

UFRRJ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS

DISSERTAÇÃO

**IMPACTO DA MOAGEM E DA AEROCLASSIFICAÇÃO NAS
PROPRIEDADES TECNOFUNCIONAIS DE MILHETO PÉROLA INTEGRAL,
BRUNIDO E GERMINADO**

Alexander Ferreira Brito

2025



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

IMPACTO DA MOAGEM E DA
AEROCLASSIFICAÇÃO NAS PROPRIEDADES
TECNOFUNCIONAIS DE MILHETO PÉROLA
INTEGRAL, BRUNIDO E GERMINADO

Alexander Ferreira Brito

Sob a orientação do(a) Professor(a)
Prof. Dr. José Luis Ramírez Ascheri

Co-orientação do(a) Professor(a)
Prof. Dr. Carlos Wanderlei Piler de Carvalho

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos**, no Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, área de Concentração em Tecnologia de Alimentos.

Seropédica, RJ
Outubro de 2025

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

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Brito, Alexander Ferreira, 1993-
B862i Impacto da moagem e da aeroclassificação nas
propriedades tecnofuncionais de milho pérola integral,
brunido e germinado / Alexander Ferreira Brito. - Nova
Iguaçu, 2025.
93 f.: il.

Orientador: José Luis Ramirez Ascheri. Coorientador: Carlos
Wanderlei Piler de Carvalho. Dissertação (Mestrado). --
Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro, Programa de pós graduação em ciência
e tecnologia de alimentos, 2025.

1. aeroclassificação. 2. germinação. 3. brunimento.
4. propriedades tecnofuncionais. I. Ascheri, José Luis
Ramirez, 1955-, orient. II. Carvalho, Carlos Wanderlei Piler
de, 1967-, coorient. III Universidade Federal Rural do Rio de
Janeiro. Programa de pós graduação em ciência e tecnologia de
alimentos. IV. Título.

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

TERMO Nº 685/2025 - PPGCTA (12.28.01.00.00.00.41)
Nº do Protocolo: 23083.045571/2025-62

Seropédica-RJ, 14 de agosto de 2025.

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

ALEXANDER FERREIRA BRITO

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

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 14/08/2025

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

OTNIEL FREITAS SILVA, (Dr) EMBRAPA

RAÚL COMETTANT RABANAL, (Dr)

Documento não acessível publicamente

(Assinado digitalmente em 14/08/2025 19:49)

JOSE LUIS RAMIREZ ASCHERI

ASSINANTE EXTERNO

CPF: ###.###.788-##

(Assinado digitalmente em 14/08/2025

16:50) OTNIEL FREITAS SILVA

ASSINANTE EXTERNO

CPF: ###.###.462-##

(Assinado digitalmente em 04/09/2025 16:51)

RAUL COMETTANT RABANAL

ASSINANTE EXTERNO

Passaporte: ###1860#3

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrrj.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **685**, ano: **2025**, tipo: **TERMO**, data de emissão: **14/08/2025** e o código de verificação: **9 e51f57fda**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me trazer até aqui, me guiando e ajudando a superar todas as dificuldades que aparecem no caminho, por Sua graça e misericórdia.

Aos meus pais, Janice e Geraldo, por me amarem incondicionalmente e me ensinarem a ser uma pessoa de bem, mostrando que a educação é o caminho para melhorar a vida das pessoas e a sociedade de maneira geral. Agradeço ainda à minha esposa, Caroline, pelo apoio constante e por caminhar comigo nesta estrada desafiadora da pós-graduação.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), por conceder bolsa de mestrado, possibilitando o desenvolvimento desta dissertação. Estendo os agradecimentos à Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), por me abrir as portas inicialmente na graduação e agora na pós-graduação e a todos os professores que compartilharam seu conhecimento ao longo da minha trajetória até aqui.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), na sua unidade Embrapa Agroindústria de Alimentos localizada em Guaratiba, Rio de Janeiro. O presente trabalho não seria possível sem a utilização da sua excelente estrutura e de todos os dedicados profissionais que me auxiliaram na realização das atividades práticas.

