aumento de 2000x, com indicação dos corpos proteicos em vermelho e danos ao amido em amarelo.....54
- Figura 3.** Padrão de difração de raio-X da farinha amilácea do feijão carioca.....55
- Figura 4.** Pastas obtidas a partir da aplicação da farinha amilácia do feijão carioca nas condições estabelecidas no planejamento experimental, em ordem sequencial do ensaio 1 ao 11.....66
- Figura 5.** Superfície de resposta e curva de nível para a ΔE (diferença de cor).....68

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 3

Figura 1. Fluxograma das etapas de trabalho deste estudo.....	79
Figura 2. Propriedades de pasta dos ensaios experimentais com aplicação de micro-ondas na farinha amilácea do feijão carioca.....	86
Figura 3. Índice de absorção de água (IAA) e Índice de solubilidade em água (ISA) dos ensaios experimentais com aplicação de micro-ondas na farinha amilácea do feijão carioca.....	87

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1. Teor de amilose, morfologia do grânulo, cristalinidade e temperatura de gelatinização de amidos de diferentes fontes vegetais.....	12
Tabela 2. Modificação por micro-ondas em amidos de diferentes fontes vegetais.....	30

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 1. Variáveis independentes e níveis do Planejamento Fatorial Completo 2 ³ com aplicação da farinha amilácea do feijão carioca.....	50
Tabela 2. Composição físico-química da farinha amilácea do feijão carioca.....	53
Tabela 3. Propriedades de pasta e dureza da farinha amilácea de feijão carioca.....	57
Tabela 4. Propriedades tecnofuncionais da farinha amilácea de feijão carioca.....	58
Tabela 5. Matriz do planejamento experimental com variáveis independentes reais e codificadas e resultados experimentais.....	60
Tabela 6. Teores dos componentes das formulações utilizadas no planejamento experimental em função da concentração de proteínas (1,50%, 2,25% e 3,00%).....	61
Tabela 7. Efeitos das variáveis para as respostas tendência à retrogradação e viscosidade final.....	62
Tabela 8. Análise de variância para as variáveis de resposta tendência à retrogradação e viscosidade final.....	64
Tabela 9. Efeito das variáveis para a resposta dureza.....	65
Tabela 10. Análise de variância para a variável de resposta dureza.....	66
Tabela 11. Efeito das variáveis para a resposta diferença de cor.....	67
Tabela 12. Análise de variância para a variável de resposta dureza.....	68

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 3

Tabela 1. Variáveis independentes e níveis do Planejamento Composto Central Rotacional 2^2 aplicado para modificação da farinha amilácea do feijão carioca (FAF).....80

Tabela 2. Matriz experimental com variáveis reais e codificadas e resultados experimentais da tendência à retrogradação (TR), viscosidade final (VF), índice de absorção de água (IAA) e índice de solubilidade em água (ISA).....84

Tabela 3. Efeito das variáveis para as respostas de viscosidade final e tendência à retrogradação.....85

Tabela 4. Efeito das variáveis para as respostas dos índices de absorção de água (IAA) e solubilidade em água (ISA).....87

Tabela 5. Parâmetros de gelatinização da farinha amilácea após a modificação por micro-ondas em condições selecionadas (ensaios 01 e 09) e amostra controle....91

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO: PRODUÇÃO, COMPOSIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo geral.....	3
2.2 Objetivos específicos.....	3
3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	4
CAPÍTULO 1 – ESTUDO DO AMIDO DE FEIJÃO CARIOCA: UMA REVISÃO	
1 FEIJÃO CARIOCA.....	6
2 AMIDO DE LEGUMINOSAS.....	9
2.1 MÉTODOS DE EXTRAÇÃO DO AMIDO.....	13
2.2 PROPRIEDADES DOS AMIDOS.....	18
2.3 MODIFICAÇÃO DE AMIDOS.....	25
3 APLICAÇÕES DE AMIDOS	31
4 CONCLUSÃO	33
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34
CAPÍTULO 2 – ESTUDO DA FARINHA AMILÁCEA DO FEIJÃO CARIOCA E APLICAÇÃO EM UM SISTEMA ALIMENTÍCIO	
RESUMO.....	43
1 INTRODUÇÃO.....	44
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	45
2.1 MATERIAL.....	45
2.2 MÉTODOS.....	46
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
3.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E MORFOLÓGICA.....	52
3.2 PROPRIEDADES TÉRMICAS, REOLÓGICAS E TECNOLÓGICAS.....	55
3.3 APLICAÇÃO DA FARINHA AMILÁCEA DO FEIJÃO CARIOCA EM UM SISTEMA ALIMENTÍCIO.....	69
4 CONCLUSÃO.....	70
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71
CAPÍTULO 3 – MODIFICAÇÃO DA FARINHA AMILÁCEA DO FEIJÃO CARIOCA POR MICRO-ONDAS	
RESUMO.....	77

1 INTRODUÇÃO.....	78
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	79
2.1 MATERIAL.....	79
2.2 MÉTODOS.....	80
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	83
3.1 APLICAÇÃO DE MICRO-ONDAS PARA MODIFICAÇÃO DA FARINHA AMILÁCIA DO FEIJÃO CARIOCA.....	83
4 CONCLUSÃO.....	92
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93
CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	96
SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS.....	97
APÊNDICES.....	98

1 INTRODUÇÃO

As leguminosas, como o feijão, são importantes fontes nutricionais e energéticas na alimentação humana. Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2023), o Brasil está entre os 3 principais produtores de feijão no mundo com 2,98 milhões de toneladas produzidas na safra de 2022/23, sendo a variedade de feijão carioca a mais cultivada. Contudo, vem perdendo área de produção para a soja e o milho, que associadas às mudanças nos hábitos alimentares da população, estão afetando o seu consumo (IBRAFE, 2023). Assim, incentivos à produção e o desenvolvimento de novos produtos que utilizem o feijão para oferta aos consumidores podem contribuir para um maior consumo.

O feijão é constituído, principalmente, por proteínas e carboidratos complexos, dos quais o amido representa de 45 a 60% (MIRANDA et al., 2019). Comumente, a extração dos seus constituintes ocorre por processos físicos, associados ao uso de solventes e de secagem sob altas temperaturas (SEIB, 1994). De forma alternativa, o fracionamento a seco é um método que não demanda o uso de solventes e água, envolve menor consumo energético e geração de efluentes, além de contribuir para preservar a funcionalidade e qualidade dos grânulos de amido (ASSATORY et al., 2019).

Dentre as técnicas de fracionamento a seco, a classificação por ar pode ser empregada para a separação dos constituintes de feijões, a partir da diferença de densidade e tamanho de partículas (ASSATORY et al., 2019). Esse processo resulta em uma fração fina que é rica em proteína, possui maior valor agregado e baixo rendimento e, uma fração grossa que é constituída, principalmente, por amido sendo denominada de farinha amilácea. A farinha amilácea ocorre em maior proporção nos feijões, com rendimento aproximado de 70% na classificação por ar. Devido ao seu volume expressivo, faz-se necessário estudar as suas propriedades tecnofuncionais, a fim de identificar possíveis aplicações alimentícias e agregar valor à essa fração.

Na indústria de alimentos o amido é amplamente utilizado como agente espessante, estabilizante e gelificante em molhos, sopas, confeitos, xaropes de

açúcar, sorvetes, salgadinhos, produtos cárneos, alimentos para bebês, substitutos de gordura, entre outras (PUNIA et al., 2020). Todavia, os amidos nativos podem apresentar limitações em suas funcionalidades que restringem suas aplicações, como: elevada temperatura de gelatinização, estreita faixa de viscosidade, retrogradação em baixa temperatura, textura indesejável e baixa resistência ao processo (pH ácido, agitação e aquecimento) (MAJEED et al., 2018; SCHMIELE, 2019; CEREDA, 2022). Dessa forma, modificações podem ser aplicadas para melhorar e ampliar sua aplicação industrial.

Os tratamentos que não deixam resíduos nos produtos ou no meio ambiente são desejáveis, com destaque para os métodos físicos por serem de baixo custo, rápidos e ambientalmente adequados (MANIGLIA et al., 2020). A modificação por micro-ondas pode ser aplicada para alterar as funcionalidades de amidos, favorecendo a sua capacidade de absorção de água, poder de inchamento e viscosidade de pasta (LI et al., 2019). Diante do exposto, este projeto propõe-se estudar as propriedades da farinha amilácea do feijão carioca obtida por classificação por ar e aplicá-la em um sistema alimentício, bem como estudar o efeito da irradiação de micro-ondas pulsada em suas propriedades.

O presente trabalho encontra-se dividido em três capítulos. Uma revisão bibliográfica (Capítulo 1) sobre o estado da arte do feijão carioca, do amido, métodos de extração e modificações. No Capítulo 2, foi abordado o estudo da farinha amilácea do feijão carioca obtida por fracionamento à seco quanto as propriedades físico-químicas, morfológicas e tecnofuncionais e a sua aplicação em um sistema alimentício. E o Capítulo 3, refere-se ao estudo da modificação da farinha amilácea do feijão carioca por micro-ondas associado a irradiação pulsada.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

- Estudar as propriedades da farinha amilácea do feijão carioca obtida por classificação por ar e aplicá-la em um sistema alimentício, bem como estudar o efeito da radiação de micro-ondas pulsada em suas propriedades.

2.2 Objetivos específicos

- Elaborar uma revisão sobre os aspectos relevantes sobre o feijão carioca, o amido, métodos de extração, propriedades tecnofuncionais e modificações;
- Caracterizar a farinha amilácea do feijão carioca quanto à sua composição química e morfológica, colorimetria, propriedades de pasta, térmicas e funcionais, e perfil de textura;
- Aplicar a farinha amilácea do feijão carioca em um sistema modelo alimentício;
- Avaliar o sistema alimentício a base de farinha amilácea do feijão carioca quanto a propriedades de pasta, perfil de textura e colorimetria;
- Avaliar o efeito da radiação de micro-ondas pulsada nas propriedades de pasta, térmicas e funcionais da farinha amilácea do feijão carioca.

3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSATORY, A. *et al.* Dry fractionation methods for plant protein, starch and fiber enrichment: A review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 86, p.340-351, 2019.

CEREDA, M. P. Application properties of starches extracted from underground starchy crops of South American origin. In: **Starchy Crops Morphology, Extraction, Properties and Applications**. Academic Press, p. 245 – 279, 2022.

CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de grãos, Brasília, DF, v. 10 - Safra 2022/23, n. 6 – Sexto levantamento, p. 1 – 96, 2023.

IBRAFE. Feijão pode recuperar áreas de plantio. Instituto Brasileiro de Feijões e Pulses – IBRAFE, 2023

LI, L. *et al.* Characteristics of pea, lentil and faba bean starches isolated from air-classified flours in comparison with commercial starches. **Food Chemistry**, v. 276, p. 599–607, 2019.

MAJEED, T., *et al.* Effect of sonication and γ -irradiation on the properties of pea (*Pisum sativum*) and vetch (*Vicia villosa*) starches: A comparative study. **International journal of biological macromolecules**, v. 114, p. 1144 - 1150, 2018.

MANIGLIA, B. C., *et al.* Starch modification through environmentally friendly alternatives: a review. **Food Science and Nutrition**, p. 1549-7852, 2020

MIRANDA, Joyce Aparecida Tavares de *et al.* Scanning electron microscopy and crystallinity of starches granules from cowpea, black and carioca beans in raw and cooked forms. **Food Science and Technology**, v. 39, p. 718-724, 2019.

PUNIA, S. *et al.* Kidney bean (*Phaseolus vulgaris*) starch: A review. **Legume Science**, v. 2, 2020.

SCHMIELE, M., *et al.* Physical Modifications of Starch. In: **Starches for Food Application Chemical, Technological and Health Properties**. Academic Press, p. 223 – 259, 2019.

SEIB, P. A. Wheat starch: Isolation, structure and properties. **Journal of Applied Glycoscience**, v. 41, n. 1, p. 49-69, 1994.

CAPÍTULO 1 – ESTUDO DO AMIDO DE FEIJÃO CARIOCA: UMA REVISÃO

1 FEIJÃO CARIOCA: PRODUÇÃO, COMPOSIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO

O feijão é uma das leguminosas de grande destaque mundial, considerada básica na alimentação humana (PUNIA et al., 2020). O Brasil está entre os 3 principais produtores de feijão no mundo, sendo a variedade de feijão carioca a mais cultivada (CONAB, 2023). Possui 3 épocas distintas de plantio, denominadas de safra das secas (dezembro a março), safra de inverno (abril a setembro) e safra das águas (agosto a novembro), favorecendo a oferta constante do produto (OLIVEIRA, 2010). Segundo dados da CONAB, a produção de feijão na safra de 2022/23 foi de 2,98 milhões de toneladas e o consumo foi de 2,85 milhões de toneladas, cuja produção concentrou-se nos estados do Paraná, Minas Gerais e Bahia, correspondendo a quase 50% da produção nacional (EMBRAPA, 2023).

O feijão é uma importante fonte de proteína (20%–25%), carboidratos complexos (50%–60%), dos quais o amido representa de 45 a 60%. Também é fonte de vitaminas, minerais e ácidos graxos poli-insaturados (PUNIA et al., 2020; MIRANDA et al., 2019). Fatores antinutricionais (FAN's) estão associados a este alimento, comprometendo sua digestibilidade, devido a formação de complexos entre proteínas e taninos/fenóis condensados. Além disso, oligossacarídeos tipo rafinose podem causar flatulência e desconforto após a sua ingestão (OLIVEIRA et al., 2001). Processos de cocção, extrusão, alta pressão e micro-ondas são algumas das alternativas para reduzir os FAN's. Rotineiramente, o remolho (hidratação dos grãos) pode contribuir para reduzir os componentes solúveis em água, como o ácido fítico, oligossacarídeos, taninos, entre outros (HIGASHIJIMA et al., 2020).

A composição nutricional e os FAN's do feijão podem variar de acordo com as condições de plantio (solo, irrigação e adubação), armazenamento, variedade genética e espécie. No Brasil, o feijão é armazenado sob temperaturas na faixa de 30 a 40°C e umidade relativa (UR) acima de 75%, favorecendo a oxidação de compostos presentes no tegumento do grão e outras reações químicas (SILOCHI et al., 2021). Com isso, alterações na cor do grão e outras características químicas e tecnológicas podem ser observadas. O feijão carioca (Figura 1), por exemplo, característico por apresentar tegumento de coloração bege claro com listras

marrons, passa a ter sua coloração bege escuro, requerendo maior tempo de cozimento durante o preparo (RIBEIRO et al., 2019).



Figura 1. Grão de feijão carioca logo após a colheita (A) e após armazenamento a 25 °C e 77% umidade relativa por cinco meses (B).

Fonte: Los et al. (2020).

Para a comercialização, a Instrução Normativa (IN) nº12, de março de 2008, estabelecida pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), recomenda que a umidade do feijão seja inferior ou igual a 14% (base úmida). Para isso, os grãos passam por um processo de secagem que visa reduzir a umidade e, com isso, a atividade biológica, alterações químicas e físicas (ALMEIDA et al., 2009). Ainda, de acordo com a IN nº 12 de 2008, o feijão é compreendido como o grão oriundo das espécies *Phaseolus vulgaris* L. (grupo I) e *Vigna unguiculata* (L) Walp (grupo II), podendo ser classificados em grupos, classes e tipos. A classificação por cores é estabelecida de acordo com a coloração do tegumento, podendo ser branco, preto, cores ou misturado. E conforme a tolerância de defeitos, podem ser classificados em tipo I, tipo II, tipo III e fora de tipo (BRASIL, 2008).

O feijão carioca pertence ao gênero *Phaseolus* e espécie *Phaseolus vulgaris* L. e enquadra-se na classe cores (PIRES et al., 2005; BRASIL, 2008). Sua semente (Figura 2) é formada por um embrião, composto por: hipocótilo, plúmula, radícula e cotilédone, que atuam no processo de germinação, reserva energética e desenvolvimento do grão. Externamente, possui um halo, uma micrópila, um hilo que conecta a semente ao embrião e um tegumento que é a camada mais externa, onde depositam-se os pigmentos do grão (EMBRAPA, 2023).

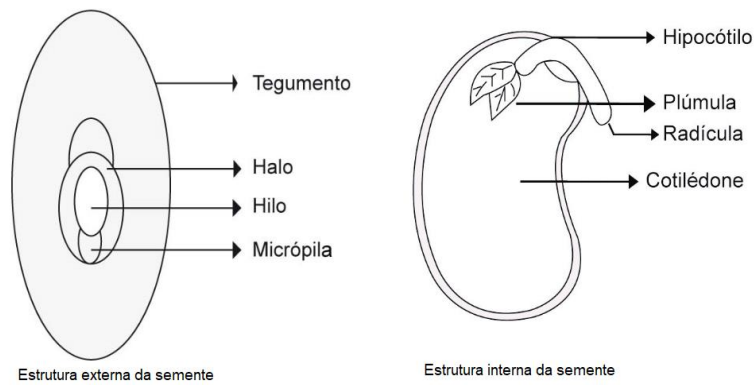


Figura 2. Estrutura interna e externa da semente do feijão.

Fonte: EMBRAPA (2023).

O feijão carioca foi desenvolvido para ser mais resistente à seca e a patógenos, de fácil adaptação climática e, portanto, elevada produtividade (RIBEIRO et al., 2003). Comercialmente, são encontradas as cultivares: Aporé; Pérola; Rudá; Princesa; BRSMG Talismã, Pioneiro, Majestoso, Madrepérola, Uai; BRS Requite, Pontal, Horizonte, 9435 Cometa, Estilo, Ametista, 10408 Notável, Sublime, FC401 RMD, FC402, FC104, FC310, FC406, FC409, FC414 e FC415 (EMBRAPA, 2023). Apesar das inúmeras cultivares disponíveis, a sua produção tem perdido espaço para culturas como a soja e o milho, impactando diretamente no preço final do grão e na diminuição do consumo (IBRAFE, 2023). Outro aspecto que contribui para reduzir o consumo do feijão é a mudança nos hábitos alimentares da população brasileira (SILOCHI et al., 2021; REZENDE et al., 2022).

O uso do feijão carioca para o desenvolvimento de produtos que atendam as demandas dos novos hábitos alimentares da população e incentivos à produção, contribuiriam para aumentar o consumo e a disponibilidade do grão. Uma alternativa para esta proposta é a valorização do amido desta leguminosa, visto que representa uma parcela considerável do grão que tem alta relevância no cenário nacional. Com isso, nos próximos itens serão abordados, de forma concisa, aspectos relevantes sobre o amido do feijão carioca e suas propriedades, considerando os impactos ambientais que permeiam seu processo de extração e métodos de modificação que podem ser aplicados.

2 AMIDO DE LEGUMINOSAS

O amido é um polímero de alta massa molecular, formado por moléculas de glicose, encontrado na forma de grânulos semicristalinos compactos e microscópicos (GALANTE et al., 1997). Está presente em diferentes tecidos e órgãos de plantas, atuando como reserva energética. É composto por cadeias lineares de amilose formadas por unidades de glicose unidas por ligações α -1,4 e cadeias ramificadas de amilopectina unidas por ligações α -1,4 e α -1,6 (HIZUKURI, 1986) conforme Figura 3.

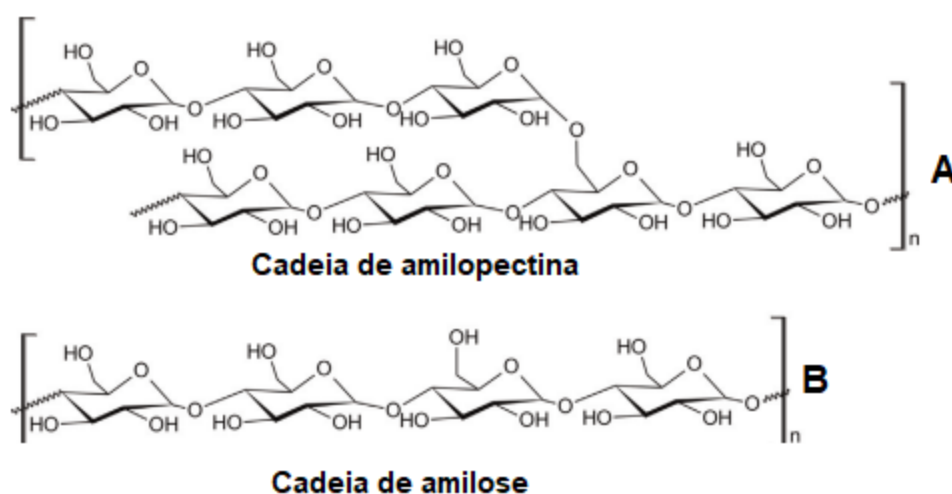


Figura 3. Estrutura dos polímeros de amilopectina (A) e da amilose (B).

Fonte: Egharevba (2019).

A molécula de amilose é amorfa, constitui de 20% a 30% do grânulo de amidos, podendo atingir até 70% da composição em amidos com alto teor de amilose (FERREIRA; ALMEIDA, 2022). Encontra-se na forma helicoidal, com átomos de hidrogênio em seu interior, apresentando caráter hidrofóbico, que possibilita a formação de complexos com ácidos graxos livres, álcool e iodo. A complexação com iodo é uma importante ferramenta para caracterização de amidos, pois reagem com a amilose e formam coloração azul em sua quantificação (POLESI, 2009). Seu grau de polimerização varia de acordo com a fonte do amido, podendo variar de 10^1 a 10^2 unidade de glicose (SWINKELS, 1985).

No feijão carioca, o teor de amilose pode variar de 34,9% a 42,0% dependendo da cultivar, da safra e das condições de colheita. Essa variação influencia nas suas

propriedades funcionais, como alta tendência à retrogradação, menor claridade de pasta, resistência ao cisalhamento e intumescimento restrito dos grânulos (LOS et al., 2021; DEMIATE et al., 2016).

A molécula de amilopectina é o principal polissacarídeo da maioria dos amidos (70% a 99%), com peso molecular cerca de 1000 vezes maior que a amilose, grau de polimerização em torno de 10^6 e comprimento variável, sendo comum apresentarem de 20 a 30 unidade de glicose. Diferentemente da amilose, a amilopectina apresenta coloração avermelhada em contato com o iodo (SWINKELS, 1985; CEREDA et al., 2001).

Os grânulos de amido podem apresentar diferentes formatos (esferas, elipsoides, polígonos, ovais, lenticulares e túbulos irregulares), cujo tamanho de partículas pode variar entre 0,1 μm a 100 μm de diâmetro em distribuições polimodais (WANG; GUO, 2020). O amido de feijão apresenta formato oval, superfície lisa, sem fissuras aparentes, com diâmetro médio entre 18,6 μm e 27,8 μm (LOS, 2019; KRINGEL et al., 2020; DEMIATE et al., 2016). As características morfológicas e tamanho de partícula dos grânulos de amido estão diretamente relacionadas às suas propriedades funcionais, como poder de intumescimento e solubilidade (FERREIRA; ALMEIDA, 2022). As características atribuídas aos grânulos de amido de diferentes fontes vegetais encontram-se na Tabela 1.

A formação de estruturas cristalinas ou formas polimórficas dependerá do empacotamento das dupla-hélices da amilopectina (WATERSCHOOT et al., 2015). As regiões cristalinas produzem padrões de raio-X que podem ser classificadas nos tipos A, B e C, conforme Figura 4 e Tabela 1. O tipo A de difração consiste em cadeias mais curtas com formação de polimorfos cristalinos, comuns em amidos de cereais; tubérculos apresentam características do tipo B com cadeias mais longas e formação de polimorfos; e o tipo C engloba cadeias dos tipos A e B e grupos redutores da molécula de amilopectina, característico em amidos de leguminosas, como o feijão, cereais com alto teor de amilose e amidos retrogradados (WANG; GUO, 2020; BANGAR et al., 2022).

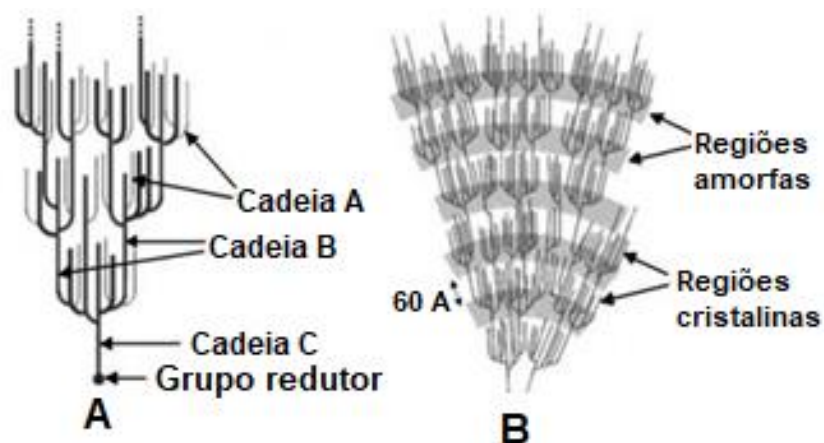


Figura 4. Estrutura da amilopectina: (A) Características essenciais e (B) Organização das regiões amorfas e cristalinas da estrutura.

Fonte: POLESI (2009).

A cristalinidade dos grânulos de amido pode ser verificada pelo fenômeno da birrefringência, observada em microscópio óptico em luz polarizada pela formação da cruz de malta (FERREIRA; ALMEIDA, 2022). A cruz de malta representa o alto grau de organização das moléculas na região cristalina (amilopectina), característica nos grânulos de amidos nativos.

O grau de cristalinidade tende a variar de 15 % a 45 %, dependendo do teor de água, empacotamento das duplas-hélices e do comprimento da cadeia de amilopectina (MOREIRA, 2022). Nas leguminosas, esse teor pode variar de 17% a 34% e feijões de variedades diferentes estão na faixa de 28 % a 35 % (BANGAR et al., 2022).

Tabela 1. Teor de amilose, morfologia do grânulo, cristalinidade e temperatura de gelatinização de amidos de diferentes fontes vegetais.

Fonte amilácea	Amilose (%)	Amilopectina (%)	Forma granular	Tamanho (µm)	Tipo de difração raio-X	Temperatura de gelatinização (°C)
Milho	≈ 25	≈ 75	Variam de pequenas esferas a grandes poligonais	3 - 20	Tipo A	60 - 80
Milho waxy	≈ 2	≈ 98	Variam de pequenas esferas a grandes poligonais	3 - 20	Tipo A	60 - 80
Milho maize	≈ 85	≈ 15	Variam de pequenos ovais a grandes alongados	5 - 20	Tipo B	> 80
Trigo	25 – 35	65 – 75	Variam de pequenos ovais e grandes lenticulares	2 - 38	Tipos A e B	54 - 65,8
Arroz	94 – 95	≈ 5	Esféricos, angulares e poligonais	3 - 10	Tipos A, B1 e B3	58 - 79
Batata	25,2 - 29,1	≈ 70	Ovais e irregulares ou cuboidais	5 - 100	Tipo B	61 - 70
Mandioca	0 – 30	70 – 100	Ovais, truncados e arredondados	2 - 32	Tipo A ou C	61 - 85
Leguminosas (feijão, ervilha e lentilha)	17 – 52	48 – 83	Esféricos, ovais e irregulares	1,0 – 100	Tipo C	> 120

Fonte: WANG; GOU (2020); WANG et. al (2021); WATERSCHOOT et al. (2015); LEFÈVRE et al. (2021).

Em amidos do tipo A, os cristais são empacotados em uma célula unitária monoclinica, como os amidos de milho nativo e *waxy* que são compostos por grânulos com formas esféricas a poliédricas e tamanho variando de 3 µm a 20 µm (WANG; GUO, 2020). Já os amidos do tipo B, apresentam cristais empacotados em uma célula unitária hexagonal, como o amido de batata que tem grânulos muito grandes, redondos ou ovais (5 µm a 100 µm), enquanto o amido de arroz tem grânulos poligonais muito pequenos (3 µm a 8 mm) (WATERSCHOOT et al., 2015). Os grânulos de amido de trigo exibem uma distribuição bimodal do tamanho das partículas com grandes grânulos de amido tipo A (23 µm a 28 µm) e grânulos menores de amido tipo B (9 µm a 11 µm) (WANG et al., 2021). Por sua vez, os amidos do tipo C, como os amidos de leguminosas aparecem em formas ovais, esféricas e irregulares, com tamanhos de 15 µm a 28 µm (REN et al., 2021).

2.1 MÉTODOS DE EXTRAÇÃO DO AMIDO

Os constituintes dos vegetais, como o amido e a proteína, são normalmente obtidos por processos de descascamento do grão e moagem em meio aquoso, seguido por separação, lavagem e purificação, conhecido como fracionamento úmido, representado na Figura 5 (ASSATORY et al., 2019).

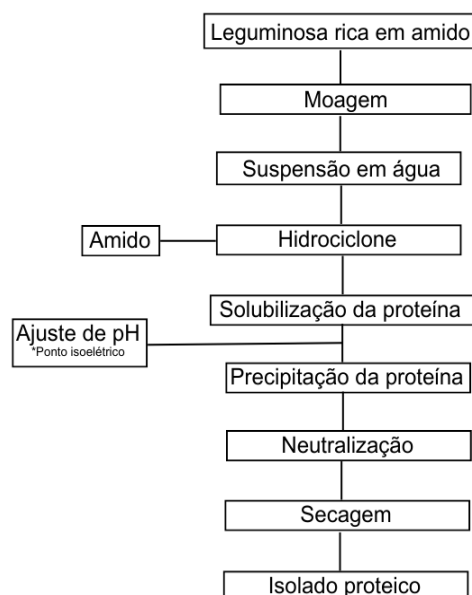


Figura 5. Representação esquemática do fracionamento úmido.

Fonte: Schutyser et al. (2015).

Na moagem úmida, é comum o uso de gás dióxido de enxofre, bissulfito e metabissulfito de sódio para enfraquecer as interações proteína-amido e inibir o crescimento microbiano (REN et al., 2021). Contudo, o dióxido de enxofre e esses sais são preocupantes quanto aos aspectos ambientais e de saúde, por serem poluentes atmosféricos e causarem problemas respiratórios (ORELLANO et al., 2021; EFSA et al., 2022). Além disso, este método de extração está associado a um alto investimento operacional, consumo de água e energia, e geração efluentes que implicam em custos para gestão de resíduos (DUMOULIN et al., 2021).

A vantagem da extração por método úmido para o amido de leguminosas, dá-se sobretudo a sua elevada pureza, contendo residual de proteína na faixa de 0,04%–0,50% e 0,01%–0,50% de cinzas (LI et al., 2019). No entanto, os solventes e as altas temperaturas de secagem aplicadas podem reduzir a qualidade do amido, além de apresentar baixo teor de amido danificado. O dano ao amido é desejado, visto que lhe confere novas características, como maior capacidade de absorção de água, por exemplo (WANG et al., 2020). Alternativamente, o fracionamento a seco pode ser aplicado para a extração do amido de leguminosas, causando menor impacto ambiental e na sua qualidade (ASSATORY et al., 2019).

O fracionamento a seco envolve a aplicação de forças mecânicas, como: fricção, colisão, impacto e cisalhamento para reduzir o tamanho das partículas a ponto de separar os grânulos de amido de uma matriz proteica. Comumente, a moagem ocorre por meio de moinhos de esferas, martelos e pinos. O descascamento dos grãos é utilizado como um pré-tratamento das leguminosas para a retirada de fibras e redução dos agentes antinutricionais (WANI et al., 2016; ASSATORY et al., 2019; SCHUTYSER et al., 2015).

As técnicas mais empregadas para extração por via seca, são o peneiramento, a moagem ultrafina, a separação eletrostática e a classificação por ar (ZHU et al., 2021). A escolha pelo método mais adequado está relacionada ao tamanho e densidade das partículas. Para o fracionamento de leguminosas com alto teor de amido, como o feijão, a classificação por ar pode ser utilizada (ASSATORY et al., 2019). A representação do processo de extração do amido por meio de

fracionamento a seco, com emprego da classificação por ar encontra-se na Figura 6.

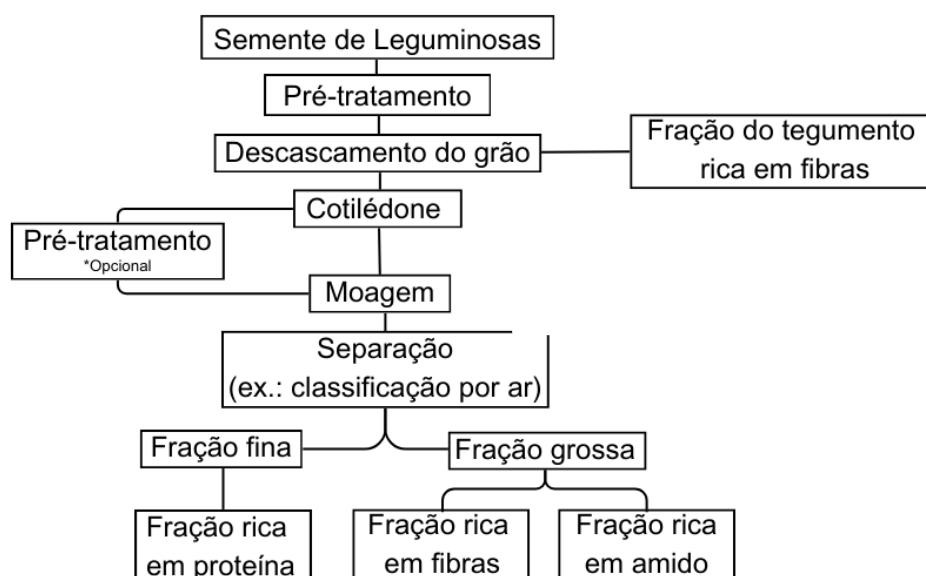


Figura 6. Extração de amido por fracionamento a seco.

Fonte: Adaptado Fernando (2021).

A moagem por pinos é o método mais empregado para a redução do tamanho de partículas durante a classificação por ar (REN et al., 2021). Para aumentar a eficiência de separação e a pureza das frações ricas em amido e proteína, as etapas de moagem e classificação podem ser repetidas até a obtenção do percentual desejado (REN et al., 2021).

Os métodos de fracionamento (seco e úmido) foram aplicados por Moller et al. (2021) em ervilhas amarelas para investigar alterações em sua composição estrutural. Para o fracionamento a seco foi utilizado moinho de pinos e um classificador com fluxo de ar de 52 m³/h, com velocidade de 5.000 rpm e taxa de alimentação 20 rpm. Já para o fracionamento úmido, a farinha de ervilha foi suspensa em 100 g de água ultrapura e agitada por 1 h, seguida de centrifugação a 1.500 g por 1 s a 20 °C. O precipitado dessa centrifugação corresponde a fração amilácea e o sobrenadante a fração proteica. Os resultados apontam que o processo de classificação por ar resultou na separação dos corpos proteicos dos grânulos de amido. Partículas de diferentes tamanhos e rugosidades

permaneceram aderidas aos grânulos, que apresentaram 13% de proteína remanescente, indicando que houve a agregação após a quebra da estrutura. A limitação do fracionamento a seco, de acordo com estes autores, ocorreu devido ao processo de moagem que foi insuficiente para atingir o tamanho de partículas desejado para separar completamente a proteína do amido. No fracionamento úmido, os autores observaram que os grânulos de amido não estavam conjugados aos corpos proteicos ou partículas distintas, sendo a separação dos componentes mais eficiente, resultando em um amido mais puro quando comparado ao método seco, corroborando com os resultados esperados para estes métodos de extração.

2.1.1 Classificação por ar

A moagem e classificação por ar de leguminosas foram investigadas até a década de 1970, recebendo menos atenção desde então, até que a demanda por métodos ambientalmente mais adequados para a extração de constituintes vegetais retomasse os estudos para sua aplicação (SCHUTYSER et al., 2015). Os classificadores por ar mais utilizados, são: gravitacional, em cascata, inercial, leito fluidizado e centrífugos (SHAPIRO; GALPERIN, 2005). Na Figura 7, está um modelo de classificador por ar centrífugo.

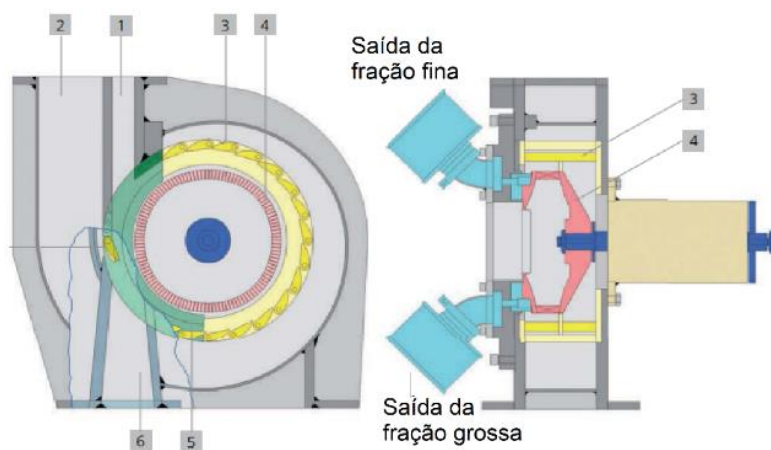


Figura 7. Representação esquemática da classificação por ar centrífugo, com alimentação do produto (1), entrada de ar da dispersão (2), palhetas de guia estáticas (3), roda classificadora (4), parede de separação (5), saída da fração grossa (6).

Fonte: Empresa Netzsch (2024).

Nessa técnica, as partículas de proteína são fisicamente separadas dos grânulos de amido, assim como outros polissacarídeos não amiláceos e fibras, através de moagem a seco (SHAPIRO; GALPERIN, 2005). As principais frações de interesse, são a fração fina rica em proteína e a fração grossa rica em amido. Ao final do processo, a fração rica em proteína (49,3% a 75,1%) ainda pode apresentar um residual de amido de até 4,6% e a fração grossa rica em amido (71% a 85,9%) pode conter proteína na faixa de 4% a 10,4% (LI et al., 2019).

A proteína remanescente do endosperma pode permanecer presa à superfície dos grânulos de amido ou serem provenientes de enzimas que participam do seu processo de síntese e degradação. E o seu conteúdo pode influenciar na funcionalidade do amido, especialmente na área de panificação. Embora, o teor de cinzas represente uma pequena quantidade (0,1% a 0,5%), pode causar instabilidade estrutural na cadeia de glicose, tornando-a propensa a ação amilolítica (FERREIRA; ALMEIDA, 2022).

A classificação por ar foi estudada por Schlangen et al. (2022) para o feijão mungo, feijão caupi e ervilha amarela. A moagem dos grãos foi realizada em moinho de pinos (pré-tratamento) e moinho de impacto. Na classificação, o fluxo de ar foi de 47 m³/h, com taxa de alimentação de 250 g/h e a velocidade da roda classificadora foi 8.000, 10.000 e 12.000 rpm. Os resultados sugerem que durante a moagem, partículas menores (proteína) estão mais aderidas aos grânulos de amido do feijão mungo, em comparação ao feijão caupi e a ervilha amarela. Esse resultado indica que a moagem é mais difícil para o feijão mungo e velocidades mais altas poderiam alterar o grau de associação entre a proteína e o amido. As velocidades aplicadas na classificação mostraram boa separação dos constituintes. Os valores aproximados para o diâmetro médio da fração amilácea do feijão caupi, da ervilha amarela e do feijão mungo foram 30 µm, 20 µm e 15 µm, respectivamente. Os autores sugeriram que o resultado do diâmetro das partículas é dependente da matriz. Por fim, aponta-se que a separação ou agregação de partículas de proteína aos grânulos de amido pode influenciar na classificação por ar, assim como a composição e a morfologia do amido.

Para entendimento, no presente trabalho, o amido resultante da classificação por ar será denominado de farinha amilácea, visto que não apresenta alto teor de pureza. Em comparação com a proteína, a farinha amilácea é de menor valor agregado e interesse comercial, mesmo representando em torno de 70% do rendimento. Desta forma, se faz necessário estudar as propriedades de pasta, térmicas e funcionais da farinha amilácea do feijão carioca, de modo a agregar valor a esta fração e com isso, possibilitar sua aplicação como ingrediente alimentício.

2.2 PROPRIEDADES DO AMIDO

2.2.1. Gelatinização e retrogradação

A gelatinização é definida como um processo hidrotérmico irreversível que causa colapso no grânulo de amido, resultando em mudanças no intumescimento do grânulo, cristalinidade, solubilidade e perda de birrefringência (LUND, 1989). Esse processo, ocorre acima da transição vítrea e o amido se torna amorfo após perder sua ordem original e estrutura cristalina (BANGAR et al., 2022). Ou seja, a amilose se difunde para fora dos grânulos e as duplas hélices da amilopectina se dissociam, formando uma pasta e liberando as moléculas de hidrogênio que se ligam à água (WANG et al., 2015). Esse processo depende da matriz do amido; proporção amilose:amilopectina; se o amido é nativo ou modificado; condições de processo; composição do alimento e interação com outros ingredientes, como açúcares e gorduras (SCHIMIELE, 2019; LUND, 1989).

A temperatura de gelatinização (início, T_o ; pico, T_p ; e conclusão, T_c) e as mudanças de entalpia (ΔH) são parâmetros importantes, pois possibilitam a compreensão da estabilidade térmica dos cristais de amido e da quantidade de energia de fusão, respectivamente (REN et al., 2021). Tais parâmetros são, normalmente, determinados por calorimetria de varredura diferencial (DSC).

Já a retrogradação é compreendida como a ação de reorganização das moléculas em uma estrutura ordenada, com a recristalização (amilose e amilopectina) de um sistema polimérico amorfo fora do equilíbrio, ocorrendo após a gelatinização e resfriamento da pasta em função do tempo (LUND, 1989; WANG et al., 2015;

CHANG et al., 2021). É caracterizada pelo aumento da viscosidade, cristalinidade relativa e liberação de água, também conhecida como sinérese (SCHIMIELE, 2019; REN et al., 2021). O processo de gelatinização e retrogradação dos grânulos de amido estão representados na Figura 8.

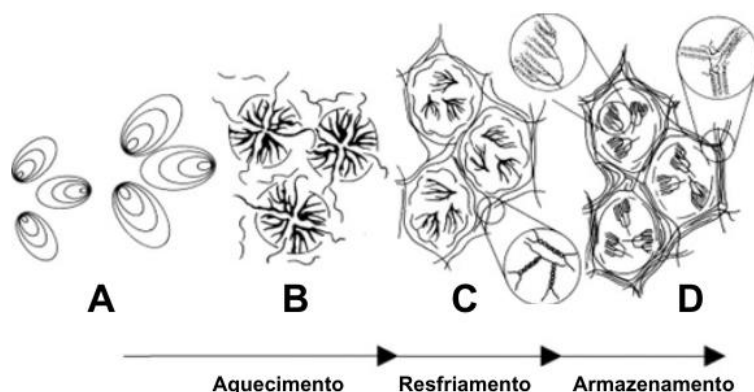


Figura 8. Representação do processo de gelatinização e retrogradação do grânulo de amido. (A) Grânulo de amido nativo e processo de intumescimento; (B) Gelatinização e lixiviação da amilose; (C) Retrogradação da amilose durante o resfriamento; e (D) Retrogradação da amilopectina durante o armazenamento.

Fonte: WANG et al. (2015).

Os fatores que têm influência na retrogradação, são: teor de água, fonte amilácea, fatores intrínsecos a matriz, condições de armazenamento e interação com outros componentes alimentares, como as proteínas (CHANG et al., 2021). As técnicas de DSC, difração por raios-x, análises reológicas, entre outras, podem ser aplicadas para avaliar as modificações causadas no amido pela retrogradação (WANG et al., 2015). As leguminosas, como os feijões, apresentam maior grau de retrogradação do que outras matrizes, como o milho e a mandioca, devido ao elevado teor de amilose e maior proporção de cadeias ramificadas de amilopectina (REN et al., 2021; SWINKLES, 1985).

As propriedades de gelatinização e retrogradação de amidos de trigo hidroxipropilado, trigo ceroso e milho ceroso foram estudadas por Wang e Shi (2020). Os amidos de trigo hidroxipropilado e trigo ceroso apresentaram T_o 60,1°C e 59,8°C, T_p 65,3 e 68,3°C, T_c 76,5 e 82,0 °C e ΔH 13,0 e 17,5 J·g⁻¹, respectivamente, indicando que o amido de trigo hidroxipropilado apresentou o

menor grau de cristalinidade. O milho ceroso apresentou o maior resultado para T_o com 66,4°C, T_p 73,9°C, T_c 86,0 °C e ΔH de 17,1 J·g⁻¹ semelhante ao trigo ceroso. Segundo os autores, um menor ΔH para o trigo hidroxipropilado, pode ser justificado pelo enfraquecimento do complexo amilose-lipídio durante o processo de hidroxipropilação. A retrogradação em maior extensão foi sugerida para o amido de milho ceroso que resultou no maior ΔH (5,7 J·g⁻¹) em comparação com o amido de trigo hidroxipropilado (3,9 J·g⁻¹) e o trigo ceroso (3,5 J·g⁻¹). A hidroxipropilação do amido ajuda a evitar que as cadeias de amilopectina se associem e formem estruturas cristalinas ao serem aplicadas aos amidos cerosos, reduzindo sua retrogradação.

Liu et al. (2023) estudaram a gelatinização e a retrogradação do amido de batata, com 28,12-34,82% de amilose. Os resultados de T_o estão na faixa de 62,89-70,09°C, T_p 66,49-73,76°C, T_f 71,28-78,59°C e ΔH 5,41–16,51 J·g⁻¹, mostrando correlação diretamente proporcional com a cristalinidade da amilopectina e inversamente proporcional com a amilose. Como a amilose contribui para a redução do ponto de fusão das regiões cristalinas dos grânulos de amido, isto pode explicar sua correlação com os resultados apresentados. A retrogradação da batata foi associada à sua textura, sugerindo que amidos com alto teor de amilose formam géis mais densos e fortes, devido a sua morfologia molecular linear.

Para o feijão carioca, com teor de amilose de 40,06% a 42,60%, as propriedades de gelatinização e retrogradação do amido foram determinadas por Los et al. (2021). O estudo apontou que T_o variou de 65,30 °C a 70,07 °C, T_p de 70,80 °C a 76,60 °C, T_f variou 76,70 °C a 81,0 °C e ΔH ficou na faixa de 7,80 a 10,00 J·g⁻¹. A variação na entalpia indicou que a endotermia da gelatinização está associada à distribuição das cadeias de amilopectina no grânulo e não necessariamente à razão amilose:amilopectina. A retrogradação calculada ficou entre 50,8% e 59,3%, este resultado foi diretamente correlacionado com o conteúdo de amilose e a cadeias mais longas de amilopectina. De acordo com os autores, a estrutura linear da amilose promove a reassociação mais facilmente, enquanto as ramificações da amilopectina formam uma rede mais lentamente. Por isso, amidos com alto teor de amilose são mais propensos à retrogradação. Como consequência da

retrogradação, a viscosidade da pasta aumenta e um gel elástico e opaco é formado.

2.2.2. Propriedades de pasta

O comportamento de amidos durante o cozimento, seguido de resfriamento é determinado por meio das propriedades de pasta (KESKIN et al., 2021). Assim, as propriedades de pasta representam o processo de mudança no amido gelatinizado (BANGAR et al., 2022). A pasta é definida como uma massa viscosa constituída por uma fase contínua de amilose solubilizada e/ou amilopectina e outra fase descontínua de grânulos fragmentados (BEMILLER; HUBER, 2010).

As técnicas mais comuns para determinar as propriedades de pasta, incluem o viscoamilógrafo Brabender (BVA), o analisador rápido de viscosidade (RVA) e reômetro acoplado a uma célula de pasta (REN et al., 2021). De acordo com Copeland et al. (2009), durante a análise de viscosidade de pasta, é importante avaliar os seguintes parâmetros:

- Temperatura de empastamento (TE): indica a temperatura de início da gelatinização;
- Pico de viscosidade (PV): corresponde a capacidade máxima de intumescimento dos grânulos de amido antes da ruptura;
- Viscosidade mínima (VM): é o menor valor de viscosidade após atingir a temperatura contante a 50°C;
- Viscosidade final (VF): corresponde ao valor da viscosidade do gel e é obtida após o resfriamento;
- Quebra de viscosidade (QV): é obtida pela diferença entre a PV e a VM; e
- Tendência a retrogradação (TR): é a diferença entre a VF e a VM. Ressaltando-se que o conceito de retrogradação não se aplica a TR, pois o tempo de resfriamento no RVA não é suficiente para reassociação completa das moléculas, mas é um indicativo desse comportamento (LOS et al., 2021).

Os parâmetros das propriedades de pasta obtidos por análise em RVA estão representados na Figura 9.

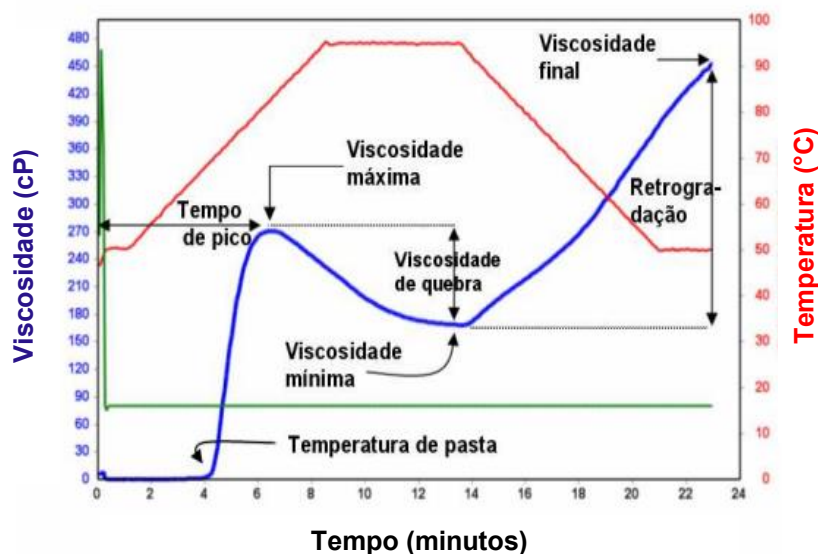


Figura 9: Curva viscoamilográfica obtida por RVA.

Fonte: Autora.

No aquecimento da pasta, a amilopectina é a principal responsável pela viscosidade, enquanto a amilose tende a restringir o inchaço dos grânulos de amido e diminuir o PV (REN et al., 2021). Ao longo do processo, a amilose ajuda a evitar o colapso dos grânulos, mantendo-os íntegros durante o intumescimento (REN et al., 2021). E na etapa final de resfriamento, a amilose contribui para uma maior VF, através da reassociação intermolecular (LI et al., 2019). O alto teor de amilose presente no amido de leguminosas tende a diminuir o inchaço dos grânulos e o PV e aumentar a VF e a TR em comparação com amidos de milho e mandioca (WANI et al., 2016; REN et al., 2021). Esse comportamento do amido de leguminosas pode ser atribuído ao teor de amilose, grau de cristalinidade, tamanho dos grânulos, teor de amido danificado e interação entre amilose/amilopectina (BANGAR et al., 2022).

As propriedades de pasta de leguminosas (feijões, grão de bico e ervilha) foram compiladas por Bangar et al. (2022), os resultados obtidos, foram: TE de 70,2 °C a 89,57 °C, PV de 14,38 a 9760 cP, VM de 358 a 5938 cP, VQ de 0 a 9039 cP, VF de 14,78 a 7635 cP e TR de 80 a 9440 cP. Os autores correlacionaram os resultados de PV com a TR e o teor de amilopectina com a QV. O início da gelatinização demanda temperaturas mais altas para amidos de leguminosas. Espera-se que amidos de leguminosas sejam mais viscosos do que os amidos de cereais e tubérculos, devido à sua maior concentração de amilose. Liu et al. (2023)

estudou o amido de milho nativo e os resultados das propriedades de pasta, foram: 75,90 °C (TE), 3112 cP (PV), 1520 cP (VM), 1592 cP (QV), 2939 cP (VF) e 1419 cP (TR). E para o amido de batata nativo, foram apresentados os seguintes resultados: 68,68 °C (TE), 2773 cP (PV), 2505 cP (VM), 268 cP (QV), 3201 cP (VF) e 693 cP (TR) (KAUL et al., 2023).

Para o amido do feijão carioca, conforme estudo realizado por Los et al. (2021), foram obtidos os seguintes resultados: 75,18 a 82,60 °C (TE), 1231,0 a 2287,5 cP (PV), 1150,5 a 1981,5 cP (VM), 80,5 a 368,0 cP (VQ), 1790,0 a 3556,0 cP (VF) e 639,5 a 1574,5 cP (TR). As maiores TE foram associadas aos menores valores de VF e maior grau de retrogradação, possivelmente devido ao comprimento da cadeia ramificada da amilopectina, que foi diretamente correlacionada com PV. Amidos com maior resistência térmica e ao cisalhamento estão associados a menores valores de QV. Os altos valores de TR, característicos em amidos de leguminosas, ocorrem devido a reassociação rápida e fácil da amilose, que provocam aumento da viscosidade durante o resfriamento.

2.2.3. Poder de intumescimento e solubilidade

O poder de intumescimento é a capacidade de um sólido absorver um líquido, enquanto sua microscopia não é alterada e sua coesão é reduzida, tornando macio e flexível o que antes era duro e quebradiço (KATZ, 1932). Isto é, indica a capacidade de absorção de água dos grânulos de amido durante o inchaço (ZHOU et al., 2014). Já a solubilidade é definida como a quantidade de uma substância que pode ser completamente dissolvida em determinada quantidade de solvente. A compreensão da solubilidade de um amido fornece informações fundamentais para o desenvolvimento e processamento em formulações, como a interação entre as cadeias de amido dentro dos domínios amorfo e cristalino (GONG et al., 2007; PUNIA et al., 2020). Esses parâmetros podem ser afetados por fatores, como: proporção entre amilose:amilopectina, comprimento da cadeia, ramificação e peso molecular, formação de complexos amilose/lipídio, impurezas, temperatura e pH (BANGAR et al., 2022).

A solubilidade do amido de variedades diferentes de feijões pode variar de 2,14% a 14,81%, sendo que para o feijão carioca foi relatada uma variação de 1,62 a 17,9% em temperaturas de 60 °C ou superiores (BANGAR et al., 2022; PUNIA et al., 2020). O amido de batata nativo apresentou solubilidade em torno de 0,66% (KAUL et al., 2023). Já para o amido de milho nativo a solubilidade pode variar de 0,14% a 14,28% em temperaturas na faixa de 50°C a 90°C (LIU et al., 2023).

2.2.4. Capacidade de absorção de água

A quantidade de água que o amido é capaz de absorver é determinada pela capacidade de absorção de água (CAA), que é relativa a características químicas conformacionais, fatores esteéricos e equilíbrio hidrofílico-hidrofóbico (WANI et al., 2016). A interação entre amilose e amilopectina com a água em temperatura ambiente é fraca, podendo ser aumentada com o enfraquecimento das ligações de hidrogênio intermoleculares pelo aumento da temperatura do meio (WANI et al., 2016).

Um levantamento da CAA do amido de leguminosas foi realizado por Wani et al. (2016), apontando que para feijões de diferentes cultivares, seu teor pode variar 1,2 a 2,2 g/g em temperatura ambiente. Para tubérculos como a batata, o CAA foi 1,77 g/g (KAUL et al., 2023) e para o amido nativo de milho foi 143,13 g/g (WU et al., 2020). Os fatores que podem afetar a CAA, são o pH, a temperatura, a força iônica, a pressão de vapor e a presença de surfactantes (WANI et al., 2016).

Como os amidos nativos são insolúveis em água fria, para uso industrial requerem agitação constante para evitar a decantação nos tanques; em soluções muito concentradas apresentam comportamento de fluidos não newtoniano, com propriedades dilatadoras, que podem dificultar o seu bombeamento em tubulações; quando aquecidos tendem a retrogradar e formar sinérese após o resfriamento; e no congelamento, as ligações intermoleculares da pasta são enfraquecidas (SCHMIELE et al., 2019). Portanto, para melhorar suas propriedades de CAA, poder de inchamento e viscosidade de pasta e ampliar sua utilização, modificações químicas, físicas, enzimáticas ou a combinação dessas podem ser empregadas (LI et al., 2019).

2.3.1 MODIFICAÇÃO DE AMIDOS

O amido em sua forma nativa apresenta limitações em suas funcionalidades, como por exemplo, elevada temperatura de gelatinização, estreita faixa de viscosidade, retrogradação em baixa temperatura, textura indesejável e baixa resistência ao processo (pH ácido, agitação e aquecimento) (SCHMIELE, 2019; CEREDA, 2022). Diante disso, modificações podem ser aplicadas para melhorar tais propriedades e ampliar sua aplicação. Para isso, métodos químicos, físicos, enzimáticos ou a combinação desses podem ser utilizados (MANIGLIA et al., 2020).