Agradeço imensamente ao meu orientador Dr. José Luis Ramirez Ascheri e ao meu co-orientador Dr. Carlos Wanderlei Piler de Carvalho por compartilharem seu conhecimento e experiência comigo, sendo pacientes e não medindo esforços para me auxiliar na realização deste trabalho.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para viabilizar este trabalho.

RESUMO

BRITO, Alexander Ferreira. **Impacto da moagem e da aeroclassificação nas propriedades tecnofuncionais de milho pérola integral, brunido e germinado.** 2025. Instituto de Tecnologia, Departamento de Tecnologia de Alimentos. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, RJ, 2025.

No presente trabalho, grãos de milho pérola (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) integrais e submetidos a dois pré-tratamentos - brunimento e germinação - foram processados por moagem e suas farinhas foram fracionadas por aeroclassificação. Os produtos de cada etapa foram caracterizados quanto à morfologia e propriedades tecnofuncionais, de modo a avaliar as modificações causadas na matéria-prima e seu impacto em potenciais aplicações na formulação de alimentos. A aeroclassificação gerou frações com distribuição de partícula mais uniforme, melhorando as capacidades de absorção de água e óleo (até $2.37 \pm 0,00$ e 2.07 ± 0.04 g/g, respectivamente) e de formação de gel (mínima concentração de 8%). A fração grosseira exibiu maior viscosidade de pasta, enquanto a fração fina apresentou maior solubilidade em água. O brunimento resultou em uma moagem mais eficiente, com menor tamanho de partícula, maior teor proteico e viscosidade de pasta e menor teor lipídico comparado aos demais pré-tratamentos. Contudo, levou também à redução da solubilidade em água e da capacidade de formação de gel nas frações aeroclassificadas. A germinação causou a perda da cristalinidade dos grânulos de amido, resultando em maior solubilidade em água e atividade emulsificante nas farinhas e frações grosseiras, mas com menor viscosidade de pasta comparada aos demais pré-tratamentos. Os pré-tratamentos resultaram em produtos com melhor capacidade de compactação comparados ao material integral. A capacidade antioxidante atingiu 17.50 ± 0.29 $\mu\text{mol Trolox/g}$ para a farinha integral, com o brunimento e a germinação levando a menores valores. A aeroclassificação reduziu a atividade antioxidante para os grãos integrais, aumentou para os grãos brunidos e não teve efeito ($p < 0,05$) sobre os grãos germinados. Os resultados evidenciaram que as propriedades tecnofuncionais do milho pérola puderam ser moduladas pelas técnicas propostas.

Palavras-chave: aeroclassificação, germinação, brunimento, propriedades tecnofuncionais

ABSTRACT

BRITO, Alexander Ferreira. Impact of milling and air-classification on techno functional properties of whole, debranned and germinated pearl millet. 2025. Institute of Technology, Department of Food Technology. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, RJ, 2025.

In the present work, whole pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) grains, subjected to two pretreatments – debranning and germination – were processed by milling, and their flours were air-classified. The products from each stage were characterized for their morphology and technofunctional properties to evaluate the modifications caused to the raw material and their impact on potential applications in food formulation. Air-classification generated fractions with a more uniform particle size distribution, improving water and oil absorption capacities (up to 2.37 ± 0.00 and 2.07 ± 0.04 g/g, respectively) and gelling ability (least gelling concentration of 8%). The coarse fraction exhibited higher paste viscosity, while the fine fraction showed greater water solubility. Debranning resulted in more efficient milling, with a smaller particle size, higher protein content, increased paste viscosity, and lower lipid content compared to other pretreatments. However, it led to a decrease in water solubility and gelling ability in the air-classified fractions. Germination caused the loss of starch granule crystallinity, resulting in increased water solubility and emulsifying activity in flours and coarse fractions, but with lower paste viscosity compared to other pretreatments. Both pretreatments resulted in products with better compactability compared to the whole material. Antioxidant activity reached up to 17.50 ± 0.29 $\mu\text{mol Trolox/g}$ for whole grain milled flour with debranning and germination leading to lower values. Air-classification reduced the antioxidant activity for whole grains, increased for debranned grains and had no difference ($p < 0.05$) for germinated grains. Results evidenced techno-functional properties of Pearl millet could be modulated by the proposed techniques.