Tradicionalmente, as modificações químicas podem ser empregadas aos amidos por meio do uso de hipoclorito, acetatos, fosfatos e ácidos que atuam nos sítios ativos dos grupos hidroxila da molécula de amido. Tais modificações podem ser classificadas, como de ligação cruzada ou *cross-linking*, oxidação e esterificação (CHEN et al., 2015). Contudo, existem preocupações sobre o uso de produtos químicos em alimentos e o seu descarte no meio ambiente, devido a geração de efluentes (ANVISA, 2022; MANIGLIA et al., 2020).

Na modificação enzimática, as principais enzimas utilizadas na funcionalização de amidos, são a α e β -amilase, a amilosucrase, a aciclodextrina glicosiltransferase, a glucana transferase, a pululanase e a isoamilase. São classificadas em glicosil hidrolases e transglicosilases, que diferentemente das modificações químicas, proporcionam especificidade e seletividade (BANGAR et al., 2022). No entanto, demandam de câmara de fermentação adequada, estabilidade enzimática e controle de temperaturas, o que tornam o seu custo elevado (ZAILANI et al., 2022).

Considerando os fatores ambientais e econômicos, associadas às demandas por ingredientes com rótulos claros e limpos, tratamentos que não deixam resíduos nos produtos ou no meio ambiente são desejáveis. Os métodos físicos ganham destaque por serem de baixo custo, rápidos e ambientalmente adequados (ZAILANI et al., 2022; MANIGLIA et al., 2020). As modificações físicas são categorizadas em métodos térmicos, como a pré-gelatinização, *annealing*, extrusão e micro-ondas; e não térmicos com a alta pressão, micronização, ultrassom e campo elétrico pulsado (COMPART et al., 2023; MAJZOBI et al., 2021). Essas modificações podem ser

aplicadas para alterar o tamanho dos grânulos de amido, gerando características semelhantes às modificações químicas. As vantagens das modificações físicas, são: não necessitarem do uso de solventes químicos, são considerados econômicos no consumo de água e energia; ambientalmente adequadas e não precisam ser declarados na rotulagem (COMPART et al., 2023).

Os efeitos da modificação física no amido de feijão mungo por umidade térmica (30% de umidade, tratamento térmico a 110°C por 3h) e ultrassom (20 kHz por 30 min) foram estudados por DHULL et al. (2024). Os autores relataram que o teor de amilose foi 23,5% para o amido nativo e variou de 19,5% a 29,8% nos amidos modificados. Essa variação relaciona-se ao tipo de modificação aplicada, podendo favorecer as interações amilose-amilose, amilose-amilopectina e amilopectina-amilopectina no caso do tratamento por umidade térmica e despolimerização molecular no ultrassom. O CAA do amido nativo foi 54,6 g/g atingindo até 81,8 g/g no amido modificado por ultrassom, devido à quebra dos grânulos de amido pelas forças de cisalhamento por cavitação, que facilitam a ligação com a água.

O amido de ervilha submetido a modificação com ultrassom (sonicação a 33 kHz por 45 min) e a um tratamento duplo de sonicação seguida de radiação (5 kGy) foi estudado por Majeed et al. (2018). Nesse estudo, os autores observaram que o teor de amilose reduziu de 31,08% (amido nativo) para 27,83% (modificado por sonificação e irradiação). Esse resultado foi justificado pela redução da ligação da amilose com o iodo, devido a sua degradação causada pela irradiação. O poder de intumescimento resultou em 7,42 g/g no amido modificação por sonicação e irradiação, enquanto o amido nativo resultou em 11,35 g/g em temperatura de 90°C. Os autores atribuíram a redução do poder de intumescimento ao enfraquecimento das interações intermoleculares, devido a despolimerização das moléculas causadas pela irradiação e degradação da amilopectina. E os resultados de sinérese também apresentaram redução de 47,82% (amido nativo) para 35,22% (amido com dupla modificação) em 120h. Segundo os autores, o resultado de sinérese está associado a redução do conteúdo de amilose.

As propriedades de pasta e CAA do amido de milho branco modificado por micro-ondas (umidade 20%, 510 W por 10 min) e por tratamento hidrotérmico (umidade

20%, 110 ± 2 °C por 8 h) foram estudadas por Balakumaran et al. (2023). Em temperatura de 70°C, os resultados de CAA foram 2,76 g/g para o amido nativo, 3,24 g/g para o amido tratado hidro termicamente e 3,27 g/g para o amido modificado por micro-ondas. E das propriedades de pasta, os resultados de VF foram 3.747 cP, 4.254 cP e 3.993 cP, e TR foram 3.236 cP, 2.825 cP e 2.658 cP para os amidos nativo, com tratamento hidrotérmico e micro-ondas, respectivamente. Os autores apontaram que os amidos modificados sofreram alterações em sua estrutura, de modo a retardar a TR em comparação com o amido nativo, tornando-o mais estável, o que é desejável em produtos alimentícios.

2.3.1.1 Micro-ondas

No espectro eletromagnético, a frequência da irradiação por micro-ondas abrange a faixa de 300 MHz a 300 GHz, com comprimentos de onda entre 1 m e 1 mm (BANIK et al., 2003). A frequência 2450 MHz é a mais utilizada, inclusive em equipamento de uso doméstico (LEWICKA et al., 2015). Em alimentos, a irradiação por micro-ondas pode ser aplicada em processos de secagem, inativação enzimática, controle de umidade e pré-gelatinização de amido, por ser um processo rápido, que não necessita de catalisadores (MAJEED et al., 2018). Além de poder ser aplicado na modificação de amidos nativos para alterar suas funcionalidades, favorecendo a sua capacidade de absorção de água, poder de inchamento e viscosidade de pasta (LI et al., 2019).

As micro-ondas são energias não ionizantes que atuam no aquecimento através da vibração das moléculas polares em um campo eletromagnético alternado, com alinhamento das moléculas ao campo aplicado (SCHMIELE et al., 2019). Assim, as interações das ondas eletromagnéticas com o amido dependerão de diversos fatores, tais como: frequência, potência, tempo de irradiação, modelo do micro-ondas, tipo de amido, densidade e propriedades dielétricas. As propriedades dielétricas do amido podem ser alteradas pela adição de agentes polares como a água, por exemplo, e estão diretamente relacionados com o grau de mudança na estrutura do amido (LI et al., 2011).

Em frequências específicas, as micro-ondas podem excitar as moléculas de amidos, acarretando a sua reorientação por acoplamento dielétrico e absorção da energia (posteriormente transformada em calor), através do atrito das moléculas e mudanças na hidratação. Com isso, os grânulos de amido são rompidos rapidamente sem que ocorra o intumescimento, levando a perda da birrefringência dos grânulos antes da temperatura de gelatinização. A superfície das moléculas é revestida pela formação de um filme que resulta em um gel macio mesmo na ausência de uma rede contínua de amilose (SCHMIELE et al., 2019).

Em amidos de trigo e milho, o tratamento com micro-ondas contribuiu para reduzir a cristalinidade, solubilidade, poder de intumescimento e a tendência à retrogradação, assim como aumentar a temperatura de gelatinização (SCHMIELE et al., 2019). Em resumo, pode modificar o amido e sua funcionalidade, por meio da indução do colapso da estrutura cristalina, contribuindo para a absorção de água, viscosidade da pasta e poder de intumescimento (LI et al., 2011).

Estudos com a aplicação de micro-ondas em amidos de diferentes matrizes são apresentados na Tabela 2. Corroborando com as informações apresentadas, a modificação por micro-ondas (30% umidade, 800 W de 1 a 8 min.) do amido de milho estudada por Zhong et al. (2019), resultou em diminuição significativa da cristalinidade a partir de 1 minuto de exposição, devido a reorganização do cristal. Com isso, os autores relataram que o aquecimento rápido (até 4 minutos) por micro-ondas, favorece a mobilidade das moléculas com alto teor de amilose e umidade de 30% e as hélices duplas soltas, sendo efetivo para a reorganização de regiões cristalinas. O poder de intumescimento do amido tratado com micro-ondas aumentou a liberação de amilose e possibilitou interações entre amilose-amilose ou amilose-amilopectina. Já para o feijão mungo (HUONG et al., 2021), o amido desramificado assistido por micro-ondas (umidade 20%, 350 W por 3 min.) apresentou menor cristalinidade relativa do que o amido nativo e maior cristalinidade após a retrogradação, sugerindo a formação de uma estrutura altamente ordenada, com maior proporção de hélices duplas. Para o feijão vermelho azuki (ZHENG et al., 2024), a modificação por micro-ondas (300 W e 900 W por 90 s.) reduziu os valores das propriedades de pasta (PV, VM, QV, FV e TR) do amido em comparação ao amido nativo, enquanto a temperatura de

empastamento aumentou. Além disso, a solubilidade aumentou com a modificação por micro-ondas, ao passo que o poder de intumescimento diminuiu. O amido de batata modificado com micro-ondas (300 W, de 1 a 5 min.) foi estudado por Kumar et al. (2020) e apresentou um aumento da CAA e redução da capacidade de absorção de óleo em exposição às micro-ondas (1 a 5 minutos). A CAA foi favorecida pela ruptura dos grânulos de amido causada pela forte tensão intercristais que levam a redução da umidade e transformação do amido cristalino para amorfo, permitindo a absorção da água.

Diante do exposto, entende-se que a modificação por micro-ondas pode resultar em amidos com propriedades distintas, em um curto tempo de exposição, possibilitando a aplicação deste amido em formulações alimentícias.

Tabela 2. Modificação por micro-ondas em amidos de diferentes fontes vegetais.

Fonte amilácea	Modelo do equipamento	Potência aplicada (Watts)	Tempo de exposição (segundos)	Umidade (%)	Considerações	Referência
Feijão fava	Convencional, Panasonic NNSB646S	2 e 6	30 e 60	20 e 40	Condições mais severas resultaram em redução da viscosidade, aumento no teor de amilose e solubilidade.	1
Cevada	Convencional, Galanz G80F20CN2L-B8	640, 720 e 800	60, 120 e 180	13	Aumentou a digestibilidade do amido e causou deformação na superfície dos grânulos	2
Batata	Convencional, Samsung CE104VD-B	300	60, 180 e 300	NI*	Redução da cristalinidade após em 1 minuto de tratamento; Tratamento com 5 minutos contribui para aumentar a capacidade de absorção de água e reduzir a capacidade de absorção de óleo.	3
Sagu	Convencional, Elba EMO2505	900	900	Suspensão 1:1,75	Melhorou a capacidade de absorção de água e óleo e aumentou o poder de intumescimento e solubilidade em água.	4
Arroz	Convencional, Chengdu TB2004M	100 e 300	NI*	30	Após o tratamento a superfície dos grânulos estava áspera e quebradiça e a cristalinidade e as duplas hélices diminuíram	5
Milho	Xianou Instrument Manufacturing	400	60 a 240	30	Redução da cristalinidade após em 1 minuto de tratamento e maior viscosidade de pico	6
Feijão mungo	Convencional, Panasonic NNSF559W	350	180	20	O feijão foi inicialmente desramificado por enzima pululanase, após tratamento por micro-ondas a cristalinidade e a formação de duplas hélices foi aumentada, assim como o teor de amido resistente.	7
Feijão azuki	NI*	300 e 900	90	Suspensão 30% amido	Aumentou a solubilidade gradualmente com a potência e a temperatura de colagem; reduziu a entalpia de gelatinização	8

Nota: 1: MENDOZA et al., (2022); 2: CHEN et al., (2021); 3: KUMAR et al., (2020); 4: ZAILANI et al., (2022); 5: HAN et al., (2021); 6: ZHONG et al., (2019); 7: HUONG et al., (2021); 8: ZHENG et al., (2024); *NI: Não informado.

3 APLICAÇÕES DE AMIDOS

Os amidos são amplamente aplicados em diferentes seguimentos. Na indústria de alimentos, são comumente utilizados pela sua propriedade espessante, e nos últimos anos tem sido explorados em aplicações como substitutos de gordura, emulsificantes, melhoradores de textura, agente encapsulante, estabilizantes, entre outros (MAJZOOBI et al., 2021; MAJEED et al., 2018). De forma geral, são empregados em formulações de molhos, sopas, confeitos, sorvetes, salgadinhos, alimentos para bebês, análogos cárneos, análogos lácteos, alimentos empanados, temperos, produtos de padaria, agente encapsulante em bebidas; estabilizantes de emulsão, cremes e alimentos enlatados, congelados e em cereais matinais (PUNIA et al., 2020; Fernando, 2021).

No contexto do desenvolvimento de produtos, a textura surge como uma importante propriedade para aplicação de amidos. Dobson et al. (2022) relatou que em análogos cárneos, a textura é um aspecto essencial, pois deve possibilitar que ingredientes, como sais e ácidos, possam ser adicionados sem que as ligações intermoleculares sejam enfraquecidas. Além de desempenhar a função de enchimento e retenção de água que favorecem as propriedades texturais e sensoriais dos produtos, contribuindo para aumentar a firmeza e a resistência ao substituir gorduras animais por óleos vegetais (BUHLER et al., 2021).

A aplicação de amidos em queijos vegetais, é realizada, principalmente, para melhorar a textura e as propriedades nutricionais do produto. Bergsma (2021) estudou a aplicação de amido nativo em formulações, apontando que concentrações de 10% a 24% podem ser adequadas. Ainda de acordo com o autor, a vantagem do uso do amido nativo na formulação é atingir o público de consumidores conscientes, e que buscam por produtos com rótulos limpos.

A presença de amidos em formulação de queijos vegetais foi estudada por Lyu et al. (2023). Os autores, relataram que a incorporação de proteínas na pasta de amido, favoreceu a capacidade de retenção de água e a viscosidade do sistema, e reduziu a sinérese. Com isso, os autores concluíram que os queijos vegetais têm

potencial para atingir as propriedades de queijos semi-moles, queijo *cheddar* e queijo gouda.

Em produtos de panificação, o amido pode ser aplicado como componente estrutural, agente espessante e gelatinizante. Além disso, pode ser aplicado como pó moldável em confeitos e na substituição parcial ou completa de polímeros plásticos de filmes comestíveis. Em filmes comestíveis, um alto teor de amilose ($\geq 70\%$) é desejado, pois contribuiu para a produção de filmes transparentes, flexíveis e resistentes a óleo (ALCÁZAR-ALAY e MEIRELES, 2015).

Os amidos modificados podem contribuir para a redução na absorção de óleo durante processos de fritura, como ocorre em nuggets. Ao serem assados, podem proporcionar uma experiência sensorial em relação a crocância e sensação na boca, semelhantes ao produto frito. Dessa forma, o valor nutricional do produto pode ser melhorado, preservando suas características sensoriais (PURCEL et al., 2014). Além disso, podem ser aplicados como substitutos de gordura em sorvete (20% na formulação), contribuindo para um maior teor de sólidos totais e viscosidade no produto, redução da capacidade de expansão e da taxa de derretimento (BANGAR et al., 2022).

Com relação a aplicação do amido de feijão em formulações alimentícias, existe uma lacuna na literatura, sendo que alguns trabalhos foram realizados com a farinha integral de feijões. A farinha de feijão preto e feijão carioca pré-gelatinizada foi avaliada no desenvolvimento de macarrão instantâneo (Bento et al., 2021). Os resultados indicaram que a presença da farinha pré-gelatinizada na formulação contribuiu para que apresentassem qualidade tecnológica adequada para a produção de massas instantâneas, como baixa solubilidade e elevada absorção de água.

Portanto, no que se refere ao amido de leguminosas, sobretudo do feijão carioca, não foram encontrados dados na literatura quanto a aplicação em alimentos, evidenciando uma oportunidade a ser explorada. Os indicativos favoráveis à sua aplicação, são os resultados para as propriedades tecnofuncionais do amido do feijão carioca citados anteriormente. No qual, apresentaram solubilidade superior a

17% e viscosidade final na faixa de 1790,0 a 3556,0 cP (BANGAR et al., 2022; PUNIA et al., 2020; LOS et al., 2021).

3 CONCLUSÃO

No estudo abordado neste capítulo, foi possível observar a relevância do feijão carioca no cenário nacional, sendo a aplicação do seu amido em formulações alimentícias uma alternativa para favorecer o seu consumo e contribuir para a sua valorização comercial.

Considerando que o método de extração influencia na pureza e na qualidade do amido, a escolha pelo método mais adequado deve ser ponderada em relação à aplicação pretendida e impactos socioambientais.

As modificações podem ser empregadas para reduzir as limitações encontradas nos amidos nativos, como à susceptibilidade a retrogradação e intumescimento restrito. Dentre as tecnologias, o micro-ondas é um dos métodos físicos que atende às demandas por rótulos mais claros e limpos, considerado ambientalmente adequado, que pode ser aplicado em amidos de feijões.

A aplicação do amido de feijão carioca em formulações alimentícias precisa ser mais explorada, para aplicações como substituto de gorduras, produtos de panificação, no empanamento de produtos fritos e em análogos de carne, por exemplo.

Por fim, estudos exploratórios e experimentais quanto às propriedades e aplicação do amido do feijão carioca são essenciais para um direcionamento mais aprofundado de uso desse amido. E ainda, contribuiria para a pesquisa nacional e mundial.

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, D. P., et al. Cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). **Global Science and Technology**, v.2, 2009.
- ANCONA, D. B., et. al. Wet-fractionation of *Phaseolus lunatus* seeds: partial characterization of starch and protein. **Science of Food and Agriculture**, v. 84, p. 1193-1201, 2004.
- ANVISA. Resolução da diretoria colegiada - RDC N° 727, de 1° de julho de 2022: dispõe sobre a rotulagem de alimentos embalados. Brasília, DF, 2022. Acessado em: 22 de novembro 2024.
- ASSATORY, A., et al. Dry fractionation methods for plant protein, starch and fiber enrichment: A review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 86, p.340-351, 2019.
- BALAKUMARAN, M., et al. White finger millet starch: Hydrothermal and microwave modification and its characterization. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 242, p. 124619, 2023.
- BANGAR, S. P., et al. Enzymatic modification of starch: A green approach for starch applications. **Carbohydrate Polymers**, v. 287, p. 119265, 2022.
- BANIK, S., et al. Bioeffects of microwave—a brief review. **Bioresource technology**, v. 87, n. 2, p. 155-159, 2003.
- BEMILLER, J. N.; HUBER, K. C. Carboidratos. In: DAMODARAN, S.; PARKIN, K. L.; FENNEMA, O. R. **Química de Alimentos de Fennema**. 4a ed. Artmed, 2010.
- BENTO, J. A. C., et. al. Pre-gelatinized flours of black and carioca bean by-products: Development of gluten-free instant pasta and baked snacks. **International Journal of Gastronomy and Food Science**, v.25, p. 100383, 2021.
- BERTELI, M. N., et al. Levantamento das distribuições de temperatura em leite de arroz com casca durante o tratamento térmico por micro-ondas. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 17, p. 319-328, 2014.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 12, de 28 de março de 2008. Estabelece o Regulamento Técnico do Feijão. Diário Oficial da União, Brasília, 28 mar. 2008. Acesso em: 17 jul. 2024.

CEREDA, M. P., et. al. Propriedades gerais do amido. Campinas: **Fundação Cargill**, v. 1, p.224. 2001.

CEREDA, M. P. Application properties of starches extracted from underground starchy crops of South American origin. In: **Starchy Crops Morphology, Extraction, Properties and Applications**. Academic Press, p. 245 – 279, 2022.

CHANG, Q., et al. A comprehensive review of the factors influencing the formation of retrograded starch. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 185, p. 163 – 173, 2021.

CHEN, Q., et al. Recent progress in chemical modification of starch and its applications. **The Royal Society of Chemistry**, v. 5, p. 67459–67474, 2015.

CHEN, X., et al. Microwave irradiation alters the rheological properties and molecular structure of hull-less barley starch. **Food Hydrocolloids**, v. 120, p. 106821, 2021.

COMPART, J., et al. Customizing starch properties: A review of starch modifications and their applications. **Polymers**, v. 15, n. 16, p. 3491, 2023.

CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de grãos, Brasília, DF, v. 10 - Safra 2022/23, n. 6 – Sexto levantamento, p. 1 – 96, 2023.

COPELAND, L., et al. Form and functionality of starch. **Food Hydrocolloids**, v. 23, p.1527-1534, 2009.

DEMIATE, I. M., et al. Physicochemical characterization of starches from dry beans cultivated in Brazil. **Food Hydrocolloids**, v. 61, p. 812–820, 2016.

DENARDIN, C. C., et al. Starch granule's structure and its regards with physicochemical properties. **Ciência Rural**, v. 39, p. 945-954, 2009.

DHULL, S. B., et al. Exploring the effects of thermal and non-thermal modification methods on morphological, functional, and pasting properties of mung bean starch. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v.92, p. 103581, 2024

DUMOULIN, L., et al. Dry and wet fractionation of plant proteins: How a hybrid process increases yield and impacts nutritional value of faba beans proteins. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 72, p. 102747, 2015.

EFSA. Panel on Food Additives and Flavorings. **EFSA Journal**, v. 20, n. 11, p. e07594, 2022.

EGHAREVBA, H. O. Chemical properties of starch and its application in the food industry. **Chemical properties of starch**, v. 9, 2019.

EMBRAPA. Feijão. Brasília, 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/feijao/pre-producao/morfologia>. Acesso em: 15 mar. 2024.

FERNANDO, S. Production of protein-rich pulse ingredients through dry fractionation: A review. **Lwt**, v. 141, p. 110961, 2021.

GALANTE, D. J., et al. Microscopy of starch: evidence of a new level of granule organization. **Carbohydrate Polymers**, v. 32, p. 177 – 191, 1997

GONG, Y., et al. Principles of solubility. **Solvent systems and their selection in pharmaceuticals and biopharmaceuticals**, p. 1-27, 2007.

HAN, Z., et al. Structural variations of rice starch affected by constant power microwave treatment. **Food chemistry**, v. 359, p. 129887, 2021.

HIZUKURI, S. Polymodal distribution of the chain lengths of amylopectins, and its significance. *Carbohydrate Research*, v. 147, p. 342 – 34, 1986.

HUONG, N. T. M., et al. Effects of microwave treatments and retrogradation on molecular crystalline structure and in vitro digestibility of debranched mung-bean starches. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 190, p. 904 – 910, 2021.

IBRAFE. Feijão pode recuperar áreas de plantio. Instituto Brasileiro de Feijões e Pulses – IBRAFE, 2023

KATZ, J. R. The laws of swelling. **Transactions of the Faraday Society**, v. 29, n. 140, p. 279-297, 1932.

KAUL, S., et al. Properties of potato starch as influenced by microwave, ultrasonication, alcoholic-alkali and pre-gelatinization treatments. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 226, p. 1341-1351, 2023

KESKIN, S. O., et al. Physico-chemical and functional properties of legume protein, starch, and dietary fiber—A review. **Legume Science**, v. 4, 2021.

KRINGEL, D. H., et al. Methods for the extraction of roots, tubers, pulses, pseudocereals, and other unconventional starches sources: a review. **Starch-Stärke**, v. 72, n. 11-12, p. 1900234, 2020.

KUMAR, Y., et al. Effect of microwave treatment (low power and varying time) on potato starch: Microstructure, thermo-functional, pasting and rheological properties. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 155, p. 27 – 35, 2020

LEWICKA, K., et al. Chemical Modifications of Starch: Microwave Effect. **International Journal of Polymer Science**, v. 2015, p. 867697, 2015

LI, L., et al. Characteristics of pea, lentil and faba bean starches isolated from air-classified flours in comparison with commercial starches. **Food Chemistry**, v. 276, p. 599–607, 2019.

LIU, W., et al. Relationship among gelatinization, retrogradation behavior, and impedance characteristics of potato starch. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 227, p. 354-364, 2023

LOS, F. G. B. Estudo do amido, proteína e compostos fenólicos do feijão Carioca. Tese - Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ponta Gossa, p. 139, 2019.

LOS, F. G. B., et al. Enzymatic hydrolysis of Carioca bean (*Phaseolus vulgaris* L.) protein as an alternative to commercially rejected grains. **LWT**, v. 125, p. 109191, 2020.

LOS, F. G. B., et al. Evaluation of Physicochemical Properties of Starch from Brazilian Carioca Beans (*Phaseolus vulgaris*). **Starch**, v. 74, p. 2000281, 2021.

LUND, D. B. Starch gelatinization. In: **Food Properties and Computer-Aided Engineering of Food Processing Systems**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1989. p. 299-311.

MAJEED, T., et al. Effect of sonication and γ -irradiation on the properties of pea (*Pisum sativum*) and vetch (*Vicia villosa*) starches: A comparative study. **International journal of biological macromolecules**, v. 114, p. 1144 - 1150, 2018.

MAJZOABI, M e FARAHNAKY, A. Granular cold-water swelling starch; properties, preparation and applications, a review. **Food Hydrocolloids**, v. 111, p. 106393, 2021.

MANIGLIA, B. C., et al. Starch modification through environmentally friendly alternatives: a review. **Food Science and Nutrition**, p. 1549-7852, 2020

MEIRELES, M. A. A.; ALCÁZAR-ALAY, S. C. Physicochemical properties, modifications and applications of starches from different botanical sources. **Food Science and Technology**, p. 35, 2015.

MENDOZA M. E. G., et al. Effect of Microwave Irradiation on Acid Hydrolysis of Faba Bean Starch: Physicochemical Changes of the Starch Granules. **Molecules**, v. 27, p. 3528, 2022.

MIRANDA, J. A. T., et al. Scanning electron microscopy and crystallinity of starches granules from cowpea, black and carioca beans in raw and cooked forms. **Food Science and Technology**, v. 39, p. 718-724, 2019.

MOLLER, A. C., et al. From raw material to mildly refined ingredient – Linking structure to composition to understand fractionation processes. **Journal of Food Engineering**, v. 291, p. 110321, 2021.

MOREIRA, P. Utilização de *dry heat treatment* em amido de ervilha: investigação das propriedades térmicas, estruturais, morfológicas, de pasta e digestibilidade in vitro. Dissertação - Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ponta Grossa, p. 60, 2022.

Netzsch. Netzsch high-efficiency fine classifier CFS/HD-S, 2024.

OLIVEIRA, A. C., et al. O processamento doméstico do feijão-comum ocasionou uma redução nos fatores antinutricionais fitatos e taninos, no teor de amido e em fatores de flatulência rafinose, estaquiose e verbascose. **Archivos Latinoamericanos de Nutrición**, v. 51, 2001.

OLIVEIRA, D. P. Qualidade Tecnológica de Grãos de Feijão-Comum em Função de Cultivares e Condições de Armazenamento. Dissertação – Universidade Federal de Lavras. Lavras, p. 95, 2010.

ORELLANO, P., et al. Short-term exposure to sulfur dioxide (SO₂) and all-cause and respiratory mortality: A systematic review and meta-analysis. **Environment International**, v. 150, p. 106434, 2021.

PIRES, C. V., et al. Composição físico-química de diferentes cultivares de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Alimentos e Nutrição, Araraquara**, v. 16, n. 2, p. 157-162, 2005.

POLESI, L. F. Amido resistente obtido a partir de amido de leguminosas e seus hidrolisados. Dissertação - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba, p.128, 2009.

PUNIA, S., et al. Kidney bean (*Phaseolus vulgaris*) starch: A review. **Legume Science**, v. 2, 2020.

PURCELL, S., et al. Enzyme-modified starch as an oil delivery system for bake-only chicken nuggets. **Journal of Food Science**, v. 79, n. 5, p. C802-C809, 2014.

REN, Y., et al. A current review of structure, functional properties, and industrial applications of pulse starches for value-added utilization. **Food Science and Food Safety**, v. 20, n. 3, p. 3061-3092, 2021.

REZENDE, G. A., et al. Consumo domiciliar de arroz e feijão no Brasil. **Revista de Política Agrícola**, v. 31, n. 2, p. 71, 2022.

RIBEIRO, N. D., et al. Consumer preference and the technological, cooking and nutritional quality of carioca beans. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 40, n. 2, p. 651-669, 2019.

RIBEIRO, N. D., et al. Progresso genético em caracteres agrônômicos no melhoramento do feijoeiro. **Ciência Rural**, v. 33, p. 629-633, 2003.