Keywords: air-classification, germination, debranning, techno-functional properties

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	4
2.1 Objetivo Geral.....	4
2.2 Objetivos específicos.....	4
3 REVISÃO DA LITERATURA MOAGEM E AEROCLASSIFICAÇÃO	5
3.1 Moagem	6
3.1.1 Estrutura dos cereais e influência na moagem.....	7
3.2 Aeroclassificação.....	8
3.2.1 Efetividade da aeroclassificação.....	9
3.3 Rendimento	12
3.4 Limitações.....	12
3.5 Pré-tratamentos	13
4 MATERIAIS E MÉTODOS	14
4.1 Matéria-prima.....	15
4.2 Limpeza dos grãos	15
4.3 Pré-tratamento dos grãos.....	15
4.3.1 Brunimento.....	15
4.3.2 Germinação	16
4.3.3 Secagem	16
4.4 Processamento dos grãos.....	16
4.4.1 Moagem	16
4.4.2 Aeroclassificação.....	16
4.5 Caracterização físico-química das farinhas	17
4.5.1 Composição centesimal	17
4.5.2 Distribuição de tamanho de partículas	17
4.5.3 Densidade	18
4.5.4 Morfologia	19
4.5.5 Capacidade de absorção de água e solubilidade em água.....	20
4.5.6 Capacidade de absorção de óleo.....	20
4.5.7 Capacidade de formação e estabilidade de emulsão.....	20
4.5.8 Capacidade de formação e estabilidade de espuma.....	21
4.5.9 Capacidade de formação de gel.....	22

4.5.10 Propriedades de Pasta	23
4.5.11 Calorimetria diferencial de varredura	23
4.5.12 Atividade antioxidante	24
4.6 Análise estatística.....	25
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
5.1 Caracterização física das farinhas	25
5.1.1 Distribuição de tamanho de partícula.....	25
5.1.2 Densidade	29
5.2 Caracterização morfológica das farinhas.....	34
5.2.1 Microscopia ótica	34
5.2.2 Microscopia eletrônica de varredura.....	35
5.3 Caracterização química.....	37
5.3.1 Composição centesimal	37
5.4 Caracterização tecnofuncional	40
5.4.1 Determinação do grau de modificação do amido.....	40
5.4.1.1 Viscosidade de pasta.....	40
5.4.1.2 Propriedade térmica.....	42
5.4.2 Propriedades de superfície.....	46
5.4.2.1 Solubilidade em água.....	46
5.4.2.2 Capacidade de absorção de água.....	49
5.4.2.3 Capacidade de absorção de óleo.....	53
5.4.2.4 Índice de atividade emulsificante e índice de estabilidade de emulsão.....	57
5.4.2.5 Capacidade de formação de espuma.....	61
5.4.2.6 Mínima concentração formadora de gel.....	66
5.4.2.7 Atividade antioxidante	69
6 CONCLUSÃO.....	71
7 REFERÊNCIAS.....	73

1 INTRODUÇÃO

Para o desenvolvimento de ingredientes alimentícios a partir de fontes vegetais, é comum a extração de frações com o objetivo de concentrar compostos com propriedades tecnofuncionais e nutricionais desejáveis, como proteínas, amidos e fibras. Tradicionalmente, utilizam-se matérias-primas como o trigo e a soja, amplamente estudadas e reconhecidas por seu elevado teor proteico e aplicabilidade tecnológica de suas farinhas, respectivamente. No entanto, a obtenção desses ingredientes concentrados envolve processos intensivos quanto ao uso de água, energia e insumos químicos, além de gerar resíduos e representar riscos ambientais associados a sistemas agrícolas baseados em monoculturas extensivas.

Nesse cenário, cresce a demanda por fontes alternativas de matérias-primas vegetais que aliem funcionalidade tecnológica com sustentabilidade ambiental. Um dos principais desafios, entretanto, reside na dificuldade de se obter extratos de alta pureza e baixo custo a partir dessas fontes não convencionais, mantendo ou aprimorando as propriedades tecnológicas desejadas para aplicação em formulações alimentícias. Uma abordagem promissora para superar tal limitação é o uso de ingredientes menos refinados, mas que ainda apresentem desempenho funcional satisfatório, reduzindo custos e impactos ambientais associados à purificação.

Neste contexto, torna-se viável explorar matérias-primas vegetais pouco utilizadas, selecionadas não apenas por sua composição química, mas também com base em critérios como: baixa exigência hídrica, adaptação a solos marginais, menor impacto ambiental de cultivo, alta disponibilidade regional e composição físico-química favorável. Essa abordagem amplia a base agrícola de ingredientes alimentares e promove a diversificação produtiva com benefícios sociais, econômicos e ecológicos.

O milheto pérola (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) destaca-se como uma cultura de grande potencial nesse sentido. Pertencente à família Poaceae, é cultivado há milênios principalmente em regiões semiáridas da África e da Ásia, sendo adaptado a condições climáticas adversas, como solos pobres e baixa disponibilidade hídrica (TAYLOR, 2016).

No Brasil, não há dados oficiais sobre a produção comercial de milheto pérola no Brasil nos últimos cinco anos, contudo pesquisadores estimam que há cerca de 5 milhões de hectares no Brasil dedicados ao cultivo desta espécie para uso como cobertura de solo em

sistemas agrícolas de plantio direto, contribuindo para a melhoria do solo e a rotação de culturas como soja e milho, especialmente no Cerrado e na Região Sul do país (DE ASSIS, 2018).

É importante destacar que a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) não registrou uma produção significativa de milheto no Brasil quando se considera apenas a produção para consumo humano direto (FAOSTAT, 2023). No entanto, sua importância para os sistemas de produção agrícola brasileiros é crescente.

Do ponto de vista nutricional, o milheto pérola é considerado um cereal de alta densidade energética, com maior teor de lipídeos que o milho. Seu conteúdo proteico ultrapassa 10%, e o perfil de aminoácidos essenciais (como lisina, leucina e isoleucina) é mais equilibrado que o de cereais tradicionais como trigo e centeio (ANNOR *et al.*, 2017).

Além disso, ele não contém glúten, possui maior teor de fibras que o arroz, e apresenta baixo índice glicêmico, sendo especialmente relevante para formulações voltadas a públicos com restrições alimentares, como celíacos e diabéticos (SINGH *et al.*, 2018).

Para aprimorar as propriedades tecnofuncionais dos grãos antes de sua conversão em ingredientes, a aplicação de pré-tratamentos pode ser decisiva. Entre os métodos amplamente utilizados para cereais, destaca-se o brunimento, processo mecânico que remove parcial ou totalmente o pericarpo e o gérmen do grão por abrasão.

Conforme Taylor (2016), o brunimento pode reduzir em até 30% a espessura do grão, afetando positivamente a textura e o sabor, além de diminuir teores de fibras e minerais – o que pode ser adequado dependendo da aplicação final.

Outro pré-tratamento de grande relevância é a germinação, que envolve a hidratação e incubação dos grãos sob condições controladas de temperatura e umidade. Durante esse processo, ocorre ativação enzimática (fitases, amilases, proteases), resultando em transformações bioquímicas que afetam positivamente a digestibilidade, a biodisponibilidade de nutrientes e as propriedades tecnológicas dos grãos (OBADINA *et al.*, 2016).

A moagem é uma etapa central nos processos de obtenção de ingredientes alimentares, permitindo a produção de farinhas com distintas características físico-químicas conforme o grau de moagem. Pré-tratamentos como brunimento ou germinação podem melhorar a eficiência energética da moagem e contribuir para a obtenção de farinhas com menores tamanhos de partículas e propriedades otimizadas. Associado a isso, o processo de

aeroclassificação permite a separação das frações moídas com base no tamanho e densidade das partículas, ampliando as possibilidades de uso específico de cada fração com base em seu desempenho funcional.

Ao se controlar o tamanho de partícula por meio de técnicas de moagem e aeroclassificação, torna-se possível modular propriedades importantes como solubilidade em água, capacidade de absorção, capacidade emulsificante, formação de géis e estabilidade térmica – todas essenciais na formulação de produtos como bebidas vegetais, panificados, massas, emulsões e análogos cárneos.