SCHLANGEN M., et al. Dry fractionation to produce functional fractions from mung bean, yellow pea and cowpea flour. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 78, p. 103018, 2022

SCHMIELE, M., et al. Physical Modifications of Starch. In: *Starches for Food Application Chemical, Technological and Health Properties*. Academic Press, p. 223 – 259, 2019.

SCHUTYSER, M. A. I., et al. Dry fractionation for sustainable production of functional legume protein concentrates. **Trends in Food Science & Technology**, v. 45, p. 327 - 335, 2015.

SEIB, P. A. Wheat starch: Isolation, structure and properties. **Journal of Applied Glycoscience**, v. 41, n. 1, p. 49-69, 1994.

SHAPIRO, M.; GALPERIN, V. Air classification of solid particles: a review. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, e. 44 n. 2, p. 279–285, 2005.

SILOCHI, R. M. H. Q., et al. Aspectos que influenciam a aquisição e preparo do feijão comum por consumidores domésticos. **Revista Faz Ciência**, v. 23, n. 37, p. 147-164, 2021.

SILVEIRA, J. G. C. Morfologia. Embrapa Arroz e Feijão, 2023.

SWINKELS, J. J. M. Composition and Properties of Commercial Native Starches. **Starch-Stärke**, v. 37, n. 1, p. 1-5, 1985.

WANG, Q., et al. A review of milling damaged starch: Generation, measurement, functionality and its effect on starch-based food systems. **Food Chemistry**, v.315, p.126267, 2020.

WANG, S., et al. Starch Retrogradation: A Comprehensive Review. **Food Science and Food Safety**, v. 14, n. 5, p. 568 – 585, 2015.

WANG, S.; GUO, P. Botanical sources of starch. **Starch structure, functionality and application in foods**, p. 9-27, 2020.

WANG, W; SHI, Y. C. Gelatinization, pasting and retrogradation properties of hydroxypropylated normal wheat, waxy wheat, and waxy maize starches. **Food Hydrocolloids**, v. 106, p. 105910, 2020.

WANG, Z., et al. Effects of thermal properties and behavior of wheat starch and gluten on their interaction: A review. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 177, p. 474–484, 2021.

WANI, I. A., et al. Isolation, composition, and physicochemical properties of starch from legumes: A review. **Starch**, v.68, p. 1-12, 2016.

WATERSCHOOT, J., et al. Production, structure, physicochemical and functional properties of maize, cassava, wheat, potato and rice starches. **Biosynthesis Nutrition Biomedical**, 2015.

WU, W., et al. Effects of extrusion technology combined with enzymatic hydrolysis on the structural and physicochemical properties of porous corn starch. **Food and Bioprocess Technology**, v. 13, p. 442-451, 2020.

ZAILANI, M. A., et al. Functional and digestibility properties of sago (Metroxylon sagu) starch modified by microwave heat treatment. **Food Hydrocolloids**, v. 122, p. 107042, 2022.

ZHENG, J., et al. The effects of E-beam irradiation and microwave combination treatment on the morphology, structure and physicochemical properties of red adzuki bean starch. **Food Hydrocolloids**, v. 152, p. 109913, 2024.

ZHONG, Y., et al. Short-time microwave treatment affects the multi-scale structure and digestive properties of high-amylose maize starch. **International journal of biological macromolecules**, v. 137, p. 870-877, 2019.

ZHOU, H., et al. Effects of salts on physicochemical, microstructural and thermal properties of potato starch. **Food chemistry**, v. 156, p. 137-143, 2014.

ZHU, H. G. et al. Electrostatic separation technology for obtaining plant protein concentrates: A review. **Trends in Food Science and Technology**, v. 113, p. 66–76, 2021.

CAPÍTULO 2 – PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DA FARINHA AMILÁCEA DO FEIJÃO CARIOCA E APLICAÇÃO EM UM SISTEMA ALIMENTÍCIO

Andriéli Aparício Coelho, Elizabeth Harumi Nabeshima, Kaciane Andreola, Elaine Kaspchak, Sarah da Costa, Mitie Sonia Sadahira, Maria Teresa Bertoldo Pacheco.

O artigo será submetido à revista: a definir

RESUMO

O amido é amplamente utilizado na indústria de alimentos, devido ao seu baixo custo e disponibilidade na natureza. De forma alternativa às fontes convencionais, as leguminosas podem ser utilizadas para extração de amido e aplicação alimentícia. Dentre elas, o feijão destaca-se por sua importância nutricional e energética, em que a variedade de feijão carioca é a mais cultivada nacionalmente. O método de extração do amido irá influenciar na sua qualidade e rendimento. A classificação por ar pode ser empregada de modo que a qualidade dos grânulos seja preservada e os impactos ambientais minimizados, além disso a fração amilácea representa cerca de 70% do rendimento do processo. Com isso, o presente estudo tem como objetivo avaliar as propriedades da farinha amilácea do feijão carioca (FAF), bem como o seu comportamento quando aplicada em um sistema alimentício. A FAF apresentou alto conteúdo de amilose (53,02%) e proteína (16,39%) remanescente do processo de classificação por ar. A etapa de moagem gerou danos ao amido (11,46%) que favoreceram as propriedades de absorção de água (3,52%) e solubilidade (20,85%). A aplicação da FAF em um sistema alimentício mostrou que a concentração de proteína na farinha teve influência positiva nas respostas estudadas, com a CP em 3,00%, contribuiu para o aumento da tendência à retrogradação, viscosidade, dureza e diferença de cor. Das condições experimentais estudadas, os ensaios 1 (CP: 1,50%), 3 (CP: 1,50% e CA: 3,50%) e 5 (CP: 1,50% e CO: 3,00%) mostram-se mais promissores para aplicação em formulações alimentícias considerando a TR como principal critério de escolha.

Palavras-chaves: amido, fracionamento a seco, planejamento experimental, propriedades funcionais e tecnológicas.

1 INTRODUÇÃO

O amido é amplamente utilizado na indústria por ser considerado de baixo custo e estar em abundância na natureza, visto que é um dos principais carboidratos presentes nas plantas, onde atua como reserva energética (PUNIA et al., 2020). Comercialmente, o milho, a batata, o arroz, a mandioca e o trigo são as fontes mais empregadas para a extração do amido (YAZID et al., 2018).

De forma alternativa, as leguminosas, como o feijão, podem ser utilizadas como fonte de amido. O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) da variedade carioca é uma das culturas nacionais de interesse e que tem o seu amido pouco estudado quanto a sua estrutura e funcionalidade (BENTO et al., 2021; CEREDA, 2022; DEMIATE et al., 2016; LOS et al., 2021; MIRANDA et al., 2019; PIRES et al., 2005). O conteúdo de amido no feijão encontra-se na faixa de 45% a 60% dos carboidratos presentes no grão (MIRANDA et al., 2019).

Em relação aos métodos de obtenção do amido, a extração por via úmida é tradicionalmente aplicada, resultando em um amido com elevada pureza, embora apresente como desvantagem o alto consumo de água, energia e geração de efluentes (DUMOULIN et al., 2021). De forma alternativa, a classificação por ar é uma das técnicas por via seca, cuja qualidade dos grânulos de amido é preservada e os impactos ambientais são minimizados (ASSATORY et al., 2019). Na classificação por ar, a fração rica em amido apresenta rendimento superior a 70% do processo de extração e pode conter proteínas e outras partículas remanescentes do processo de extração, sendo denominada de farinha amilácea (LI et al., 2019).

Embora a classificação por ar já seja utilizada industrialmente para obtenção do amido de leguminosas, ainda há poucos estudos sobre a estrutura e funcionalidade do amido para as diferentes culturas (LI et al., 2019; ANCONA et al., 2004; DUMOULIN et al., 2015; KESKIN et al., 2021; KRINGEL et al., 2020; LEFÈVRE et al., 2021; LI et al., 2019; PUNIA et al., 2020; REN et al., 2021; WANI et al., 2016). A compreensão das propriedades tecnofuncionais da farinha amilácea do feijão carioca obtida por classificação por ar contribuiria para fortalecer essa

cultura de relevância nacional, para enriquecer o estudo das diferentes cultivares de leguminosas e ainda, com o direcionamento de aplicação desse amido.

Para aplicação dos amidos, a compreensão das propriedades térmicas durante a gelatinização, a retrogradação, a solubilidade e a capacidade de absorção de água são fundamentais. Além disso, a sua influência na textura tem sido relatada como fator essencial para aceitação sensorial de produtos alimentícios (BANGAR et al., 2022; LYU et al., 2023). Os amidos podem ser aplicados em formulações de queijos vegetais, análogos de carne, produtos de panificação, em filmes comestíveis, como substitutos de gorduras, no empanamento de produtos fritos, entre outros (BERGSMA, 2021; ALCÁZAR-ALAY; MEIRELES, 2015; BUHLER et al., 2021; DOBSON et al., 2022; PURCEL et al., 2014; BENTO et al. 2021). Não foram encontradas aplicações alimentícias para o amido de feijão carioca, sendo uma oportunidade a ser explorada.

Assim, o presente estudo tem como objetivo avaliar as propriedades tecnofuncionais da farinha amilácea do feijão carioca, bem como seu comportamento quando aplicada em um sistema alimentício.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O fluxograma ilustrado pela Figura 1 mostra as etapas realizadas neste trabalho. Inicialmente, a farinha amilácea do feijão carioca (FAF) foi caracterizada. Em seguida, foi realizada a sua aplicação em sistemas alimentícios, contendo a FAF, açúcar refinado e óleo de girassol. Nos sistemas alimentícios, o conteúdo de proteínas presentes foi proveniente da FAF.

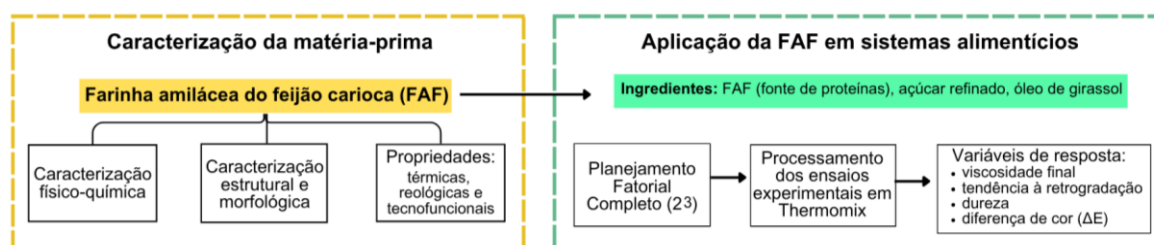


Figura 1. Fluxograma das etapas realizadas neste trabalho.

2.1 MATERIAL

O feijão carioca utilizado nesse projeto foi adquirido em unidades de recebimento de grãos da região metropolitana de Campinas-SP, em 2022. Os grãos foram moídos em moinho de impacto (CSM 165) e fracionados em classificador por ar centrífugo (CFS 5) ambos da marca Netzsch do Brasil (Pomerode/SC). Após o fracionamento, a fração grossa rica em amido denominada de farinha amilácea (FAF) apresentou rendimento de 71,65% e tamanhos característicos de 1,80 µm (D₁₀), 16,30 µm (D₅₀) e 29,40 µm (D₉₀). A amostra foi armazenada em temperatura ambiente (25 ± 2 °C).

No desenvolvimento da formulação com aplicação da FAF, foram utilizados açúcar refinado (União) e óleo de girassol (Liza) adquiridos em comércio local.

2.2 MÉTODOS

2.2.1 Caracterização da farinha amilácea do feijão carioca (FAF)

2.2.1.1 Caracterização físico-química

A composição físico-química da FAF foi determinada por meio de análises de: teor de umidade (AACC, método 44-15.02), cinzas (AOAC, método 923.03), fibra alimentar total (AOAC, método 985.29), proteínas, cujo fator de conversão de nitrogênio utilizado foi 6,25 (AOAC, método 960.52), lipídios conforme método 034/B estabelecido pelo Instituto Adolf Lutz (IAL, 2005) (LATIMER, 2012). Os carboidratos totais foram determinados por diferença de acordo com a Equação 1 (IAL, 2005).

$$\text{Carboidratos totais (\%)} = 100 - (\text{umidade} + \text{proteínas} + \text{cinzas} + \text{lipídios}) \quad (\text{Eq. 1})$$

O teor de amilose da FAF foi quantificado por espectrometria, no comprimento de onda 620nm, conforme a ISO 6647 (1987). O amido de batata (Sigma) foi o padrão utilizado. O teor de amilopectina foi calculado por diferença em função da amilose, conforme Equação 2.

$$\text{Amilopectina (\%)} = 100 - (\text{teor de amilose}) \quad (\text{Eq. 2})$$

A atividade de água (a_W) é um parâmetro que indica a quantidade de água presente nos alimentos que está disponível para participar de reações bioquímicas e microbiológicas (BEUCHAT, 1983). A a_W da FAF foi medida no equipamento 4TEV

Aqualab (Decagon, Pullman, WA, United States) em temperatura de 25 °C de acordo com as instruções do fabricante.

O amido da FAF foi avaliado em polarímetro (Schmidt Haensch, Polaritronic NIR W2) e o teor de amido danificado (AD) da FAF foi determinado utilizando o equipamento SDmatic, CHOPIN Technologies (Villeneuve-la-Garenne, France), baseado no índice de absorção de iodo (AI, %) de acordo com o método 76-33.01 da AACC (2010).

2.2.1.2 Caracterização estrutural e morfológica

Para as características estruturais e morfológicas da FAF foram realizadas análises de microscopia óptica associada a coloração com iodo (0,1N) para identificação dos grânulos de amido e microscopia eletrônica de varredura. Para a análise de microscopia óptica foi utilizado o equipamento Laborlux S (Leitz). As imagens com luz polarizada foram capturadas em aumento de 200 vezes. Para a microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi utilizado o microscópio (Tescan Veja LMU), com voltagem de aceleração de 20kV e distância de trabalho de 15 mm. A amostra foi fixada ao condutor e pulverizada com fina camada de ouro em metalizador (Balzers, SCD 050) na condição de 40 mA por 40 segundos. As magnitudes analisadas foram de 500 e 2000 vezes.

O difratograma de raios-X da FAF foi obtido através de um difratômetro de raios – X (DRX) X’Pert-MPD (Philips Analytical X Ray). As amostras maceradas em almofariz, transferidas para um porta-amostra, prensadas manualmente utilizando um bloco de prensa e o excesso foi retirado com lâmina de vidro e pincel. A análise foi conduzida seguindo os parâmetros: o tamanho do passo foi de 0,15 °2 θ , a fenda de divergência utilizada foi fixa, com abertura de divergente de 1,00 °, a fenda de recepção foi de 1,00 mm, corrente do tubo de 40 mA, voltagem do tubo de 40 kV. A varredura foi aplicada de forma contínua, com tempo de passo de 4,5s, e o material ânodo utilizado foi o cobre (Cu) (HOOVER; RATNAYAKE, 2002).

2.2.1.3 Propriedades térmicas, reológicas e tecnofuncionais

A estabilidade térmica dos cristais de amido da FAF foi avaliada por calorimetria diferencial de varredura (DSC - MDSC2920, TA Instruments, EUA), medindo a temperatura de gelatinização e variação de entalpia (ΔH). A amostra foi

homogeneizada manualmente, pesados 3,00g de amostra em um cadinho de alumínio (40 µL), seguida da adição de 12 mg de água destilada. Os cadinhos foram selados hermeticamente para análise. A amostra foi aquecida de 25° a 100 °C com taxa de aquecimento de 10 °C/min e fluxo de nitrogênio de 150 mL/min (NILSSON et al., 2022).

O comportamento do amido durante o processo de cozimento, seguido de resfriamento da FAF foi determinado pelo perfil de viscosidade utilizando o *Rapid Visco Analyser* (RVA 4500, Perten Instruments, Hägersten – Suécia) de acordo com o método 76-21.01 da AACC (1997). Na análise, 3,00g de amostra foram pesadas e misturadas a 25 mL de água destilada. As condições de análise seguiram padrão estipulado no programa *Standard 2*. Os parâmetros obtidos na análise foram: temperatura de gelatinização (TE), pico de viscosidade (PV), viscosidade mínima (VM), quebra de viscosidade (QV), viscosidade final (FV) e tendência à retrogradação (TR). As curvas foram analisadas pelo *software* TCW 3.15.1.255.

A análise do perfil de textura (TPA) da FAF foi realizada utilizando texturômetro TA-XTPPlus650H (Stable Micro Systems, Inglaterra) para simular as sensações experimentadas no consumo dos alimentos. A análise TPA realizada conforme método 76-21.01 da AACC, utilizando o *software* Exponent Connect *version* 6.1.5.9, método TPA, e *probe* cilíndrico de acrílico 25 mm. Dentre os parâmetros que podem ser determinados por esse método, a dureza é um indicador de resistência à força durante o processamento, sendo expressa em Newtons (N) (ULLAH et al., 2019).

Os índices de absorção de água (IAA) e absorção de óleo (IAO) da FAF foram determinados a partir da relação entre o peso do amido sedimentado úmido e o peso da amostra seca após centrifugação, com base no método descrito por ANDERSON et al. (1969). Para isso, foram pesados 1,00g de amostra em tubo Falcon de 50 mL e adicionados 25 mL de água a 30°C ou óleo em temperatura ambiente (25°C ± 2°C). Os tubos foram agitados em agitador rotativo (Tecnal, Piracicaba, Brasil) por 30 minutos e centrifugados (Centrifuga ROTINA 380R, Hettich, Vestfália, Alemanha) a 5000 rpm por 15 minutos. Os resultados foram calculados pela Equação 4 e expressos em g/g.

$$\text{IAA/IAO (g/g)} = \frac{\text{Peso da amostra hidratada}}{\text{Peso da amostra seca}} \quad (\text{Eq. 4})$$

A solubilidade é dada como a relação entre o peso seco dos componentes solúveis lixiviados e o peso da amostra seca (WANG et al., 2020). O índice de solubilidade em água (ISA) da FAF, foi determinado transferindo-se 10 mL do sobrenadante da análise de IAA para cadinhos e secos em estufa (Estufa MA-035, Marconi, Piracicaba, Brasil) a 105°C por 5 horas (ANDERSON et al., 1969). A Equação 5 foi aplicada para obtenção dos resultados (expressos em %).

$$\text{ISA (\%)} = \frac{(\text{Peso do sobrenadante seco}) \times 100}{(\text{Peso da amostra em base seca}) \times 2,5} \quad (\text{Eq. 5})$$

2.2.2 Aplicação da farinha amilácea do feijão carioca em um sistema alimentício

O estudo de aplicação da FAF foi realizado com base em um planejamento experimental, pois permite analisar uma variável resposta sob o efeito de múltiplos fatores em diferentes níveis, avaliando-se todas as combinações possíveis (NEVES et al., 2002). Essa abordagem também facilita a definição de condições experimentais aplicáveis ao desenvolvimento de sistemas alimentícios.

Os sistemas alimentícios compreendem as formulações contendo proteínas e polissacarídeos, como o amido, que exercem funções nutricionais e estruturais. As interações entre esses componentes afetam diretamente as propriedades físico-químicas e tecnofuncionais dos alimentos (TOLSTOGUZOV, 1995).

No presente estudo, o sistema alimentício foi elaborado com a farinha amilácea do feijão carioca, que contém intrinsecamente os dois componentes principais: amido e proteína, não havendo adição externa deles. A concentração de proteína foi ajustada de modo a contribuir nutricionalmente, sem prejudicar o desenvolvimento da formulação. Além disso, foram adicionados açúcar refinado e óleo de girassol que são ingredientes comuns em formulações na indústria alimentícia.

As faixas de trabalho das variáveis independentes — concentração de proteínas (CP), açúcar (CA) e óleo (CO) —, bem como as condições operacionais (tempo, temperatura, velocidade de agitação e massa), foram definidas a partir de ensaios preliminares. Estes ensaios visaram determinar as concentrações adequadas dos ingredientes e as limitações físicas do equipamento utilizado, o Thermomix TM5 (Vorwerk, Alemanha).

Os ensaios preliminares indicaram que a sequência ideal de adição dos ingredientes deveria ser: água, farinha amilácea (em quantidade suficiente para alcançar a concentração de proteína desejada (1,50% e 3,00%), açúcar (0,00% a 3,50%) e óleo (0,00% a 3,00%). Essa ordem garantiu uma adequada hidratação da farinha, sem comprometer a gelatinização do amido. A concentração de proteína foi definida para atender aos objetivos nutricionais, mas dentro de limites que evitassem o aumento excessivo da viscosidade, que poderia prejudicar o funcionamento do equipamento. Concentrações de óleo superiores às testadas resultaram em textura indesejada, com predomínio de óleo. Já o açúcar foi limitado ao mínimo necessário para manter a textura e cor desejadas. As condições operacionais fixas durante os ensaios foram: tempo de processo de 13 minutos, temperatura de 90 °C, agitação a 5000 rpm e massa de 2000 g.

Sendo assim, a influência das variáveis independentes (Tabela 1) foi avaliada através das variáveis de respostas: viscosidade final (VF), tendência à retrogradação (TR), dureza e diferença de cor (ΔE) por meio do Planejamento Fatorial Completo (PFC) 2^3 , com três repetições no ponto central, totalizando 11 ensaios experimentais. Os ensaios foram realizados utilizando um processador de alimentos Thermomix.

Tabela 1. Variáveis independentes e níveis do Planejamento Fatorial Completo 2^3 com aplicação da farinha amilácea do feijão carioca.

Variáveis independentes	Variáveis codificadas	Níveis		
		-1	0	+1
Concentração de proteínas (%)	X1	1,50	2,25	3,00
Concentração de açúcar (%)	X2	0,00	1,75	3,50
Concentração de óleo (%)	X3	0,00	1,50	3,00

Para este estudo, os resultados experimentais foram analisados estatisticamente utilizando o *software* Statística® 8.0 (StatSoft, Tulsa, EUA) e erro puro. A partir da análise de variância (ANOVA) e o teste t de distribuição de Student foi determinada a significância (p valor < 0,05) estatística dos modelos, considerando que os erros seguem uma distribuição normal e representam a qualidade do modelo. Os

coeficientes de determinação (R^2) foram avaliados, pois representam o ajuste do modelo aos dados experimentais.

2.2.2.1 Propriedades reológicas, tecnofuncionais e físicas dos sistemas alimentícios

As condições de processo e ingredientes estabelecidos no planejamento experimental foram reproduzidas no equipamento RVA (item 2.2.1.3) para análise do perfil de viscosidade dos sistemas alimentícios. A pesagem dos ingredientes foi realizada proporcionalmente, a fim de obter 28,00g de massa final. Os parâmetros de viscosidade final (FV) e tendência à retrogradação (TR) foram selecionados para avaliação experimental.

Para a análise de dureza (item 2.2.1.3), foram pesadas 28,00 g da pasta obtida após o processamento dos sistemas alimentícios no Thermomix. As amostras foram preparadas em triplicata, sendo acondicionadas em copos de acrílico para a análise.

A análise de cor foi realizada em colorímetro Minolta Chroma Meter CR-410 (Konica Minolta Inc., Tóquio, Japão) usando o iluminante padrão D65° (MINOLTA CORPORATION, 1994). Os parâmetros de L^* , a^* e b^* foram medidos e utilizados para obter a diferença de cor total (ΔE) das formulações do sistema alimentício, conforme Equação 6. A FAF foi utilizada como referência para os cálculos da ΔE .

$$(\Delta E) = (\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2)^{1/2} \quad (6)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados da caracterização da farinha amilácea do feijão carioca e da sua aplicação em um sistema alimentício. Com base nos resultados do PFC, foram definidas as condições promissoras para aplicação em produtos alimentícios.

3.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA, ESTRUTURAL E MORFOLÓGICA

A FAF compõe-se de 71,34% de carboidratos totais, dos quais 17,34% correspondem a fibra alimentar e 53,02% ao amido com 38,71% de amilose e

16,39% de proteína, conforme Tabela 2. A presença de proteínas remanescentes do processo de extração já era esperada na FAF, visto que a separação dos constituintes ocorreu de forma física através da diferença de tamanho e densidade das partículas (ASSATORY et al., 2019). De maneira geral, uma maior pureza para o amido é observada quando se usa solventes capazes de enfraquecer as interações entre os constituintes do grão (REN et al., 2021). Resultados semelhantes para amidos obtidos por classificação por ar foram encontrados por Li et al. (2019), para o amido de leguminosas (ervilha, lentilha e fava), em que o teor de amilose variou de 38% a 41,1% e a proteína variou de 7,9% a 20,2%. Para o amido de feijão pinto obtido por classificação por ar, o teor de amido foi de 56% e a proteína foi de 13,3% (SIMONS et al., 2017).

O teor de umidade (Tabela 2) da FAF foi de 8,48% estando de acordo com a Instrução Normativa (IN) n° 12, de março de 2008 (BRASIL, 2008) e Resolução RDC n° 263, de setembro de 2005 (BRASIL, 2005) que estabelecem os regulamentos técnicos para o feijão e amidos, respectivamente, cuja umidade deve ser inferior ou igual a 14% em base úmida. A A_w está diretamente correlacionada ao teor de umidade dos alimentos, sendo um parâmetro de avaliação importante pensando-se na aplicação da FAF como ingrediente, devido a sua relação com o crescimento de microrganismos e vida de prateleira. A FAF apresentou resultado em a_w de 0,44, encontrando-se dentro na faixa (0,61 – 0,70) considerada ideal para evitar a deterioração dos alimentos (BEUCHAT, 1983).

De acordo com a Tabela 2, a FAF apresentou um teor de 2,73% de cinzas, resultado semelhante ao relatado por Li et al. (2019) para os amidos de ervilha, lentilha e fava 1,40% – 2,29%. O teor de gordura total da FAF foi de 1,08%, enquanto o resultado de lipídios do amido de feijão pinto obtido por classificação por ar foi de 1,64% (SIMONS et al., 2017).

O dano ao amido ocorre, principalmente, na etapa de moagem do grão e é influenciado pela qualidade da matéria-prima e condições de moagem. É desejado quando promove o rompimento a nível estrutural do grânulo, favorecendo a absorção de água (WANG et al., 2020). A FAF resultou em 11,46% de amido danificado (AD) (Tabela 2), sendo superior ao valor encontrado para leguminosas moídas em moinho de impacto, como a ervilha, a lentilha, feijão fava e feijão branco

que variaram entre 0,5% e 3,4% (LI et al., 2019; BOURRÉ et al., 2019). Já matrizes como o trigo, a cevada, o arroz, a lentilha e o feijão o teor de AD foi de 0,4% a 15,7% (WANG et al., 2020).

Tabela 2. Composição físico-química da farinha amilácea do feijão carioca.

Componentes (%)	Média ± desvio padrão
Umidade	8,48 ± 0,11
Proteínas	16,39 ± 0,19
Cinzas	2,73 ± 0,00
Gorduras totais	1,08 ± 0,02
Carboidratos totais*	71,32 ± 0,07
Fibra alimentar total	17,34 ± 0,02
Amido	53,02 ± 0,80
Amilose	38,71 ± 0,38
Amilopectina**	71,29 ± 0,38
Amido danificado	11,46 ± 0,22
Atividade de água	0,44 ± 0,00

*Carboidratos totais: 100 – (umidade + proteínas + cinzas + lipídios) **Amilopectina: 100 – amilose

A microscopia de óptica é comumente utilizada para determinar a morfologia de células e tecidos vegetais, quando combinada com a coloração com iodo, formam complexos com coloração que varia do azul ao vermelho e permitem a identificação do amido (HANES; CATTLE, 1938). Na Figura 2A, é possível observar os grânulos de amido corados com iodo, destacados em verde. Adicionalmente, na Figura 2B, a cruz de malta pode ser visualizada sob luz polarizada, sendo indicada por setas pretas. A integridade da cruz de malta representa a elevada organização das moléculas na região cristalina, característica em grânulos de amido nativo (FERREIRA; ALMEIDA, 2022). A presença da cruz de malta indica que, embora o processo de moagem tenha ocasionado danos ao amido da FAF (Tabela 2), não foram suficientes para gerar desorganização molecular da região cristalina. Os possíveis danos ocasionados pela moagem na FAF podem ser verificados na Figura 2 (imagem D), em destaque amarelo. A presença de fissuras e arranhões

na superfície de alguns grânulos, causados por danos físicos no processo de moagem durante a classificação por ar também foi apontada por Ren et al. (2021).

Nas micrografias eletrônicas de varredura, na Figura 2C, é ilustrada a distribuição entre os grânulos de amido e os corpos proteicos na farinha amilácea do feijão carioca. Este resultado é reforçado na Figura 2D, onde é possível observar a interação entre os grânulos de amido e corpos proteicos destacados em vermelho, consistindo em corpos proteicos aderidos aos grânulos de amido. Tais apontamentos corroboram com os resultados apresentados na Tabela 2, que indicou 16,39% de proteína remanescente após o fracionamento. Além disso, é possível observar que os grânulos de amido são ovais, esféricos e irregulares, assim como foi apontado por LOS (2019) para o amido de feijão.

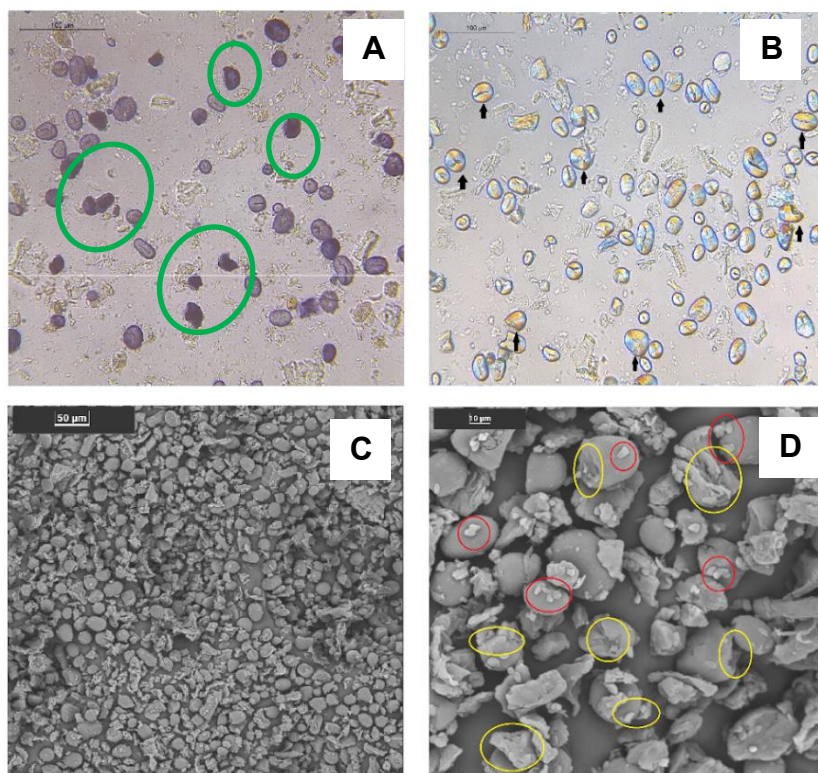


Figura 2. Microscopia da farinha amilácea do feijão carioca: (A) microscopia óptica com iodo (destacados em verde) e aumento de 200x, (B) microscopia óptica com luz polarizada em aumento de 200x, indicada pelas setas pretas, (C) microscopia eletrônica de varredura em aumento de 500x e (D) Microscopia eletrônica de varredura em aumento de 2000x, com indicação dos corpos proteicos em vermelho e danos ao amido em amarelo.

O padrão de cristalinidade do amido foi determinado por difração de raios X, Figura 3. Normalmente, os grânulos de amido de feijão apresentam de difração do tipo C (mistura dos tipos A e B), característico de leguminosas. Como esperado, a FAF apresentou estrutura cristalina do tipo C, com picos de difração em 15°, 17° e 23°. O mesmo padrão foi observado para os feijões: vermelho, preto, caupi e carioca (ZHENG et al., 2024; MIRANDA et al., 2019).



Figura 3. Padrão de difração de raio-X da farinha amilácea do feijão carioca.

3.2 PROPRIEDADES TÉRMICAS, REOLÓGICAS E TECNOLÓGICAS

A análise de DSC permite a interpretação das propriedades térmicas da gelatinização dos amidos e inferir sobre o grau de organização estrutural do amido. Os picos endotérmicos indicam a energia necessária para romper as duplas hélices nas regiões cristalina e amorfa, ou seja, a sua fusão (REN et al., 2021; PUNIA et al., 2020). A temperatura de pico (T_p) reflete a estabilidade da cristalização, sendo que valores mais altos indicam uma estrutura mais estável e ordenada (MOREIRA, 2022). A variação de entalpia (ΔH) representa a ordem das duplas hélices, quanto menor for este valor, maior será a integridade no número de duplas hélices (LIU et al., 2020). Para a FAF (Apêndice A), o T_p ocorreu em 78,47°C e o ΔH foi de 3,60 J·g⁻¹. Já o amido de feijão carioca estudado por Los et al. (2021) resultou numa variação de T_p na faixa de 70,80 °C a 76,60 °C e ΔH na faixa de 7,80 a 10,00 J·g⁻¹. Os autores associaram a variação na entalpia à distribuição das cadeias de amilopectina no grânulo e não necessariamente à razão amilose:amilopectina. Comparando-se os resultados obtidos neste estudo com os apresentados por Los

et al. (2021), há um indicativo de que a FAF apresentou estrutura mais estável, ordenada e com maior integridade das duplas hélices dentro do grânulo, que resultou na maior temperatura de pico e o menor ΔH .

Os parâmetros de propriedades de pasta da FAF podem ser observados na Tabela 3 e Apêndice B. O pico de viscosidade (PV) corresponde a capacidade máxima de intumescimento dos grânulos de amido antes da ruptura e indica a capacidade de ligação com a água (ZHANG et al., 2023). A FAF apresentou PV de 1250,75 cP, encaixando-se dentro da faixa estudada por LOS et al. (2021), em que o PV do amido do feijão carioca variou de 1231,00 cP a 2287,5 cP. Já o PV do amido de milho nativo e de mandioca foi 3112,00 cP e 4091,50 cP, respectivamente (LIU et al., 2023; OYEYINKA et al., 2020). O alto teor de amilose presente no amido de leguminosas tende a diminuir o PV e, conseqüentemente, o inchaço dos grânulos em comparação com amidos de milho e mandioca, conforme resultados apresentados (WANI et al., 2016; REN et al., 2021). O conteúdo de amilose de leguminosas pode variar de 17% a 51,69% conforme relatado por Wani et al. (2016), a FAF encontra-se dentro dessa faixa, com 38,71% de amilose. Já o milho e a mandioca podem variar de 23% a 28% e 18% a 24%, respectivamente (WATERSCHOOT et al., 2015). O conteúdo de amilose tem apresentado correlação direta com os parâmetros de viscosidade VF e TR, ou seja, quanto maior o teor de amilose, maior será a VF e a TR (BANGAR et al., 2022; WANI et al., 2016; REN et al., 2021). Este comportamento foi observado para a FAF, cujo resultado de VF foi 2491,00 cP e TR foi 1237,98 cP. Resultados semelhantes foram encontrados por Los et al. (2021), cuja VF do amido do feijão carioca variou de 1790,00 cP a 3556,00 cP e a TR de 639,50 cP a 1574,50 cP. Estes autores relataram que os altos valores de TR, ocorrem devido a reassociação rápida e fácil da amilose, que provocam aumento da viscosidade durante o resfriamento. A resistência térmica e ao cisalhamento contribuem para preservar a integridade granular e evitar o colapso dos grânulos intumescidos durante o processamento e apresentam correlação inversamente proporcional ao QV (REN et al., 2021; OBADI; XU, 2024; LOS et al.; 2021). A FAF resultou em QV de -2,75 cP. Diferentemente do que foi observado para os amidos de feijão mungo, feijão carioca e batata, que o QV variou de 80,5 a 1655,47 cP (LOS et al.; 2021; LIU et al., 2023; KAUL et al.,

2023). Com isso, sugere-se a FAF apresente resistência à temperatura e ao cisalhamento aplicados durante o processamento de alimentos.

A dureza indica a resistência à força durante o processamento e foi de 2,37 N para a pasta de amido da FAF (Tabela 3). Comparativamente, a dureza dos amidos de lentilha foi de 7,62N (amilose 27,4%), batata variou de 0,21N a 0,40 N (amilose: 24,5% a 27,5%), milho ficou na faixa de 0,21N a 0,32N (amilose: 16,9% a 21,3%) e do grão de bico foi de 7,74 N (amilose: 28,7%) (BYARS; SINGH, 2016; SANDHU; SINGH, 2007; SHAHZAD et al., 2019; SINGH et al., 2006). Estes estudos apontaram que a dureza está correlacionada com o teor de amilose da fonte amilácea. Em que os amidos com maiores teores de amilose e cadeias mais longas de amilopectina tendem a formar pastas mais duras. Esse comportamento é atribuído ao rearranjo da amilose lixiviada e dissociação das duplas hélices da amilopectina durante o processo de gelatinização e resfriamento da pasta (WANG et al., 2015). O resultado de dureza encontrado para a FAF sugere que, embora apresente alto conteúdo de amilose (38,71%), a sua dureza foi inferior ao relatado para a lentilha e o grão de bico, mesmo que estes apresentem teor de amilose inferior ao da FAF. Uma possível explicação para esse comportamento consiste nas características intrínsecas das cultivares, como por exemplo, o tamanho da cadeia de amilopectina.

Tabela 3. Propriedades de pasta e dureza da farinha amilácea de feijão carioca.

Propriedades de reológicas	Média ± desvio padrão
Pico de viscosidade (cP)	1250,75 ± 40,09
Temperatura de empastamento (°C)	83,16 ± 0,35
Quebra de viscosidade (cP)	-2,75 ± 1,89
Viscosidade mínima (cP)	1253,50 ± 41,49
Tendência à retrogradação (cP)	1237,98 ± 0,04
Viscosidade final (cP)	2491,00 ± 89,14
Dureza (N)	2,37 ± 0,03

O conhecimento sobre o comportamento de absorção de óleo de amidos é importante, pois pode influenciar nas características sensoriais de produtos

alimentícios, como por exemplo, quando são submetidos a processos de fritura. A FAF apresentou uma taxa de absorção de óleo de 2,97g/g, conforme Tabela 4. Esse valor é superior aos valores encontrados para o amido de milho normal e com alto conteúdo de amilose (50,63%) que foram de 0,24 g/g e 0,20 g/g, respectivamente (CHEN et al., 2019). As farinhas de leguminosas (feijão, lentilha e grão de bico) estudadas por Dua et al. (2014), resultaram em uma absorção de óleo na faixa de 0,93 g/g a 1,38 g/g. Estes autores relataram que a absorção de óleo tem sido associado ao conteúdo de amilose, proteínas e formação de complexos amido-lipídio. Amidos com baixo teor de amilose tem sido associado a maior absorção de óleo, assim como a presença de proteínas hidrofóbicas, pois se ligam às cadeias lipídicas. Já a formação de complexos amido-lipídio, tendem a reduzir a absorção de óleo (LUO et al., 2022). Embora a FAF apresente em sua composição 53,02% de amido e 38,71% de amilose, também é constituída por 16,39% de proteína, o que pode ter contribuído para uma maior absorção de óleo quando comparado aos dados relatos anteriormente para outras matrizes.

Tabela 4. Propriedades tecnofuncionais da farinha amilácea de feijão carioca.

Propriedades de tecnofuncionais	Média ± desvio padrão
Índice de absorção de água (g/g)	3,56 ± 0,09
Índice de absorção de óleo (g/g)	2,97 ± 0,22
Índice de solubilidade em água (%)	20,86 ± 0,41

A solubilidade de um amido fornece informações da interação entre as cadeias dentro dos domínios amorfo e cristalino que são fundamentais para a sua aplicação em formulações (GONG et al., 2007; PUNIA et al., 2020). Os amidos de leguminosas tendem a apresentar menor solubilidade, resistência ao intumescimento e à ruptura granular do que amidos de cereais, devido ao conteúdo de amilose (PUNIA et al., 2020). A resistência ao intumescimento e maior viscosidade do amido foram comportamentos observados na FAF para pico de viscosidade e viscosidade final discutidos anteriormente. O elevado teor de amilose da FAF, contribuiu para a redução do PV e resistência ao intumescimento granular, assim como para o aumento na VF. Quanto a solubilidade, a FAF resultou em 20,86%, conforme apresentado na Tabela 4. Enquanto o amido de feijão carioca

estudado por BANGAR et al. (2022) variou de 1,62% a 17,9% em temperaturas de 60 °C ou superiores. Comparado a amidos de diferentes cultivares de feijão, estes valores foram de 2,14% a 14,81% (PUNIA et al., 2020). No processo de moagem da FAF foi capaz de causar danos ao amido, sendo observado a presença de fissuras na superfície do grânulo (Figura 2 D), as quais podem ter facilitado a exposição das hidroxilas dentro das duplas hélices e contribuído para o aumento da solubilidade (WANG et al., 2020).

A absorção de água da FAF, conforme apresentado na Tabela 4, resultou em 3,56 g/g de IAA. Uma revisão de Wani et al. (2016) para amidos de leguminosas, apontou que feijões de diferentes cultivares, apresentaram IAA na faixa de 1,2 g/g a 2,2 g/g em temperatura ambiente. Para tubérculos como a batata, o IAA foi 1,77 g/g (KAUL et al., 2023) e para o amido de milho foi 143,13 g/g (WU et al., 2020). A presença de amidos danificados na FAF, provavelmente contribuiu para o aumento da sua absorção de água, por causa da presença de fissuras na superfície do grânulo. Consequentemente, a FAF resultou em maior IAA quando comparada a outras variedades de feijões como foi relatado por Wani et al. (2016).

3.3 APLICAÇÃO DA FARINHA AMILÁCEA DO FEIJÃO CARIOCA EM UM SISTEMA ALIMENTÍCIO

A fim de obter uma formulação que possa ser usada no desenvolvimento de produtos alimentícios foi realizado um estudo de aplicação da FAF por meio de um planejamento experimental fatorial completo 2³. Os resultados de viscosidade final (VF, cP), tendência à retrogradação (TR, cP), dureza (N) e diferença de cor (ΔE) são apresentados na Tabela 5, bem como a matriz utilizada neste planejamento. Os experimentos indicaram boa reprodutibilidade, considerando que os pontos centrais apresentaram valores próximos.

Tabela 5. Matriz do planejamento experimental com variáveis independentes reais e codificadas e resultados experimentais.

Ensaio	Variáveis independentes			Variáveis de respostas			
	CP (%) (X1)	CA (%) (X2)	CO (%) (X3)	TR (cP)	VF (cP)	Dureza (N)	ΔE
1	1,50 (-1)	0 (-1)	0 (-1)	465,70	824,70	6,32	19,60
2	3,00 (1)	0 (-1)	0 (-1)	13112,00	18576,50	37,55	25,08
3	1,50 (-1)	3,50 (1)	0 (-1)	328,00	797,30	5,84	8,20
4	3,00 (1)	3,50 (1)	0 (-1)	9949,00	16022,50	62,25	21,40
5	1,50 (-1)	0 (-1)	3,00 (1)	523,00	959,00	6,73	21,10
6	3,00 (1)	0 (-1)	3,00 (1)	2416,70	9284,70	37,47	27,59
7	1,50 (-1)	3,50 (1)	3,00 (1)	263,70	910,50	7,69	11,68
8	3,00 (1)	3,50 (1)	3,00 (1)	11542,70	19406,30	41,25	24,18
9	2,25 (0)	1,75 (0)	1,50 (0)	2539,30	4729,00	24,27	19,67
10	2,25 (0)	1,75 (0)	1,50 (0)	2646,70	4849,00	24,21	13,86
11	2,25 (0)	1,75 (0)	1,50 (0)	2624,70	5029,70	22,89	17,32

CP: concentração de proteína; CA: concentração de açúcar; CO: concentração de óleo; TR: tendência à retrogradação; VF: viscosidade final; ΔE: diferença de cor.

Na Tabela 6, são indicados os teores de água, FAF, proteína, amido, amilose e amilopectina presentes nas formulações estudadas no planejamento experimental, considerando a faixa de proteína de 1,50% a 3,00%. Observa-se que os teores dos componentes estão diretamente relacionados ao teor de proteína e, conseqüentemente, a quantidade de FAF utilizada, conforme esperado. Ou seja, quanto maior a concentração de proteína na formulação maior o teor de amido, amilose e amilopectina. Na condição do ponto central do planejamento (CP: 2,25%), o somatório entre a água e a FAF é diferente de 2000g (massa dos ensaios experimentais), pois há presença de açúcar (1,75%) e óleo (1,50%).

Tabela 6. Teores dos componentes das formulações utilizadas no planejamento experimental em função da concentração de proteínas (1,50%, 2,25% e 3,00%).

Componentes (g)	Formulação 1,50% proteína¹	Formulação 2,25% proteína²	Formulação 3,00% proteína³
Água	1816,96	1660,44	1633,92
FAF ⁴	183,04	274,56	366,08
Proteína	2,75	6,18	10,98
Amido	97,05	145,57	194,09
Amilose	37,57	56,35	75,13
Amilopectina ⁵	59,48	89,22	118,96

1. Formulação 1,50% proteína: variável concentração de proteínas (CP) de 1,50%; 2. Formulação 2,25% proteína: variável CP de 2,25% (ponto central); 3. Formulação 3,00% proteína: variável concentração de proteínas (CP) de 3,00%; 4. FAF: farinha amilácea do feijão carioca; 5. Amilopectina = amido – amilose.

O conhecimento da composição da FAF (Tabela 6) relativa à concentração de proteína adicionada na formulação é importante, pois os conteúdos de amido e amilose irão influenciar nas propriedades reológicas de matrizes amiláceas, como por exemplo, a viscosidade final e a tendência à retrogradação.

3.3.1 Influência das variáveis na tendência à retrogradação e na viscosidade final

A viscosidade final é o parâmetro que indica a resistência da pasta após a gelatinização e resfriamento do amido, sendo que uma viscosidade elevada é desejada quando os amidos desempenham a função de espessantes e estabilizantes em formulações alimentícias. Já a tendência à retrogradação (TR) indica a reorganização das cadeias de amilose e amilopectina, ocasionando a formação de sinérese e alterações reológicas e sensoriais que afetam a qualidade dos produtos. Por isso, quanto menor for a TR, melhor será o desempenho do amido em aplicações alimentícias (KUMAR et al., 2022).

De acordo com a Tabela 5, é possível observar que a TR variou de 263,70 cP (ensaio 7) a 13112,00 cP (ensaio 2) e a VF de 797,30 cP (ensaio 3) a 19406,3 cP (ensaio 8) nas condições estudadas. Nota-se que a TR e a VF apresentaram correlação direta com a concentração de proteínas, ou seja, à medida que CP aumenta na formulação, a TR e a VF aumentam também. Nos Apêndices C e D,

são apresentados os demais parâmetros das propriedades de pasta e a curva viscoamilográfica, respectivamente, da aplicação da FAF em um sistema alimentício.

Ao avaliar os efeitos principais e de interação obtidos com 95 % de confiança para a TR e a VF (Tabela 7 e Apêndice E), pode-se observar que os efeitos de interação são significativos ($p < 0,05$). Por isso, os efeitos principais foram interpretados de forma conjunta.

Tabela 7. Efeitos das variáveis para as respostas tendência à retrogradação e viscosidade final.

Fatores	Tendência à retrogradação			Viscosidade final		
	Efeito	Erro puro	p valor	Efeito	Erro puro	p valor
Média	4219,23	17,1057	0,0000	7399,02	45,6391	0,000038
X1	8860,00	40,1164	0,0000	14949,63	107,0331	0,000051
X2	1391,50	40,1164	0,0008	1872,93	107,0331	0,003250
X3	-2277,15	40,1164	0,0003	-1415,13	107,0331	0,005672
X ₁₂	1590,00	40,1164	0,0006	1910,88	107,0331	0,003123
X ₁₃	-2273,65	40,1164	0,0003	-1538,88	107,0331	0,004803
X ₂₃	3041,85	40,1164	0,0002	3163,63	107,0331	0,001143

X1: concentração de proteína; X2: concentração de açúcar; X3: concentração de óleo; X₁₂: interação entre concentração de proteína e açúcar; X₁₃: interação entre concentração de proteína e óleo; X₂₃: interação entre a concentração de açúcar e óleo.

Com os resultados da Tabela 7, foi observado que a adição de óleo (3,00%) no sistema contendo a maior concentração de proteínas (3,00%) pode elevar a tendência à retrogradação de forma mais pronunciada. A menor TR ocorre nas condições experimentais onde a CP e CO encontram-se no nível -1, ou seja, quando a concentração de proteína é de 1,50% e não há adição de óleo no sistema. Um comportamento semelhante ao relatado para a interação entre a proteína e o óleo, ocorre ao avaliar a interação da proteína com o açúcar. As maiores TR são obtidas em concentração de proteína de 3,00% e açúcar de 3,50%. Assim, uma menor TR resulta de um sistema contendo 1,50% de concentração de proteína e sem adição de açúcar. Uma possível explicação para esse comportamento é que a proteína na concentração de 1,50% consegue modular a interação entre o amido-água que estão presentes no sistema, ocasionando um retardo no processo de recristalização do amido. Como consequência, a retrogradação é inibida,

resultando num menor valor de TR (SCOTT; AWIKA, 2023). Já a interação entre o açúcar e o óleo apontam que elevando-se a concentração de óleo, a TR é diminuída, sendo este efeito mais pronunciado quando não há adição de CA no sistema. Esse comportamento pode ser explicado pela formação de complexos amido-lipídico, que resultam no impedimento da recristalização e retardam o processo de retrogradação do sistema, resultando em uma menor TR (LAN et al., 2024).

A diminuição da viscosidade final (Tabela 5) é apontada para condições em que o teor de óleo (3,00%) está no nível superior e a concentração de proteínas (1,50%) no inferior. E uma maior viscosidade final é obtida para a condição que a concentração de proteína é de 3,00% não havendo diferença pronunciada se o óleo está no nível -1 (0,00%) ou +1 (3,00%). Esse comportamento pode estar relacionado à reticulação entre os grupos carboxila da proteína e os grupos hidroxila do amido que são favorecidos durante o aquecimento da pasta, como ocorrido no equipamento RVA utilizado para determinar a VF do sistema (QIU et al., 2025).

Para a interação entre a proteína e o açúcar, a condição com menor CP (1,50%) e sem adição de açúcar, resultam na menor VF. Assim, para obter uma maior VF é apontado que a concentração de proteínas seja de 3,00% e o açúcar de 3,50%. Na literatura, foi relatado que a presença de açúcar poderia reduzir a VF, devido a competição deste componente com o amido pela água (PLOYPETCHARA; GOHTANI, 2018; REN et al., 2021). Apesar disso, a presença do açúcar em associação com a proteína em 3,00% resultou no aumento da VF, sugerindo que havia água suficiente no sistema para a interação com todos os constituintes. Além disso, a proteína pode ter favorecido a absorção de água do sistema e favorecido a formação de uma rede de gel tridimensional induzida pelo calor, que resultou no aumento da viscosidade (KUANG et al., 2025).

No que se refere a interação entre o açúcar e o óleo, os valores de viscosidade final foram elevados para CA e CO nos níveis -1 e +1, sendo o maior efeito apontado para as condições em que o açúcar e o óleo estão no nível +1, ou seja, quando o açúcar é de 3,50% e o óleo é de 3,00%.

Avaliando-se a ANOVA dos efeitos significativos em um nível de confiança de 95% e os resultados do teste F de Fischer, pode-se dizer que os modelos propostos são significativos, porém não são preditivos para as respostas TR e VF (Tabela 5). Esses modelos apresentaram R^2 de 0,8723 (TR) e 0,9132 (VF).

Tabela 8. Análise de variância para as variáveis de resposta tendência à retrogradação e viscosidade final.

Resposta	Fonte de variação	Soma quadrática	Nº de graus de liberdade	Média quadrática	F calculado	F tabelado
Tendência à retrogradação	Regressão	177708993	3	59236331	7,22	4,35
	Resíduos	57461490	7	8208784,286		
	Falta de ajuste	57455053	5	11491010,6	3569,75	19,3
	Erro puro	6437	2	3219		
	Total	235170483	10			
Viscosidade final	Regressão	466999621	2	233499810,5	26,82	4,46
	Resíduos	69655833	8	8706979,125		
	Falta de ajuste	69610009	6	11601668,17	506,36	19,33
	Erro puro	45824	2	22912		
	Total	536655454	10			

Nota: o modelo é considerado significativo quando o F calculado da regressão é maior do que o F tabelado. E é preditivo quando o F calculado da falta de ajuste é menor do que o F tabelado.

3.3.2 Influência das variáveis na dureza

Pelos resultados da Tabela 5, nota-se que a dureza variou de 5,84 N (ensaio 3) a 62,25 N (ensaio 4), em ambos os ensaios o teor de açúcar adicionado foi de 3,0% e o óleo foi de 0,00%.

Avaliando-se as interações dos efeitos para a dureza apresentados na Tabela 9 e no gráfico de Pareto (Apêndice E), considerando $p < 0,05$, nota-se que as condições em que a concentração de proteínas está em seu nível máximo (3,00%), são obtidos os maiores valores para a dureza. As menores durezas são relatadas em condições em que a CP é de 1,50%. A presença de óleo não afeta pronunciadamente a dureza do sistema.

No que se refere a dureza, a interação dos efeitos entre a CP e CO mostrou que as condições em que a CP está em seu nível superior (3,00%) resultaram nos maiores valores para a dureza em ausência de óleo. O aumento da dureza observado em função da concentração de proteínas, pode estar relacionado a sua incorporação

na fase contínua formada pelo amido (presente na FAF). Além disso, o aumento da dureza pode estar associado à retrogradação, devido a formação de sinérese do sistema, considerando que o ensaio 3 apresentou um valor baixo para a TR (328,00 cP) e o ensaio 4 resultou em 9949,00 cP para a TR (SCOTT; AWIKA, 2023).

De forma semelhante a interação entre a proteína e o óleo, a presença de açúcar no sistema não apresentou diferença pronunciada quando a concentração de proteína era de 1,50%. No entanto, quando CP foi de 3,00%, o conteúdo de açúcar de 3,50% contribuiu para o aumento da dureza. Esse comportamento pode ter ocorrido devido a retrogradação da amilose presente no sistema, que ocasionou alterações intermoleculares e formação de zonas de junção nas cadeias de amilose, resultando no aumento da dureza (TENG et al., 2011).

A interação entre o óleo e o açúcar, apontam que CA em seu nível máximo (3,50%), sem a adição de óleo no sistema resultam na maior dureza, possivelmente devido à redução de água disponível no sistema pela interação açúcar-amido (ZHANG et al., 2017).

Tabela 9. Efeito das variáveis para a resposta dureza.

Fatores	Efeito	Erro puro	p valor
Média	25,13	0,2353	0,0001
X1	37,98	0,5518	0,0002
X2	7,24	0,5518	0,0058
X3	-4,71	0,5518	0,0135
X ₁₂	7,00	0,5518	0,0062
X ₁₃	-5,83	0,5518	0,0088
X ₂₃	-4,8713	0,5518	0,0126

X1: concentração de proteína; X2: concentração de açúcar; X3: concentração de óleo; X₁₂: interação entre concentração de proteína e açúcar; X₁₃: interação entre concentração de proteína e óleo; X₂₃: interação entre a concentração de açúcar e óleo.

A análise de variância (ANOVA), considerando apenas os efeitos significativos ao nível de significância $\alpha = 0,05$, indicou que o modelo proposto é estatisticamente significativo, de acordo com os dados apresentados na Tabela 10. O modelo apresentou coeficiente de determinação R^2 de 0,9786.

Tabela 10. Análise de variância para a variável de resposta dureza.

Fonte de variação	Soma quadrática	Nº de graus de liberdade	Média quadrática	F calculado	F tabelado
Regressão	3248,10	6	541,35	30,44	6,16
Resíduos	71,13	4	17,78		
Falta de ajuste	69,91	2	34,96	57,40	24,00
Erro puro	1,22	2	0,61		
Total	3319,23	10			

Nota: o modelo é considerado significativo quando o F calculado da regressão é maior do que o F tabelado. E é preditivo quando o F calculado da falta de ajuste é menor do que o F tabelado.

Complementando os resultados apresentados na Tabela 5, as pastas formadas durante os ensaios experimentais foram registradas após a análise de dureza, para avaliação visual. Na Figura 4, pode-se observar que, com exceção dos ensaios 1, 2, 3 e 5, os demais ensaios exibem uma pasta quebradiça. A característica quebradiça é indesejada em análogos de carne, queijos vegetais e massas, pois é esperado que o amido possa agregar na estrutura desses produtos. Além disso, poderia afetar as sensações sensoriais, ocasionando a rejeição dos produtos.

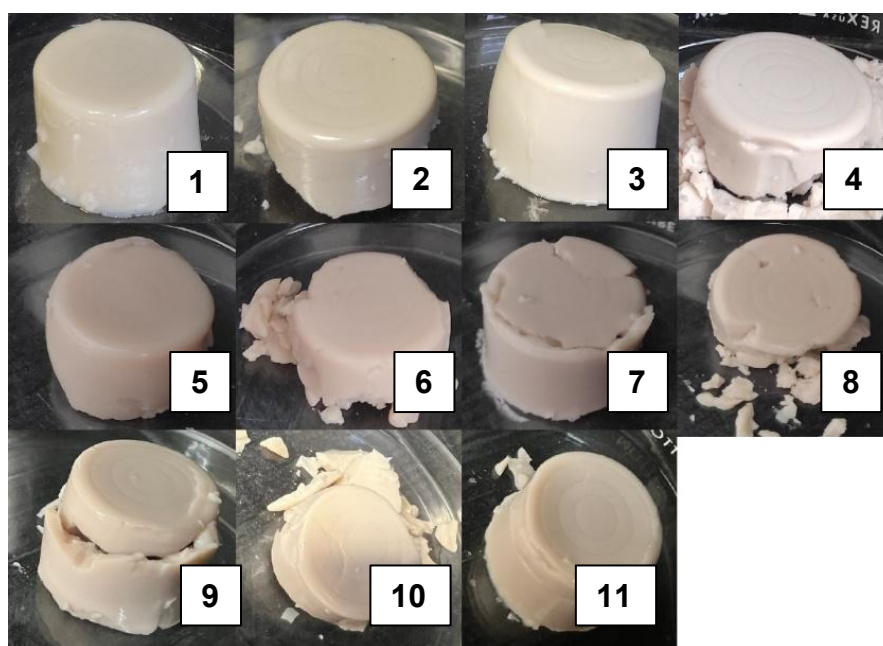


Figura 4. Pastas obtidas a partir da aplicação da farinha amilácia do feijão carioca nas condições estabelecidas no planejamento experimental, em ordem sequencial do ensaio 1 ao 11.

Dos ensaios que não apresentaram característica quebradiça, os ensaios 1, 2 e 5 não continham açúcar na formulação. E os ensaios 1, 2 e 3 não continham óleo na

formulação. Destes ensaios, a menor dureza foi relatada para o ensaio 3 (CP: 1,50% e AA: 3,50%) com 5,84N e TR de 328,00 cP. O valor de TR obtido para o ensaio 3 pode ser considerado baixo em relação aos demais ensaios do planejamento, sendo mais desejado em aplicações alimentícias.

3.3.3 Influência das variáveis na diferença de cor

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 5, a ΔE obtida a partir dos ensaios experimentais variou de 8,20 (ensaio 3) a 27,59 (ensaio 6). Além disso, à medida que a concentração de proteínas na formulação aumentou, a ΔE aumentou também. O resultado da ΔE obtido pode ser atribuído a reação de Maillard que ocorre em uma matriz alimentícia constituída por carboidratos e proteínas submetida ao aquecimento (LIANG et al., 2015).

Avaliando-se os efeitos apresentados na Tabela 11, observa-se que apenas a variável CP foi significativa, considerando $p < 0,05$ para a diferença de cor. O seu efeito foi positivo, indicando que à medida que a concentração de proteínas aumenta no sistema, a ΔE irá aumentar também, corroborando com os resultados experimentais obtidos.

Tabela 11. Efeito das variáveis para a resposta diferença de cor.

Fatores	Efeito	Erro puro	p valor
Média	19,06	0,8813	0,0021
X1	9,42	2,0668	0,0449
X2	-6,98	2,0668	0,0776*
X3	2,56	2,0668	0,3405*
X12	3,43	2,0668	0,2387*
X13	0,08	2,0668	0,9731*
X23	0,56	2,0668	0,8117*

X1: concentração de proteína; X2: concentração de açúcar; X3: concentração de óleo; X₁₂: interação entre concentração de proteína e açúcar; X₁₃: interação entre concentração de proteína e óleo; X₂₃: interação entre a concentração de açúcar e óleo.

A partir da análise de variância (ANOVA) e os resultados do teste F de Fischer apresentados na Tabela 9 ($p < 0,05$), pode-se dizer que o modelo proposto foi significativo e preditivo para a resposta diferença de cor. Portanto, a equação desse modelo pode ser considerada significativa e usada para fins preditivos. Esse

modelo apresentou um R^2 de 0,89 e uma porcentagem máxima de variação explicável de 0,95.

Tabela 12. Análise de variância para a variável de resposta dureza.

Fonte de variação	Soma quadrática	Nº de graus de liberdade	Média quadrática	F calculado	F tabelado
Regressão	311,54	4	77,89	12,79	4,53
Resíduos	36,53	6	6,09		
Falta de ajuste	19,44	4	4,86	0,57	19,25
Erro puro	17,09	2	8,54		
Total	348,07	10			

Nota: o modelo é considerado significativo quando o F calculado da regressão é maior do que o F tabelado. E é preditivo quando o F calculado da falta de ajuste é menor do que o F tabelado.

A Equação 7 representa o modelo para a diferença de cor total (ΔE).

$$\Delta E = 19,06 + 4,71X_1 - 3,49X_2 + 1,28X_3 + 1,72X_1X_2 + 0,04X_1X_3 + 0,28X_2X_3 \quad (7)$$

Com a superfície de resposta obtida, pode-se observar que a concentração de proteína influencia na diferença de cor durante o processamento da formulação. A menor diferença de cor encontra-se na região em verde na Figura 5, que corresponde a área com menor CP e maior CA. Apesar disso, os resultados experimentais indicam que os resultados de ΔE foram superiores a 5, sendo considerados perceptíveis ao olho humano (MOKRZYCKI; TATOL, 2012).

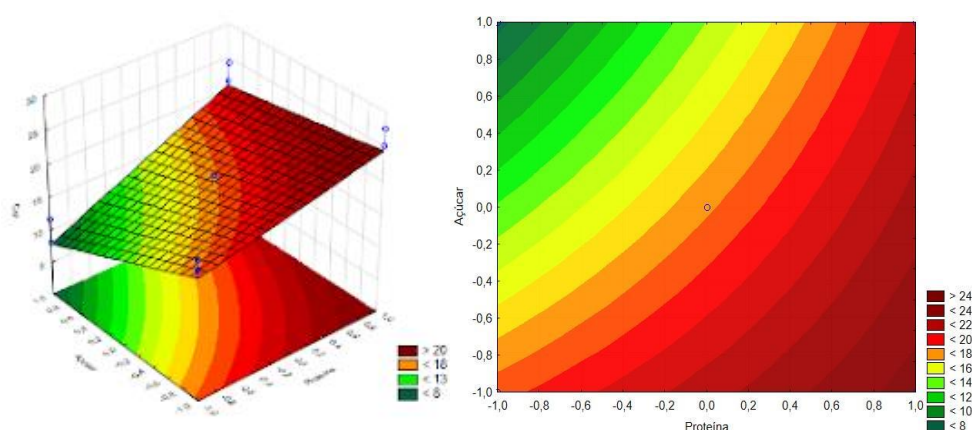


Figura 5. Superfície de resposta e curva de nível para a ΔE (diferença de cor).

3.3.4 Melhor condição do planejamento experimental

Considerando os resultados apresentados anteriormente na Tabela 5 e na Figura 4, a escolha das condições mais adequadas para aplicações podem ser restringidas de acordo com a tendência à retrogradação, visto que a sua ocorrência afeta a aplicação do amido (FAF) em produtos alimentícios (KARIM et al., 2000). Sendo assim, os menores resultados de TR foram obtidos de condições com a concentração de proteínas em 1,50%.

Apesar do ensaio 7 resulte na menor TR, sua pasta exibe uma característica quebradiça após a análise de textura (Figura 4), sendo inadequada para aplicação alimentícia. Dessa forma, o ensaio 3 surge como uma alternativa promissora, com a segunda menor TR, e as menores dureza (maior maciez) e ΔE , utilizando 3,00% de açúcar e sem adição de óleo.

De forma alternativa, caso a adição de óleo na formulação seja desejada ao contrário do açúcar, o ensaio 5 pode apresentar as condições mais adequadas. Para uma formulação mais básica, o ensaio 1 apresenta CP de 1,50%, sem não há adição de açúcar e óleo. Sendo assim, conclui-se que os ensaios 1, 3 e 5 apresentam as condições mais promissoras para uma formulação padrão para aplicações alimentícias.

Com base nas condições selecionadas, a FAF apresenta potencial como ingrediente em formulações de análogos de carne, análogos de queijo, agente espessante e gelatinizante em produtos de panificação e macarrão instantâneo (DOBSON et al., 2022; LYU et al., 2023; ALCÁZAR-ALAY; MEIRELES, 2015; BENTO et al., 2021).

4 CONCLUSÕES

A farinha amilácea do feijão carioca apresentou alto conteúdo de amilose (53,02%) e proteína (16,39%) remanescente do processo de classificação por ar aplicado. O conteúdo de amido danificado (11,46%) presente na FAF favoreceu as propriedades de absorção de água (3,56g/g) e solubilidade (20,86%). As propriedades de pasta e dureza apresentaram resultados semelhantes aos relatados na literatura, com destaque para a susceptibilidade à retrogradação característica de amidos de leguminosas com alto teor de amilose.

A aplicação da FAF em um sistema alimentício mostra que concentração de proteína na farinha teve influência positiva nas respostas estudadas, sendo que o aumento na sua concentração contribuiu para o aumento da tendência à retrogradação, viscosidade, dureza e diferença de cor. Das condições experimentais estudadas, os ensaios 1 (CP: 1,50%), 3 (CP: 1,50% e CA: 3,50%) e 5 (CP: 1,50%, CO: 3,00%) mostram-se mais promissores para aplicação em formulações alimentícias.

Considerando as características tecnofuncionais da farinha amilácea, sugere-se a continuação de pesquisas quanto a sua aplicação, visando ampliar o seu potencial de aplicação. Assim como, a aplicação de modificações, visando aprimorar suas características, por exemplo, a susceptibilidade à retrogradação e intumescimento restrito.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANCONA, D. B., et. al. Wet-fractionation of *Phaseolus lunatus* seeds: partial characterization of starch and protein. **Science of Food and Agriculture**, v. 84, p. 1193-1201, 2004.
- ANDERSON, R. A., et al. Gelatinization of corn grits by roll cooking, extrusion cooking and steaming. **Starch-Stärke**, v. 22, n. 4, p. 130-135, 1970.
- ASHOGBON, A. O., et al. Developments in the isolation, composition, and physicochemical properties of legume starches. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 61, n. 17, p. 2938-2959, 2021.
- ASSATORY, A., et al. Dry fractionation methods for plant protein, starch and fiber enrichment: A review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 86, p.340-351, 2019.
- BANGAR, S. P., et al. Enzymatic modification of starch: A green approach for starch applications. **Carbohydrate Polymers**, v. 287, p. 119265, 2022
- BEUCHAT, L. R. Influence of water activity on growth, metabolic activities and survival os yeasts and molds. **Journal Food Prot.**, v. 45, p.135 - 141, 1983.
- BENTO, J. A. C., et. al. Pre-gelatinized flours of black and carioca bean by-products: Development of gluten-free instant pasta and baked snacks. **International Journal of Gastronomy and Food Science**, v.25, p. 100383, 2021.
- BERGHOUT, J. A. M., et al. Sustainability assessment of oilseed fractionation processes: A case study on lupin seeds. **Journal of Food Engineering**, v. 150, p. 117-124, 2015.
- BERGSMA, Jacob. **Vegan cheese analogue**. U.S. Patent n. 11,109,606, 7 set. 2021.
- BOURRÉ, L., et al. Influence of particle size on flour and baking properties of yellow pea, navy bean, and red lentil flours. **Cereal Chemistry**, v. 96, n. 4, p. 655-667, 2019.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 12, de 28 de março de 2008. Estabelece o Regulamento Técnico do Feijão. Diário Oficial da União, Brasília, 28 mar. 2008. Acesso em: 17 jul. 2024.
- BYARS, J. A.; SINGH, M. Rheological and textural properties of pulse starch gels. **Starch-Stärke**, v. 68, n. 7-8, p. 778-784, 2016.
- BÜHLER, J. M., et al. Starch in plant-based meat replacers: a new approach to using endogenous starch from cereals and legumes. **Starch-Stärke**, v. 74, n. 1-2, p. 2100157, 2022.
- CEREDA, M. P. Application properties of starches extracted from underground starchy crops of South American origin. In: **Starchy Crops Morphology, Extraction, Properties and Applications**. Academic Press, p. 245 – 279, 2022.
- CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de grãos, Brasília, DF, v. 10 - Safra 2022/23, n. 6 – Sexto levantamento, p. 1 – 96, 2023.
- DEMIATE, I. M., et al. Physicochemical characterization of starches from dry beans cultivated in Brazil. **Food Hydrocolloids**, v. 61, p. 812–820, 2016.

DOBSON, Stacie; LAREDO, Thamara; MARANGONI, Alejandro G. Particle filled protein-starch composites as the basis for plant-based meat analogues. **Current Research in Food Science**, v. 5, p. 892-903, 2022.

DUMOULIN, L., et al. Dry and wet fractionation of plant proteins: How a hybrid process increases yield and impacts nutritional value of faba beans proteins. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 72, p. 102747, 2015.

GONG, Y., et al. Principles of solubility. **Solvent systems and their selection in pharmaceuticals and biopharmaceutics**, p. 1-27, 2007.

GURBUZ, B., et al. Optimization of citrus fiber-enriched vegan cream cheese alternative and its influence on chemical, physical, and sensory properties. **Food Science & Nutrition**, v. 12, n. 8, p. 5872-5881, 2024.

HEYDARI, M. M., et al. Investigating starch and protein structure alterations of the processed lentil by microwave-assisted infrared thermal treatment and their correlation with the modified properties. **Food Chemistry Advances**, v. 1, p. 100091, 2022.

HOOVER, R.; RATNAYAKE, W. S. Starch characteristics of black bean, chick pea, lentil, navy bean and pinto bean cultivars grown in Canada. **Food chemistry**, v. 78, n. 4, p. 489-498, 2002.

IBRAFE. Feijão pode recuperar áreas de plantio. Instituto Brasileiro de Feijões e Pulses – IBRAFE, 2023

Instituto Adolfo Lutz, I. A. L. Métodos físico-químicos para análise de alimentos. *IV Edição, 1ª Edição digital*, 2008.

ISO. **Determinaton de la teneur en amylose**. ISO 6647. International Organization for Standarization, Suiza, 1987.

JOHANSSON, M., et al. Effect of starch and fibre on faba bean protein gel characteristics. **Food Hydrocolloids**, v. 131, p. 107741, 2022.

KARIM, A., et al. Methods for the study of starch retrogradation. **Food chemistry**, v. 71, n. 1, p. 9-36, 2000.

KASPOCHAK, E., et al. Pasting and Texture Properties of Commercial Plant Proteins and Its Mixtures. 2024.

KAUL, S., et al. Properties of potato starch as influenced by microwave, ultrasonication, alcoholic-alkali and pre-gelatinization treatments. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 226, p. 1341-1351, 2023

KESKIN, S. O., et al. Physico-chemical and functional properties of legume protein, starch, and dietary fiber—A review. **Legume Science**, v. 4, 2021.

KUANG, J., et al. Controlling pea starch gelatinization behavior and rheological properties by modulating granule structure change with pea protein isolate. **Food Chemistry: X**, p. 102218, 2025.

KUMAR, Y., et al. Effect of microwave treatment (low power and varying time) on potato starch: Microstructure, thermo-functional, pasting and rheological properties. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 155, p. 27 – 35, 2020

LAN, G., et al. Effect of soybean polysaccharide and soybean oil on gelatinization and retrogradation properties of corn starch. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 264, p. 130772, 2024

LATIMER, G. **Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists**. 19th ed., Gaithersburg, Maryland: AOAC, 2012. Chapter 45, Met. 2002.02, v. 2, p. 128-130.

LEFÈVRE, C., et al. Modeling the gelatinization-melting transition of the starch-water system in pulses (lentil, bean and chickpea). **Carbohydrate Polymers**, v. 264, p. 117983, 2021.

LI, H., et al. Physicochemical properties and structure of modified potato starch granules and their complex with tea polyphenols. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 166, p. 521-528, 2021a.

LI, L. et al. Characteristics of pea, lentil and faba bean starches isolated from air-classified flours in comparison with commercial starches. **Food Chemistry**, v. 276, p. 599–607, 2019.

LIANG, J., et al. Efeito de aditivos nas propriedades físico-químicas em matrizes de amido amorfo. **Química de Alimentos**, v. 171, p. 298-305, 2015.

LIU, C., et al. Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of ball mill damaged starches from different botanical sources. **International journal of biological macromolecules**, v. 156, p. 403-410, 2020.

LIU, W., et al. Relationship among gelatinization, retrogradation behavior, and impedance characteristics of potato starch. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 227, p. 354-364, 2023

LOS, F. G. B. Estudo do amido, proteína e compostos fenólicos do feijão Carioca. 2019.

LOS, F. G. B. et al. Evaluation of Physicochemical Properties of Starch from Brazilian Carioca Beans (*Phaseolus vulgaris*). **Starch**, v. 74, p. 2000281, 2021.

LUO, Shunjing et al. Impact of starch–lipid complexes on oil absorption of starch and its mechanism. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 103, n. 1, p. 83-91, 2023.

LYU, Z., et al. Melting properties of vegan cheese: Effect of emulsion and protein addition on the thermal behaviour of starch gels. **Food Hydrocolloids**, v. 144, p. 108917, 2023.

MEIRELES, M. A. A.; ALCÁZAR-ALAY, S. C. Physicochemical properties, modifications and applications of starches from different botanical sources. **Food Science and technology**, p. 35, 2015.

MINOLTA CORPORATION. **Precise color communication: color control from feeling to instrumentation**. Minolta, 1994.

MIRANDA, J. A. T., et al. Scanning electron microscopy and crystallinity of starches granules from cowpea, black and carioca beans in raw and cooked forms. **Food Science and Technology**, v. 39, p. 718-724, 2019.

MOREIRA, P. Utilização de dry heat treatment em amido de ervilha: investigação das propriedades térmicas, estruturais, morfológicas, de pasta e digestibilidade in vitro. Dissertação - Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ponta Grossa, p. 60, 2022.

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

NETO, B. D. B., et al. Como Fazer Experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria. Campinas. 2002.

NEVES, C. F. C., et al. Técnica para seleção de variáveis aplicada à separação de gases. **Química Nova**, v. 25, p. 327-329, 2002.

NILSSON, K., et al. **Physiochemical and thermal characterisation of faba bean starch**. Journal of Food Measurement and Characterization, v. 16, p. 4470-4485, 2022.

OBADI, M. O. M.; XU, B. A review of the effects of physical processing techniques on the characteristics of legume starches and their application in low-glycemic index foods. **International Journal of Biological Macromolecules**, p. 135124, 2024.

OYEYINKA, S. A., et al. Structural, functional, and pasting properties of starch from refrigerated cassava root. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 44, n. 6, p. e14476, 2020.

PIRES, C. V., et al. Composição físico-química de diferentes cultivares de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Alimentos e Nutrição, Araraquara**, v. 16, n. 2, p. 157-162, 2005.

PLOYPETCHARA, T.; GOHTANI, S. Effect of sugar on starch edible film properties: plasticized effect. **Journal of Food Science and Technology**, v. 55, p. 3757-3766, 2018.

PUNIA, S., et al. Kidney bean (*Phaseolus vulgaris*) starch: A review. **Legume Science**, v. 2, 2020.

QIU, C., et al. Rheological properties and microstructure characterization of normal and waxy corn starch dry heated with soy protein isolate. **Food Hydrocolloids**, v. 48, p. 1-7, 2015.

REN, Y., et al. A current review of structure, functional properties, and industrial applications of pulse starches for value-added utilization. **Food Science and Food Safety**, v. 20, n. 3, p. 3061-3092, 2021.

SANDHU, K. S.; SINGH, N. Some properties of corn starches II: Physicochemical, gelatinization, retrogradation, pasting and gel textural properties. **Food chemistry**, v. 101, n. 4, p. 1499-1507, 2007.

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

SHAHZAD, S. A., et al. Effect of hydrocolloid gums on the pasting, thermal, rheological and textural properties of chickpea starch. **Foods**, v. 8, n. 12, p. 687, 2019.

SIKORA, M., et al. Rheological properties of some starch-water-sugar systems. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 34, n. 4, p. 371-383, 1999.

SIMONS, C., et al. Characterization of pinto bean high-starch fraction after air classification and extrusion. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 41, n. 6, p. e13254, 2017.

TENG, L. Y., et al. Rheological and textural studies of fresh and freeze-thawed native sago starch–sugar gels. I. Optimisation using response surface methodology. **Food Hydrocolloids**, v. 25, n. 6, p. 1530-1537, 2011.

- ULLAH, I., et al. Influence of okara dietary fiber with varying particle sizes on gelling properties, water state and microstructure of tofu gel. **Food Hydrocolloids**, v. 89, p. 512-522, 2019.
- VANIER, N. L., et al. Physicochemical and technological properties of common bean cultivars (*Phaseolus vulgaris* L.) grown in Brazil and their starch characteristics. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, n. 3, p. 1-10, 2019.
- WANG, Q., et al. A review of milling damaged starch: Generation, measurement, functionality and its effect on starch-based food systems. **Food Chemistry**, v.315, p.126267, 2020.
- WANG, S., et al. Starch Retrogradation: A Comprehensive Review. **Food Science and Food Safety**, v. 14, n. 5, p. 568 – 585, 2015.
- WANG, S., 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, 2020a.
- WANI, I. A., et al. Isolation, composition, and physicochemical properties of starch from legumes: A review. **Starch**, v.68, p. 1-12, 2016.
- WOJEICCHOWSKI, J. P., et al. Physicochemical, structural and thermal properties of oxidized, acetylated and dual-modified common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) starch. **Food Science and Technology**, v. 38, p. 318-327, 2018.
- WU, W., et al. Effects of extrusion technology combined with enzymatic hydrolysis on the structural and physicochemical properties of porous corn starch. **Food and Bioprocess Technology**, v. 13, p. 442-451, 2020.
- YAN, H.; LU, Q. Physicochemical properties of starch-wheat germ oil complex and its effects on water distribution and hardness of noodles. **LWT**, v. 135, p. 110211, 2021.
- YAZID, N. S. M., et al. Application of starch and starch-based products in food industry. **Journal of Science and Technology**, v. 10, n. 2, 2018.
- ZHANG, B., et al. Starch-based food matrices containing protein: Recent understanding of morphology, structure, and properties. **Trends in Food Science & Technology**, v. 114, p. 212-231, 2021.
- ZHANG, L., et al. The physicochemical and structural properties and in vitro digestibility of pea starch isolated from flour ground by milling and air classification. **Food Chemistry**, v. 419, p. 136086, 2023.
- ZHANG, X., et al. Effects of low molecular sugars on the retrogradation of tapioca starch gels during storage. **PLoS One**, v. 12, n. 12, p. e0190180, 2017.
- ZHENG, J., et al. The effects of E-beam irradiation and microwave combination treatment on the morphology, structure and physicochemical properties of red adzuki bean starch. **Food Hydrocolloids**, v. 152, p. 109913, 2024.

CAPÍTULO 3 – APLICAÇÃO DE MICRO-ONDAS PARA MODIFICAÇÃO DA FARINHA AMILÁCEA DO FEIJÃO CARIOCA

Andriéli Aparício Coelho, Flávio Martins Montenegro, Elaine Kaspchak, Sarah da Costa, Kaciane Andreola, Elizabeth Harumi Nabeshima, Mitie Sonia Sadahira, Maria Teresa Bertoldo Pacheco.

O artigo foi submetido à revista: à definir

RESUMO

A valorização do feijão carioca poderia contribuir para aumentar o seu consumo. Uma alternativa para isso, é a utilização do seu amido, visto que na indústria de alimentos o amido é amplamente utilizado. Tecnologias podem ser empregadas para modificar as propriedades tecnofuncionais do amido quanto a elevada temperatura de gelatinização, susceptibilidade à retrogradação, entre outros. As modificações *clean label* são desejáveis, visto que não deixam resíduos no produto ou meio ambiente. Destas modificações, o micro-ondas tem se destacado devido por favorecer a absorção de água, poder de inchamento e viscosidade de pasta dos amidos. Diante disso, o objetivo desse trabalho foi avaliar os efeitos da modificação por micro-ondas com irradiação pulsada nas propriedades tecnofuncionais da farinha amilácia do feijão carioca. A aplicação de micro-ondas com radiação pulsada nas condições de potência (120W – 680W) e pulso (1 – 5 com intervalo de 1 minuto) estudadas demonstrou ser insuficiente para provocar alterações significativas na tendência à retrogradação, viscosidade final, índice de absorção de água e índice de solubilidade em água da farinha amilácea de feijão carioca. Apesar disso, forneceram informações importantes para a continuidade do estudo.

Palavras-chave: amido; modificação física; leguminosas; pulsos; propriedades funcionais; amido.

1. INTRODUÇÃO

O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma leguminosa com importância nutricional e energética na alimentação humana (MIRANDA et al., 2019). O Brasil está entre os 3 principais produtores de feijão no mundo, sendo o feijão carioca a variedade mais cultivada (FAOSTAT, 2025). Uma estratégia para a valorização do feijão carioca é a utilização do seu amido, visto que representa de 45% a 60% do grão, que tem alta relevância no cenário nacional. Para aplicação desse amido, modificações podem ser empregadas para alterar sua funcionalidade, visto que uma elevada temperatura de gelatinização, estreita faixa de viscosidade e retrogradação em baixa temperatura, podem restringir sua utilização (MAJEED et al., 2018; SCHMIELE et al., 2019).

As tecnologias de modificação *clean label* são desejáveis, pois não deixam resíduos nos produtos ou no meio ambiente (ZAILANI et al., 2022). Sendo que, os métodos físicos se destacam por seu baixo custo, rapidez e adequação ambiental (MANIGLIA et al., 2020). Dentre os métodos térmicos de modificações físicas, o micro-ondas tem sido empregada para alterar as propriedades funcionais de amidos, favorecendo a sua capacidade de absorção de água, poder de inchamento e viscosidade de pasta (LI et al., 2019).

A modificação por micro-ondas em condições de potências, tempo de exposição e umidade variáveis, tem sido aplicada em amidos de variadas fontes, como o milho, feijão mungo, feijão vermelho, batata, entre outros (ZHONG et al., 2019; HUONG et al., 2021; ZHENG et al., 2024; KUMAR et al. 2020). Os resultados desses autores, aponta para diminuição significativa da cristalinidade curto tempo de exposição, redução da viscosidade e tendência à retrogradação. Além disso, após a modificação por micro-ondas, o índice de retenção de água e a solubilidade dos amidos pode ser aumentada.

Diante do exposto, esse trabalho propõe-se a avaliar os efeitos da modificação por micro-ondas com radiação pulsada nas propriedades tecnofuncionais da farinha amilácia do feijão carioca. A utilização de pulsos justifica-se devido à possibilidade de distribuição desigual de energia no micro-ondas. Os pulsos contribuiriam para

uma interação mais homogênea das partículas com a radiação, promovendo uma distribuição de energia mais uniforme (Wang et al., 2015).

Palavras-chave: amido; modificação física; leguminosas; pulsos; propriedades funcionais; propriedades tecnológicas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O fluxograma ilustrado pela Figura 1 mostra as etapas realizadas neste trabalho. A farinha amilácea do feijão carioca (FAF) foi tratada com micro-ondas, com exposição à radiação pulsada. Em seguida, as propriedades reológicas e tecnofuncionais da farinha amilácea de feijão carioca tratado por micro-ondas (FMO) foram determinadas. Foram selecionadas 2 condições experimentais para avaliar se após a modificação ocorreram alterações morfológicas, estruturais e nas propriedades térmicas da farinha amilácea.

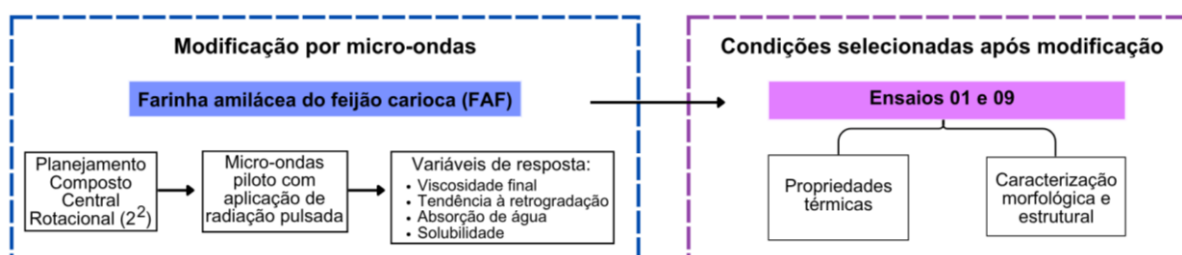


Figura 1. Fluxograma das etapas de trabalho deste estudo.

2.1 MATERIAL

O feijão carioca utilizado foi adquirido na região metropolitana de Campinas-SP, em 2022. Os grãos foram moídos em moinho de impacto CSM 165 e fracionados em classificador por ar centrífugo CFS 5 ambos da marca Netzsch do Brasil (Pomerode/SC). A farinha amilácea (fração grossa rica em amido) apresentou rendimento de 71,65%, contendo 16,39% de proteína remanescente da classificação por ar e tamanhos característicos de 1,80 µm (D10), 16,30 µm (D50) e 29,40 µm (D90). A amostra foi armazenada em temperatura ambiente (25 ± 2 °C).

2.2 MÉTODOS

2.2.1 Condicionamento e determinação de umidade da farinha amilácea do feijão carioca.

A FAF foi condicionada a 15% de umidade seguindo a metodologia AACC 26-95.01, conforme definido para o planejamento experimental. Após o condicionamento, o teor de umidade foi determinado pelo método AACC 44-15.02.

2.2.2 Aplicação de micro-ondas para modificação da farinha amilácea do feijão carioca

Para modificar as propriedades reológicas e tecnofuncionais da farinha amilácea de feijão carioca, tais como viscosidade final, tendência à retrogradação, índice de absorção de água e solubilidade, realizou-se o tratamento com micro-ondas no modo intermitente (radiação pulsada), utilizando planejamento composto central rotacional (PCCR). Essa abordagem foi selecionada para otimizar o número de ensaios, mantendo a qualidade das informações, visando ampliar o uso da FAF.

O PCCR (2²), incluiu três repetições do ponto central, totalizando 11 ensaios experimentais. As variáveis independentes foram: Potência (X1, 120 W – 680 W) e Pulso (X2, 1 – 5 com intervalo 1 minuto entre os pulsos), conforme Tabela 1. As variáveis respostas, foram: tendência à retrogradação, viscosidade final, índice de absorção e solubilidade em água.

Tabela 1. Variáveis independentes e níveis do Planejamento Composto Central Rotacional 2² aplicado para modificação da farinha amilácea do feijão carioca (FAF).

Variáveis independentes	Variáveis codificadas	Níveis				
		-1,41	-1	0	1	+1,41
Potência (PT, W)	X1	120	200	400	600	680
Pulso (PL)	X2	1	2	3	4	5

Os ensaios foram conduzidos em equipamento micro-ondas, composto por uma cavidade fixa multimodo de micro-ondas, com comprimento de onda na frequência

de 5,8GHz e potência máxima de 700W, acoplado a banho termostático (BERTELI *et al.*, 2014).

Os resultados experimentais foram analisados estatisticamente com o software Statistica® 8.0, considerando um p-valor < 0,05 e o erro puro.

2.2.2.1 Propriedades de pasta

O comportamento do amido durante o processo de cozimento, seguido de resfriamento foi determinado pelo perfil de viscosidade utilizando o *Rapid Visco Analyser* (RVA 4500, Perten Instruments, Hägersten – Suécia) de acordo com o método 76-21.01 da AACC (1997). Na análise, 3,00g de amostra foram pesadas e misturadas a 25 mL de água destilada. As condições de análise seguiram padrão estipulado no programa *Standard 2*. Os parâmetros viscosidade final (FV) e tendência à retrogradação (TR) foram calculados através do pelo *software* TCW 3.15.1.255.

2.2.2.2 Índice de absorção de água e solubilidade

O índice de absorção de água (IAA) foi determinado a partir da relação entre o peso do amido sedimentado úmido e o peso da amostra seca após centrifugação, com base no método descrito por ANDERSON *et al.* (1969). Para isso, foram pesados 1,00g de amostra em tubo Falcon de 50 mL e adicionados 25 mL de água a 30°C. Os tubos foram agitados em agitador rotativo (Tecnal, Piracicaba, Brasil) por 30 minutos e centrifugados (Centrifuga ROTINA 380R, Hettich, Vestfália, Alemanha) a 5000 rpm por 15 minutos. Os resultados foram calculados pela Equação 1 e expressos em g/g.

$$IAA \text{ (g/g)} = \frac{\text{Peso da amostra hidratada}}{\text{Peso da amostra seca}} \quad (\text{Eq. 1})$$

A solubilidade é dada como a relação entre o peso seco dos componentes solúveis lixiviados e o peso da amostra seca (WANG *et al.*, 2020). O índice de solubilidade em água (ISA) da FAF, foi determinado transferindo-se 10 mL do sobrenadante da análise de IAA para cadinhos e secos em estufa (Estufa MA-035, Marconi,

Piracicaba, Brasil) a 105°C por 5 horas (ANDERSON et al., 1969). A Equação 2 foi aplicada para obtenção dos resultados (expressos em %).

$$\text{ISA (\%)} = \frac{(\text{Peso do sobrenadante seco}) \times 100}{(\text{Peso da amostra em base seca}) \times 2,5} \quad (\text{Eq. 2})$$

2.2.3 Caracterização de condições selecionadas da farinha amilácia do feijão carioca tratada por micro-ondas.

2.2.3.1 Caracterização morfológica

Para compreensão das características físicas e estruturais das condições selecionadas da FMO foram realizadas as análises de microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura.

As imagens com luz polarizada foram capturadas em aumento de 200 vezes, em equipamento OLYMPUS BX41 (Olympus Corporation, Tóquio, Japão) equipado com uma câmera digital Q-Color 3 (Olympus America INC), e software SQ Capture 2.90.1 (Ver. 2.0.6, Canadá).

O microscópio (Tescan Veja LMU), com voltagem de aceleração de 20kV e distância de trabalho de 15 mm foi utilizado para a microscopia eletrônica de varredura (MEV). A amostra foi fixada ao condutor e pulverizada com fina camada de ouro em metalizador (Balzers, SCD 050) na condição de 40 mA por 40 segundos. A magnitude analisada foi de 2000 vezes.

2.2.3.2 Padrão de cristalinidade

A cristalinidade relativa de condições selecionadas da FMO foi analisada por difração de raios-X (Philips Analytical X Ray, X'Pert-MPD). As amostras maceradas em almofariz, transferidas para um porta-amostra, prensadas manualmente utilizando um bloco de prensa e o excesso foi retirado com lâmina de vidro e pincel. A análise foi conduzida seguindo os parâmetros: o tamanho do passo foi de 0,15 °2θ, a fenda de divergência utilizada foi fixa, com abertura de divergente de 1,00 °, a fenda de recepção foi de 1,00 mm, corrente do tubo de 40 mA, voltagem do tubo

de 40 kV. A varredura foi aplicada de forma contínua, com tempo de passo de 4,5s, e o material ânodo utilizado foi o cobre (Cu) (HOOVER; RATNAYAKE, 2002).

2.2.3.3 Propriedades térmicas

A estabilidade térmica dos cristais de amido das condições selecionadas da FMO foram avaliadas por calorimetria diferencial de varredura (DSC - MDSC2920, TA Instruments, EUA), medindo a temperatura de gelatinização e variação de entalpia (ΔH). A amostra foi homogeneizada manualmente, pesados 3,00g de amostra em um cadinho de alumínio (40 μ L), seguida da adição de 12 mg de água destilada. Os cadinhos foram selados hermeticamente para análise. A amostra foi aquecida de 25° a 100 °C com taxa de aquecimento de 10 °C/min e fluxo de nitrogênio de 150 mL/min (NILSSON et al., 2022).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do planejamento composto central rotacional para a modificação da FAF por meio do tratamento com micro-ondas em irradiação pulsada, permitiu a seleção das condições da FMO para caracterização morfológica e determinação das propriedades térmicas e do padrão de cristalinidade da farinha amilácea.

3.1 APLICAÇÃO DE MICROONDAS PARA MODIFICAÇÃO DA FARINHA AMILÁCIA DO FEIJÃO CARIOCA

Os resultados de viscosidade final, tendência à retrogradação, índice de absorção de água e solubilidade em água são apresentados na Tabela 2, assim como a matriz utilizada neste planejamento.

Tabela 2. Matriz experimental com variáveis reais e codificadas e resultados experimentais da tendência à retrogradação (TR), viscosidade final (VF), índice de absorção de água (IAA) e índice de solubilidade em água (ISA).

Ensaio	Variáveis independentes		Variáveis de respostas			
	Potência (X1, W)	Pulso (X2)	TR (cP)	VF (cP)	IAA (g/g)	ISA (%)
1	200 (-1)	2 (-1)	1264,00	2418,50	3,70	21,03
2	600 (1)	2 (-1)	1121,50	2212,00	3,82	20,29
3	200 (-1)	4 (1)	1117,00	2177,00	3,24	20,73
4	600 (1)	4 (1)	1093,00	2232,00	3,22	20,68
5	400 (0)	3 (0)	1215,50	2441,50	3,34	21,68
6	400 (0)	3 (0)	1062,50	2149,00	3,18	20,75
7	400 (0)	3 (0)	1149,00	2339,50	3,20	21,29
8	120 (-1,41)	3(1)	1284,00	2498,50	3,32	21,49
9	680 (1,41)	3 (0)	1035,00	2112,50	3,14	20,34
10	400 (0)	1 (-1,41)	1254,50	2240,00	3,24	21,11
11	400 (0)	5 (1,41)	1177,50	2375,50	3,31	21,14

3.1.1 Influência das variáveis na tendência à retrogradação e viscosidade final

Na Tabela 2, pode-se observar que a influência das variáveis na tendência à retrogradação e na viscosidade final. Nota-se que a TR ficou na faixa de 1035,00 cP (ensaio 9) a 1284,00 (ensaio 8) cP e a VF variou entre 2112,50 cP (ensaio 9) e 2498,50 cP (ensaio 8). Estes ensaios correspondem a menor (120 W) e maior (680 W) potência do planejamento, as quais foram estabelecidas para os pontos axiais e os pulsos (3) estavam fixos no ponto central em ambos os ensaios. De maneira geral, foi observado que potências mais baixas, como nos ensaios 1 e 8, parecem ter maior impacto nas respostas de TR e VF.

Avaliando-se os resultados dos efeitos apresentados na Tabela 3, observa-se as variáveis potência e pulso, assim como a interação destas não apresentou resultado significativo, considerando $p < 0,05$, para a viscosidade final e a tendência à retrogradação. O gráfico de Pareto da viscosidade final e da tendência à retrogradação encontra-se no Apêndice G. Apesar disso, tem sido relatado na

literatura que a aplicação de micro-ondas tem contribuído para a redução dos parâmetros de propriedades de pasta, como a viscosidade final (VF) e a tendência à retrogradação (TR). A modificação por micro-ondas pode resultar em valores mais baixos de VF e TR, devido ao atrito e vibração das moléculas de água e os grânulos durante o tratamento (YI et al., 2024; ZHENG et al., 2024; MENDOZA et al., 2022). A ausência de efeitos significativos pode ser devido à falta de ajuste dos resultados experimentais ao modelo proposto, ou ainda devido as condições de processo empregadas neste estudo, principalmente, a umidade de 15%.

Tabela 3. Efeito das variáveis para as respostas de viscosidade final e tendência à retrogradação.

Fatores	Tendência à retrogradação				Viscosidade final	
	Efeito	Erro puro	p valor	Efeito	Erro puro	p valor
Média	1142,49	44,29	0,0015	2310,19	85,72	0,0014
X1	-2,58	64,83	0,9729	-28,22	125,46	0,8429
X2	54,26	64,83	0,4907	-25,95	125,46	0,8553
X ₁₁	-129,78	54,33	0,1395	-174,46	105,14	0,2389
X ₂₂	-71,23	54,33	0,3201	-7,63	105,14	0,9487
X ₁₂	59,25	76,72	0,5207	130,75	148,46	0,4714

X1: Potência; X2: Pulso; X₁₁: Interação entre potência e potência; X₂₂: Interação pulso e pulso; X₁₂: Interação entre potência e pulso.

Os valores dos parâmetros das propriedades de pasta são apresentados no Apêndice F e o seu perfil viscoamilográfico pode ser observado na Figura 2. Diferentemente do que foi relatado em outros estudos (YI et al., 2024; ZHENG et al., 2024; MENDOZA et al., 2022), pode-se observar que as amostras tratadas por micro-ondas apresentaram propriedades de pasta superiores a amostra controle (sem tratamento). Uma hipótese para este comportamento é que, as condições aplicadas no tratamento micro-ondas foram insuficiente para provocar a degradação da estrutura granular. Resultando dessa forma, no aumento das propriedades de pasta.

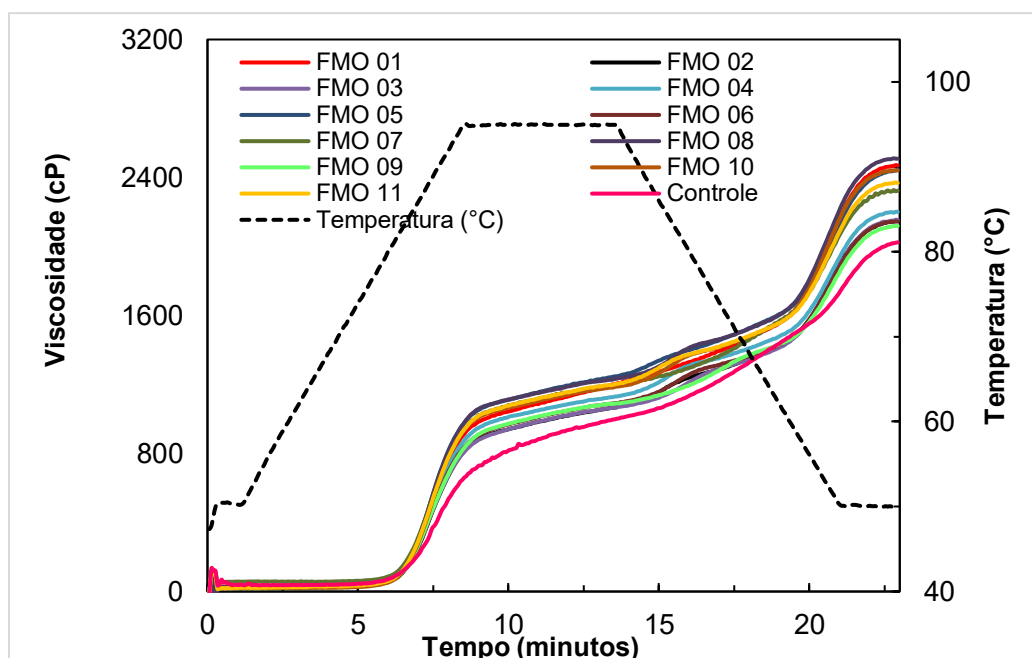


Figura 2. Propriedades de pasta dos ensaios experimentais com aplicação de micro-ondas na farinha amilácea do feijão carioca.

3.1.2 Influência das variáveis nos índices de absorção e de solubilidade em água

O índice de absorção de água (IAA) variou de 3,14 g/g (ensaio 9) a 3,82 g/g (ensaio 2), com potência superior ou igual a 600W e variação de 2 a 3 pulso (Tabela 2). Em tratamento mais intenso (acima de 600 W), o aumento do IAA pode ocorrer devido a alterações estruturais nas moléculas de amilopectina, que contribuem para a formação de cadeias mais longas (MENDOZA et al., 2022). Além disso, o tratamento com micro-ondas pode ter favorecido a ruptura da estrutura molecular dos grânulos de amido e entrada de água nas regiões internas (KUMAR et al., 2020). Enquanto, o índice de solubilidade em água (ISA) da farinha amilácea do feijão carioca modificada por micro-ondas ficou na faixa de 20,29% (ensaios 2) e 21,68% (ensaio 5), como pulso variando de 2 a 3 e a potência de 400W e 600W.

Ao avaliar os efeitos principais e de interação obtidos com 95 % de confiança para o IAA e ISA (Tabela 4 e Apêndice G), pode-se observar que não houve efeitos significativos ($p < 0,05$).

Tabela 4. Efeito das variáveis para as respostas dos índices de absorção de água (IAA) e solubilidade em água (ISA).

IAA				ISA		
Fatores	Efeito	Erro puro	p valor	Efeito	Erro puro	p valor
Média	3,24	0,05	0,0003	21,24	0,27	0,0002
X1	0,11	0,08	0,2711	-0,50	0,39	0,3347
X2	0,15	0,08	0,1798	-0,29	0,39	0,5438
X ₁₁	-0,04	0,06	0,6149	-0,60	0,33	0,209
X ₂₂	-0,24	0,06	0,0670	0,03	0,33	0,9293
X ₁₂	-0,07	0,09	0,5189	0,35	0,47	0,537

X1: Potência; X2: Pulso; X₁₁: Interação entre potência e potência; X₂₂: Interação pulso e pulso; X₁₂: Interação entre potência e pulso.

Na Figura 3, são apresentados os valores experimentais e da amostra controle para o índice de absorção de água e solubilidade. Após a modificação por micro-ondas, os ensaios 1 e 2 apresentaram valores superiores de IAA em relação ao controle. Já o ISA permaneceu praticamente inalterado quando comparado a amostra sem tratamento.

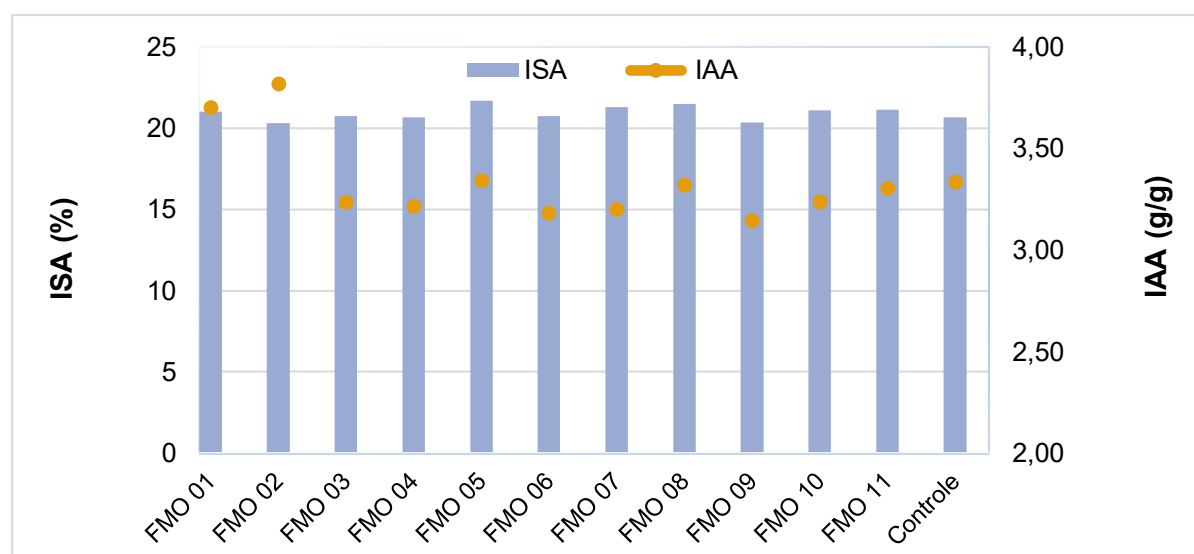


Figura 3. Índice de absorção de água (IAA) e Índice de solubilidade em água (ISA) dos ensaios experimentais com aplicação de micro-ondas na farinha amilácea do feijão carioca.

No Apêndice H, podem ser verificados os resultados de dureza, variação de cor e atividade de água analisados após a aplicação de micro-ondas.

Os resultados obtidos após a modificação por micro-ondas se mostraram insuficientes para provocar alterações significativas nas respostas estudadas. Apesar disso, foram realizadas análises complementares para verificar a ocorrência de possíveis alterações morfológicas, estruturais e nas propriedades térmicas da farinha amilácea. Essas análises foram realizadas em duas condições, uma em baixa potência (FMO 01 – ensaio 1 200W) e outra em alta potência (FMO 09 – ensaio 9 680W).

3.1.3 Caracterização morfológica da farinha amilácea do feijão carioca tratada por micro-ondas (condições selecionadas)

Na Figura 4 (A, B e C), os grânulos de amido da amostra controle e FMO apresentam formato oval e superfície lisa, similar ao relatado por LOS (2019) para o amido de feijão carioca. Além disso, podem ser observados os corpos proteicos (destacados em amarelo) aderidos aos grânulos de amido tanto na FAF, quanto na FMO 01 e 09. Resultados semelhantes foram observados para o amido de lentilha (HEYDARI et al., 2022). A etapa de moagem aplicada na classificação da FAF pode ter ocasionado danos à superfície dos grânulos de amido (REN et al., 2021). Estes danos são indicados em vermelho na Figura 4 para a amostra controle e para a FMO 01 e 09.

A preservação da cruz de malta, observada nas imagens a, b e c da Figura 4 (setas amarelas), indica a manutenção da organização das moléculas na região cristalina, mesmo após o tratamento com micro-ondas. De acordo com Heydari et al. (2022), a morfologia granular pode ser alterada pela lixiviação da amilose, perda de cristalinidade da amilopectina e a reassociação de cadeias moleculares dentro dos grânulos, mas tais alterações não foram observadas neste estudo, sugerindo que as condições experimentais não foram suficientes para induzi-las. Um comportamento semelhante foi relatado por ZHONG et al. (2019), para o amido de milho modificado por micro-ondas, onde a ausência de alteração foi associada à estabilidade da cristalinidade dos grânulos, visto que os amidos modificados apresentaram o mesmo padrão de raio-x que o amido nativo.

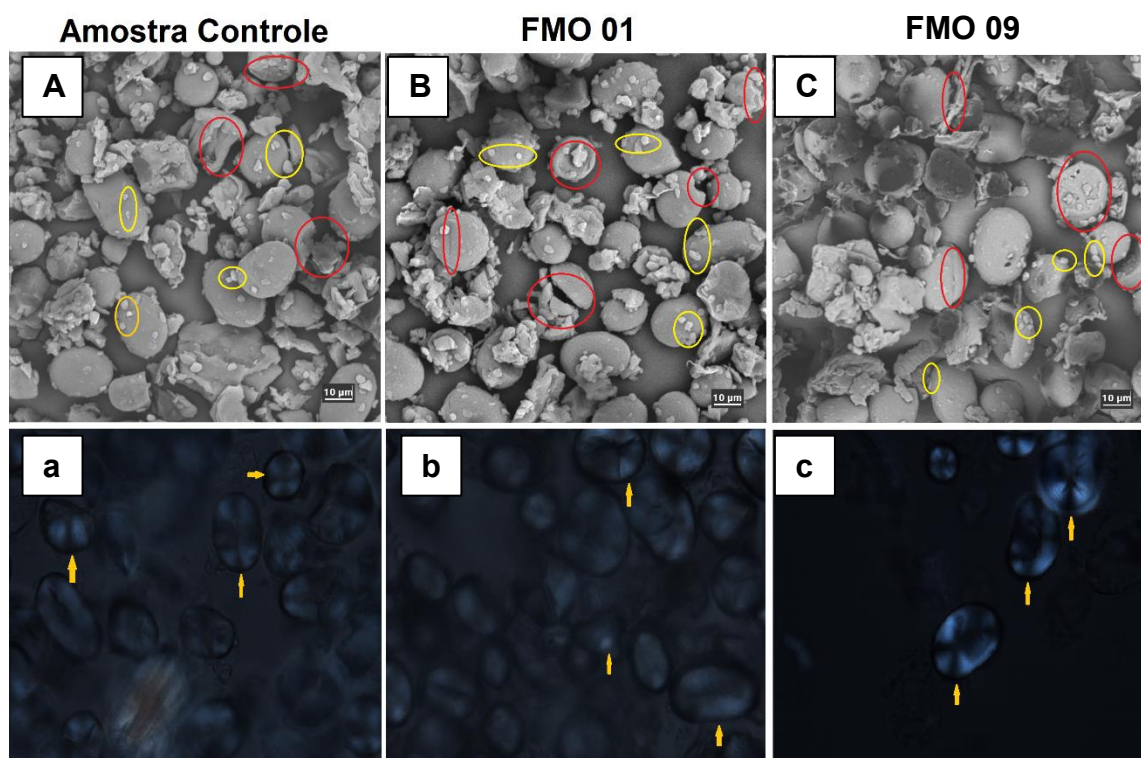


Figura 4. Micrografias eletrônicas de varredura em aumento de 2000 vezes (A, B e C) e microscopia óptica com luz polarizada em aumento de 200 vezes (a, b e c).

3.1.4 Padrão de cristalinidade da farinha amilácia do feijão carioca tratada por micro-ondas (condições selecionadas)

Os grânulos de amido de feijão tendem a apresentar padrão de difração de raios X tipo C (mistura dos tipos A e B). Nesse estudo, a FAF foi usada como controle e apresentou estrutura cristalina do tipo C, com picos de difração em $15,0^\circ$, $17,0^\circ$ e $23,0^\circ$ (Figura 5). O mesmo padrão foi observado para a FMO 01 e 09 indicando que a cristalinidade não foi alterada após o tratamento com micro-ondas.

A ausência de alterações no padrão de cristalinidade também foi observada para os amidos de milho, batata e feijão vermelho azuki (WANG et al., 2019; TIAN et al., 2023; ZHENG et al., 2024). Neste estudo, as condições operacionais aplicadas foram muito brandas para causarem alteração na cristalinidade e por isso as estruturas lamelares e cristalinas resistiram ao tratamento por micro-ondas. Além das condições operacionais, a cristalinidade pode ser afetada pelas propriedades dielétricas, tipo de amido, empacotamento das duplas hélices da amilopectina e teor de umidade (LIU et al., 2020; TAO et al., 2020). Há indicativos de que

tratamentos térmicos controlados adequadamente e em umidades inferiores a 30% não alteram a estrutura granular do amido (TAO et al., 2020). No entanto, quando o amido de feijão mungo foi desramificado e tratado por micro-ondas a 350 W por 3 minutos com umidade de 20%, a sua cristalinidade foi alterada (HOUNG et al., 2021). Indicando que métodos combinados poderiam resultar em alterações na FMO.

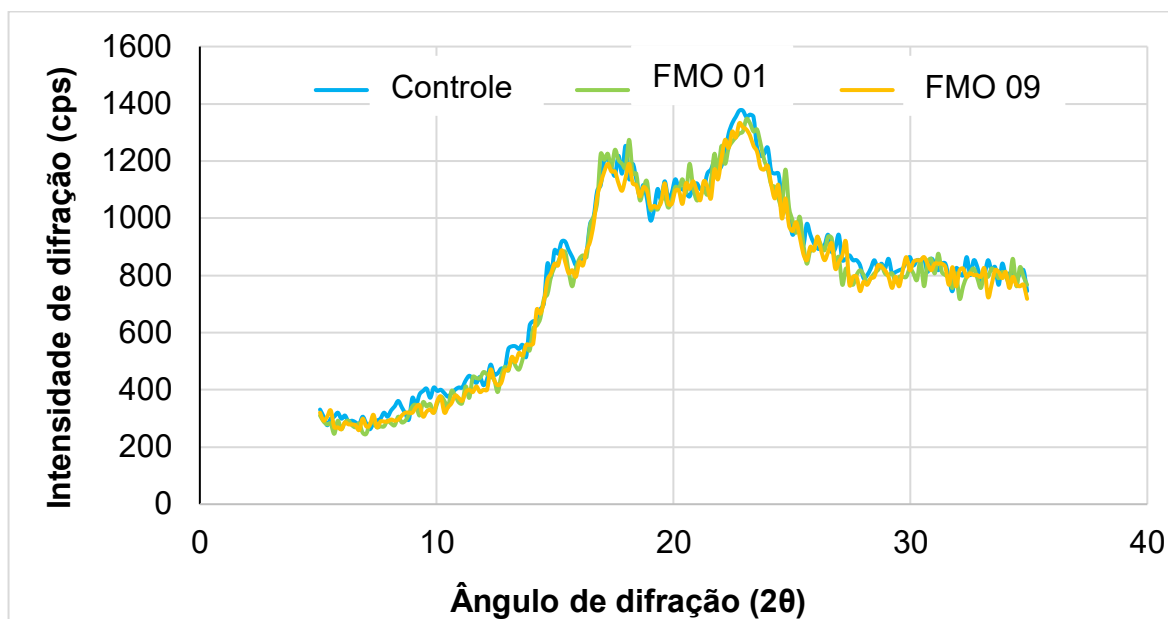


Figura 4. Padrão de difração de raio-x da farinha amilácea após a modificação por micro-ondas (FMO) em potência de 200 W (FMO 01) e 680 W (FMO 09) e amostra controle (FAF).

3.1.5 Propriedades térmica da farinha amilácea do feijão carioca tratada por micro-ondas (condições selecionadas)

As propriedades térmicas durante a gelatinização da farinha amilácea do feijão carioca controle e tratada por micro-ondas (FMO 01 e FMO 09) são apresentados na Tabela 5.

Os picos endotérmicos indicam a quantidade de energia necessária para romper as hélices duplas nas regiões cristalina e amorfa (REN et al., 2021), conseqüentemente quanto maiores forem as temperaturas no início e no pico da gelatinização, mais estável e ordenada está a estrutura (MOREIRA, 2022). A faixa da temperatura de gelatinização da farinha controle foi de 71,18 °C a 85,89 °C,

enquanto para a FMO 01 foi 67,31 °C a 83,65 °C. A amostra FMO 09 permaneceu praticamente inalterada quando comparada ao controle. Segundo Li et al. (2022), altas temperaturas de gelatinização tendem a ser observadas para amidos com maior estrutura cristalina. Após o tratamento com micro-ondas a temperatura de gelatinização foi reduzida para a amostra FMO 01, apontando que houve destruição da estrutura cristalina do amido durante o tratamento.

Tabela 5. Parâmetros de gelatinização da farinha amilácea após a modificação por micro-ondas em condições selecionadas (ensaios 01 e 09) e amostra controle.

Ensaios	T _o (°C)	T _p (°C)	T _c (°C)	ΔH (J.g ⁻¹)
Controle	71,18	78,47	85,89	3,60
FMO 01	67,31	75,65	83,65	0,73
FMO 09	70,32	77,98	85,8	4,09

T_o: temperatura inicial da gelatinização, T_p: temperatura de pico, T_c: temperatura de conclusão; ΔH: entalpia da gelatinização.

A variação de entalpia (ΔH) representa a quantidade de energia que o amido precisará absorver durante a gelatinização, indicado pela ordem molecular das duplas hélices (LI et al., 2022). O ΔH da farinha amilácea do feijão carioca diminuiu de 3,60 J.g⁻¹ (controle) para 0,73 J.g⁻¹ (FMO 01) após aplicação do tratamento com micro-ondas. Esse comportamento, sugere que houve diminuição do conteúdo da estrutura de dupla hélice, possivelmente devido a sua degradação e redução de estruturas ordenadas de curto alcance (GU et al., 2024).

Embora a cruz de malta tenha sido preservada e o padrão de cristalinidade das amostras não tenham sofrido alteração, conforme discutido nos itens 3.1.3 e 3.1.4, a amostra FMO 01 precisou de menos energia para gelatinizar, sugerindo que a estrutura cristalina sofreu algum dano, assim como foi relatado por Li et al. (2022) e Li et al. (2019).

4. CONCLUSÃO

A aplicação de micro-ondas com radiação pulsada foi insuficiente para provocar alterações significativas na tendência à retrogradação, viscosidade final, índice de absorção de água e índice de solubilidade em água da farinha amilácea de feijão carioca dentro do domínio experimental estudado. Apesar disso, este estudo fornece informações importantes para a continuidade desse estudo, quanto a aplicação de pulsos, potência e umidade. Dessa forma, os resultados deste estudo apontam para a necessidade de explorar faixas de trabalho mais amplas para umidade e exposição à radiação (pulsos). Assim como, a aplicação de métodos combinados para obter alterações significativas nas propriedades reológicas e tecnofuncionais da farinha amilácea do feijão carioca.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, R. A., et al. Gelatinization of corn grits by roll cooking, extrusion cooking and steaming. **Starch-Stärke**, v. 22, n. 4, p. 130-135, 1970.

BANGAR, S. P., et al. Enzymatic modification of starch: A green approach for starch applications. **Carbohydrate Polymers**, v. 287, p. 119265, 2022.

BERTELI, M. N., et al. Levantamento das distribuições de temperatura em leite de arroz com casca durante o tratamento térmico por micro-ondas. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 17, p. 319-328, 2014.

CEREDA, M. P. Application properties of starches extracted from underground starchy crops of South American origin. In: **Starchy Crops Morphology, Extraction, Properties and Applications**. Academic Press, p. 245 – 279, 2022.

CHEN, X., et al. Microwave irradiation alters the rheological properties and molecular structure of hull-less barley starch. **Food Hydrocolloids**, v. 120, p. 106821, 2021.

CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de grãos, Brasília, DF, v. 10 - Safra 2022/23, n. 6 – Sexto levantamento, p. 1 – 96, 2023 (IBRAFE, 2023).

GU, Y., et al. Enhancing the nonlinear rheological property and digestibility of mung bean flour gels using controlled microwave treatments: Effect of starch debranching and protein denaturation. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 270, p. 132049, 2024.

HEYDARI, M. M., et al. Investigating starch and protein structure alterations of the processed lentil by microwave-assisted infrared thermal treatment and their correlation with the modified properties. **Food Chemistry Advances**, v. 1, p. 100091, 2022.

HOOVER, R.; RATNAYAKE, W. S. Starch characteristics of black bean, chick pea, lentil, navy bean and pinto bean cultivars grown in Canada. **Food chemistry**, v. 78, n. 4, p. 489-498, 2002.

HUONG, N. T. M., et al. Effects of microwave treatments and retrogradation on molecular crystalline structure and in vitro digestibility of debranched mung-bean starches. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 190, p. 904 – 910, 2021.

IBRAFE. Feijão pode recuperar áreas de plantio. Instituto Brasileiro de Feijões e Pulses – IBRAFE, 2023

JIANG, Z., et al. Faba bean flavour and technological property improvement by thermal pre-treatments. **LWT-Food Science and Technology**, v. 68, p. 295-305, 2016.

KUMAR, Y., et al. Effect of microwave treatment (low power and varying time) on potato starch: Microstructure, thermo-functional, pasting and rheological properties. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 155, p. 27 – 35, 2020

LI, M., et al. Characterization of pre-gelatinized kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.) produced using microwave hot-air flow rolling drying technique. *LWT*, 154, 112673. 2021.

LI, L. et al. Characteristics of pea, lentil and faba bean starches isolated from air-classified flours in comparison with commercial starches. **Food Chemistry**, v. 276, p. 599–607, 2019.

LIU, C., et al. Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of ball mill damaged starches from different botanical sources. **International journal of biological macromolecules**, v. 156, p. 403-410, 2020.

LOS, F. G. B. Estudo do amido, proteína e compostos fenólicos do feijão Carioca. Tese - Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ponta Gossa, p. 139, 2019.

MAJEED, T., et al. Effect of sonication and γ -irradiation on the properties of pea (*Pisum sativum*) and vetch (*Vicia villosa*) starches: A comparative study. **International journal of biological macromolecules**, v. 114, p. 1144 - 1150, 2018.

MANIGLIA, B. C., et al. Starch modification through environmentally friendly alternatives: a review. **Food Science and Nutrition**, p. 1549-7852, 2020

MENDOZA M. E. G., et al. Effect of Microwave Irradiation on Acid Hydrolysis of Faba Bean Starch: Physicochemical Changes of the Starch Granules. **Molecules**, v. 27, p. 3528, 2022.

MIRANDA, Joyce Aparecida Tavares de et al. Scanning electron microscopy and crystallinity of starches granules from cowpea, black and carioca beans in raw and cooked forms. **Food Science and Technology**, v. 39, p. 718-724, 2019.

MOREIRA, P. Utilização de *dry heat treatment* em amido de ervilha: investigação das propriedades térmicas, estruturais, morfológicas, de pasta e digestibilidade in vitro. Dissertação - Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ponta Grossa, p. 60, 2022.

NILSSON, K., et al. **Physiochemical and thermal characterisation of faba bean starch**. *Journal of Food Measurement and Characterization*, v. 16, p. 4470-4485, 2022

PUNIA, S. et al. Kidney bean (*Phaseolus vulgaris*) starch: A review. **Legume Science**, v. 2, 2020.

REN, Y., et al. A current review of structure, functional properties, and industrial applications of pulse starches for value-added utilization. **Food Science and Food Safety**, v. 20, n. 3, p. 3061-3092, 2021.

SCHMIELE, M., et al. Physical Modifications of Starch. In: Starches for Food Application Chemical, Technological and Health Properties. Academic Press, p. 223 – 259, 2019.

TAO, Yuan et al. Structural changes of starch subjected to microwave heating: A review from the perspective of dielectric properties. **Trends in Food Science & Technology**, v. 99, p. 593-607, 2020.

TIAN, Y., et al. High-pressure pasting performance and multilevel structures of short-term microwave-treated high-amylose maize starch. **Carbohydrate Polymers**, v. 322, p. 121366, 2023.

VILLANUEVA, Marina et al. Microwave radiation and protein addition modulate hydration, pasting and gel rheological characteristics of rice and potato starches. **Carbohydrate polymers**, v. 201, p. 374-381, 2018.

WANG, S., et al. Starch Retrogradation: A Comprehensive Review. **Food Science and Food Safety**, v. 14, n. 5, p. 568 – 585, 2015.

WANG, M., et al. Effect of microwave irradiation-retrogradation treatment on the digestive and physicochemical properties of starches with different crystallinity. **Food Chemistry**, v. 298, p. 125015, 2019.

WANG, Q., et al. A review of milling damaged starch: Generation, measurement, functionality and its effect on starch-based food systems. **Food Chemistry**, v.315, p.126267, 2020.

YI, M., et al. Effect of microwave alone and microwave-assisted modification on the physicochemical properties of starch and its application in food. **Food Chemistry**, p. 138841, 2024.

ZAILANI, M. A., et al. Functional and digestibility properties of sago (Metroxylon sagu) starch modified by microwave heat treatment. **Food Hydrocolloids**, v. 122, p. 107042, 2022.

ZHENG, J., et al. The effects of E-beam irradiation and microwave combination treatment on the morphology, structure and physicochemical properties of red adzuki bean starch. **Food Hydrocolloids**, v. 152, p. 109913, 2024.

ZHONG, Y., et al. Short-time microwave treatment affects the multi-scale structure and digestive properties of high-amylose maize starch. **International journal of biological macromolecules**, v. 137, p. 870-877, 2019.

CONSIDERAÇÕES GERAIS

A farinha amilácia do feijão carioca em sua forma nativa apresentou resultados interessantes para o índice de absorção de água e solubilidade. Notavelmente, suas propriedades de pasta precisam ser ajustadas para atender as demandas de aplicação, visto que a tendência a retrogradação é elevada.

A aplicação da farinha amilácia do feijão carioca em um sistema alimentício mostrou-se promissora para o desenvolvimento de produtos alimentícios, como análogos cárneos e lácteos. Os resultados obtidos apontam que a concentração de proteínas na farinha amilácea foi a variável que mais afetou a tendência à retrogradação, viscosidade, dureza e diferença de cor.

A modificação por micro-ondas foi investigada como uma forma de aprimorar as propriedades tecnofuncionais da farinha amilácea do feijão carioca. As condições selecionadas neste estudo se mostraram insuficientes para provocar mudanças significativas na farinha amilácea. Apesar disso, fornecem informações importantes para a continuidade do seu estudo.

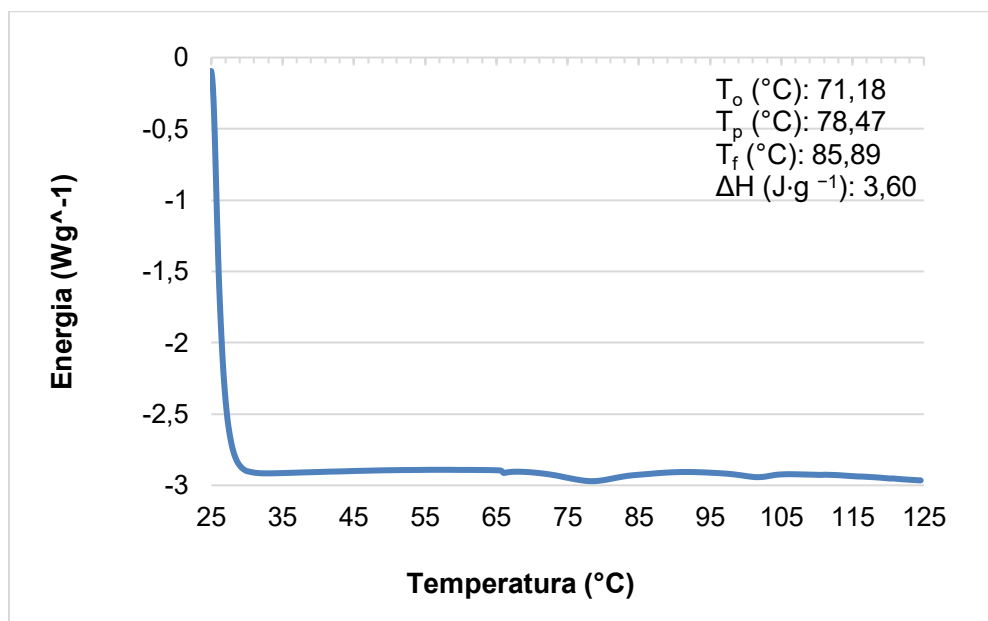
SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos neste estudo, sugere-se:

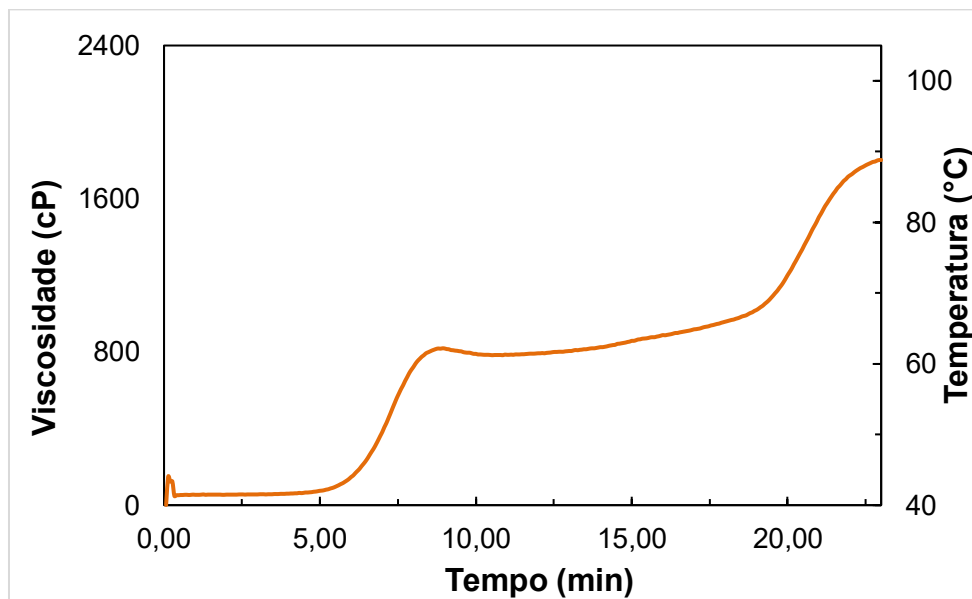
- Realizar mais estudos quanto a aplicação da farinha amilácea do feijão carioca em formulações alimentícias.
- Investigar de outros métodos de modificação isolados ou combinados para alterar a funcionalidade da farinha amilácea do feijão carioca.
- No que se refere a modificação por micro-ondas para modificação da farinha amilácea do feijão carioca, investigar novas faixas de trabalho para o intervalo de exposição a radiação (pulso) e umidade.

APÊNDICES – CAPÍTULO 2

Apêndice A - Calorimetria diferencial de varredura, com as respectivas temperaturas de gelatinização (T_o : temperatura inicial, T_p : temperatura de pico, T_f : temperatura de conclusão, ΔH : entalpia da gelatinização) da farinha amilácea do feijão carioca (FAF).



Apêndice B - Propriedades de pasta da farinha amilácea do feijão carioca (FAF).

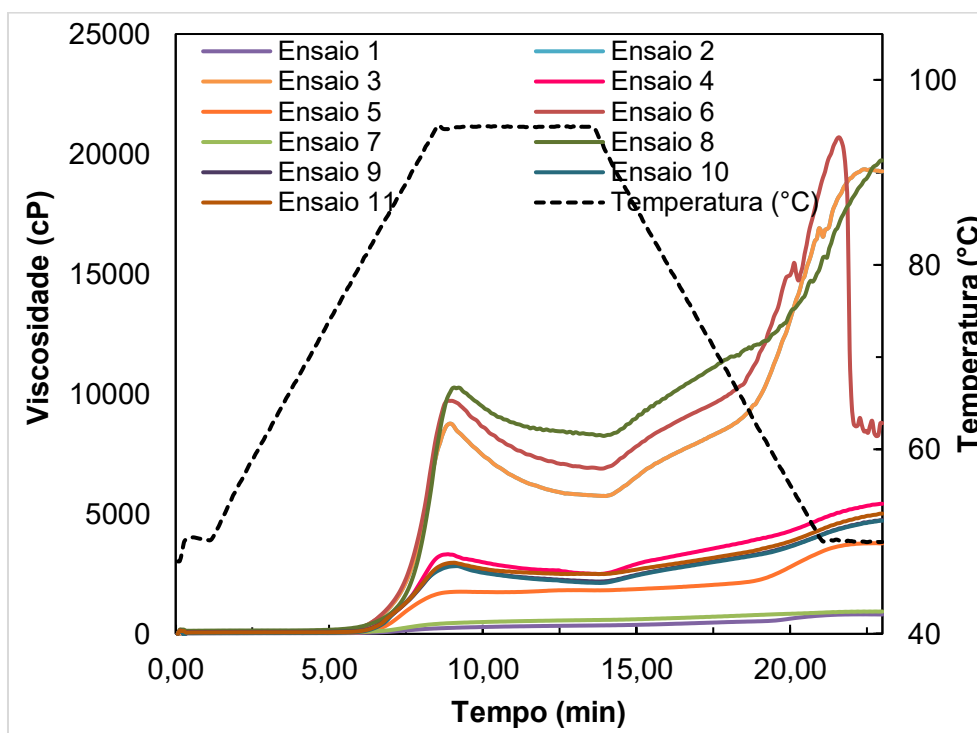


Apêndice C - Propriedades de pasta dos ensaios experimentais com aplicação da farinha amilácia do feijão carioca (FAF).

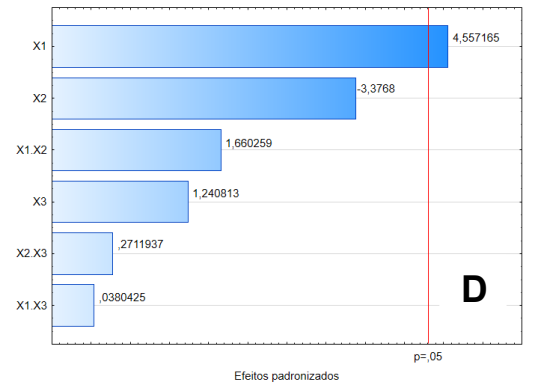
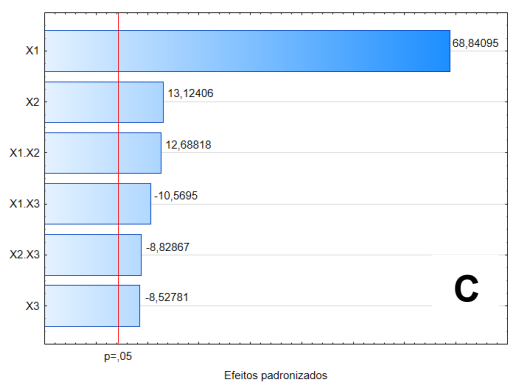
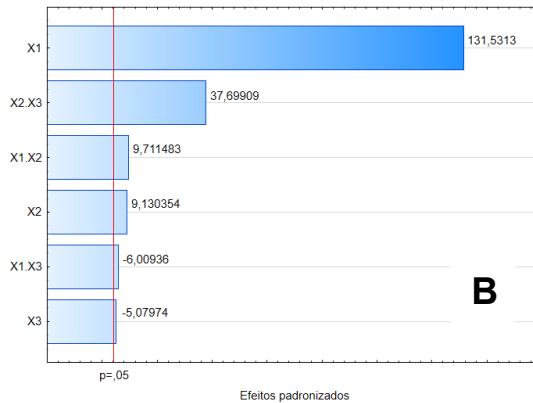
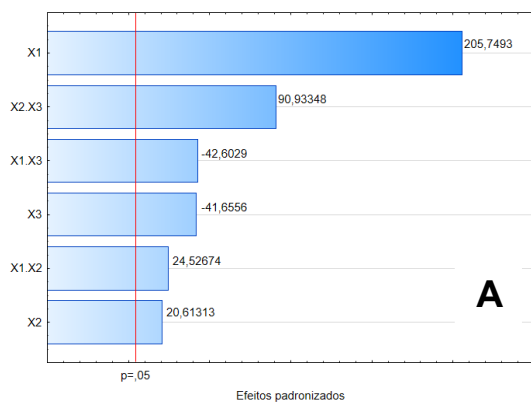
Ensaio	PV (cP)	VM (cP)	QV (cP)	VF (cP)	TR (cP)	TP (min.)	TE (°C)
1	357,67	359,00	-1,33	824,70	465,70	12,96	80,00
2	8528,00	5464,50	3063,50	18576,50	13112,00	8,90	78,50
3	468,67	469,33	-0,67	797,30	328,00	12,98	80,00
4	7089,00	4880,67	2208,33	12488,30	7607,70	8,78	78,85
5	435,50	436,00	-0,50	959,00	523,00	12,97	80,00
6	9810,33	6868,00	2942,33	9284,70	2416,70	8,96	78,82
7	514,00	515,33	-1,33	862,00	346,70	12,96	80,00
8	10269,33	7863,67	2405,67	19406,30	11542,70	9,07	79,23
9	2875,33	2189,67	685,67	4729,00	2539,30	9,05	80,70
10	2944,33	2202,33	742,00	4849,00	2646,70	9,04	80,58
11	2982,00	2405,00	577,00	5029,70	2624,70	9,05	76,60

PV: pico de viscosidade; VM: viscosidade mínima; QV: quebra de viscosidade; VF: viscosidade final; TR: tendência à retrogradação; TP: tempo de pico; TE: temperatura de empastamento.

Apêndice D – Perfil das propriedades de pasta dos ensaios experimentais com aplicação da farinha amilácia do feijão carioca.



Apêndice E – Gráfico de Pareto para o efeito das variáveis na tendência a retrogradação (A), viscosidade final (B), dureza (C) e diferença de cor (D).

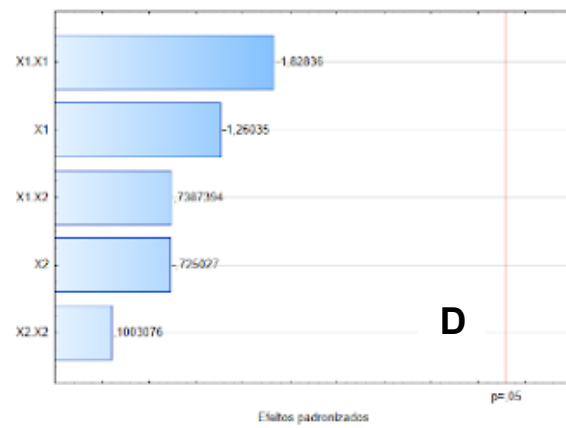
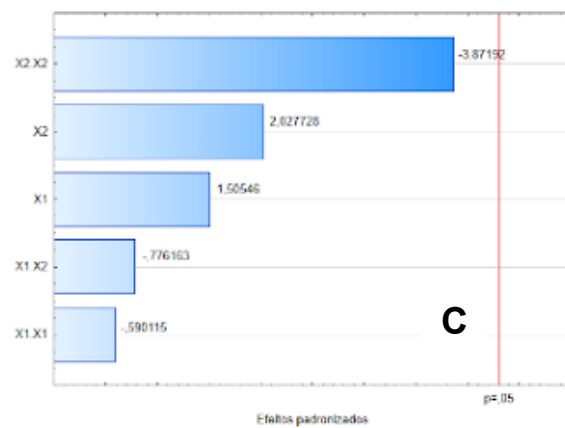
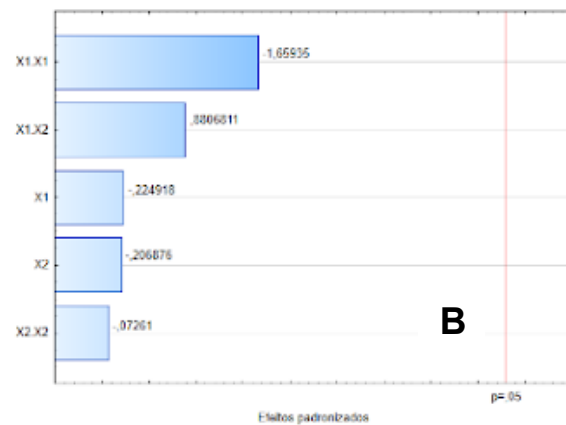
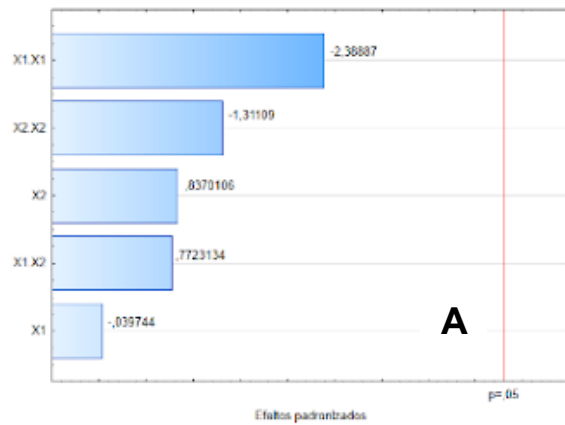


APÊNDICES – CAPÍTULO 3

Apêndice F - Propriedades de pasta dos ensaios experimentais após modificação por micro-ondas.

Ensaio	PV (cP)	VM (cP)	QV (cP)	VF (cP)	TR (cP)	TP (min.)	TE (°C)
1	1152,00	1154,50	-2,50	2418,50	1264,00	13,00	84,00
2	1088,00	1090,50	-2,50	2212,00	1121,50	13,00	84,35
3	1058,50	1060,00	-1,50	2177,00	1117,00	13,00	84,20
4	1138,00	1139,00	-1,00	2232,00	1093,00	13,00	83,50
5	1224,50	1226,00	-1,50	2441,50	1215,50	13,00	83,55
6	1085,50	1086,50	-1,00	2149,00	1062,50	13,00	83,92
7	1191,00	1190,50	-0,50	2339,50	1149,00	13,00	83,50
8	1213,00	1214,50	-1,50	2498,50	1284,00	13,00	83,75
9	1075,50	1077,50	-2,00	2112,50	1035,00	13,00	84,12
10	1183,00	1185,50	-2,50	2240,00	1254,50	13,00	83,97
11	1196,00	1198,00	-2,00	2375,50	1177,50	13,00	83,50

Apêndice G – Gráfico de Pareto para o efeito das variáveis na tendência a retrogradação (A), viscosidade final (B), índice de absorção de água (C) e índice de solubilidade em água (D).



Apêndice H – Resultados de dureza, variação de cor (ΔE) e atividade de água (aW) complementares aos apresentados após a modificação por micro-ondas.

Ensaio	Dureza (N)	ΔE	aW
1	1,93	4,52	0,57
2	1,75	4,71	0,34
3	1,72	4,66	0,47
4	1,69	4,65	0,14
5	2,35	5,03	0,28
6	1,93	4,97	0,28
7	2,19	5,15	0,26
8	1,98	5,14	0,57
9	1,84	4,75	0,16
10	1,95	4,81	0,57
11	2,17	4,89	0,18