Assim, compreender as transformações impostas pelos pré-tratamentos e processamentos (moagem e aeroclassificação) sobre as propriedades químicas, tecnológicas e funcionais das farinhas é fundamental para o desenvolvimento de ingredientes inovadores e sustentáveis. Até o presente momento, não se encontram na literatura estudos específicos que avaliem o fracionamento do milheto pérola por moagem e aeroclassificação, tampouco as consequências desse processamento sobre suas propriedades tecnofuncionais.

Desta forma, o presente trabalho teve como objetivo a moagem e aeroclassificação de milheto pérola integral, brunido e germinado, com posterior caracterização de suas propriedades químicas, tecnofuncionais e nutricionais, visando seu uso como ingrediente funcional e sustentável na indústria de alimentos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho teve como objetivo estudar o efeito do uso da moagem e aeroclassificação do milheto pérola integral, brunido e germinado na obtenção de farinhas ultrafinas.

2.2 Objetivos específicos

- Obter grãos inteiros, brunidos e germinados para a moagem e aeroclassificação;
- Processar os grãos integrais, brunidos e germinados no moinho classificador de impacto;
- Submeter as farinhas moídas ao processo de aeroclassificação para a obtenção de duas frações com características distintas das farinhas originais;
- Caracterizar a farinha obtida da moagem e as frações classificadas (fina e grossa) quanto à distribuição de tamanho de partícula, morfologia, composição centesimal e capacidade tecnofuncional.

3 REVISÃO DA LITERATURA
MOAGEM E AEROCLASSIFICAÇÃO

3.1 Moagem

A moagem é um processo físico usado para reduzir o tamanho de partículas sólidas, aumentando sua área superficial e expondo componentes celulares dos materiais moídos. Na produção de alimentos, é usada para obter farinhas a partir de cereais e leguminosas.

A moagem é realizada em equipamentos denominados moinhos, constituídos em geral por uma câmara fechada na qual o material sofre redução a partir da aplicação de uma força mecânica. A produção de farinhas ultrafinas, caracterizadas por seu tamanho de partícula extremamente reduzido (geralmente abaixo de 10 micrômetros), exige equipamentos de moagem especializados. Essa finura confere propriedades únicas aos produtos finais, como melhor solubilidade, maior área de superfície e melhor dispersão, sendo essencial em diversas indústrias, desde a alimentícia até a farmacêutica e de cosméticos. Os principais tipos de moinhos utilizados para atingir essa granulometria são os moinhos de jatos fluidos, os moinhos de bolas e os moinhos de martelos finos ou com classificador integrado (WELLENKAMP, 1999).

Os moinhos de jatos fluidos, também conhecidos como moinhos a ar, são amplamente empregados na produção de pós ultrafinos. Eles operam injetando um gás (geralmente ar comprimido ou nitrogênio) em alta velocidade dentro de uma câmara de moagem, criando um fluxo turbulento que faz com que as partículas colidam entre si e com as paredes do moinho, resultando na micronização. Uma das grandes vantagens desse tipo de moinho é a ausência de peças móveis de moagem, o que minimiza a contaminação e o aquecimento do produto, tornando-o ideal para materiais sensíveis ao calor e que exigem alta pureza. Existem diferentes configurações, como os moinhos de leito fluidizado com jato oposto e os moinhos de jato em espiral (IDELFONSO, 2023).

Os moinhos de bolas, apesar de serem um tipo de moagem mais tradicional, também são eficazes na obtenção de farinhas ultrafinas, especialmente em sistemas de moagem úmida. O princípio de funcionamento baseia-se na rotação de um cilindro contendo as partículas a serem moídas e um meio de moagem (bolas de diferentes materiais, como cerâmica, aço ou zircônia). A moagem ocorre por impacto e atrito das bolas com as partículas à medida que o cilindro gira. Para farinhas ultrafinas, são utilizados moinhos de bolas com

diâmetro menor e maior densidade das bolas, e o processo pode ser otimizado com a adição de agentes dispersantes para evitar a aglomeração das partículas (WELLENKAMP, 1999).

Por fim, os moinhos de martelos finos ou com classificador integrado representam uma evolução dos moinhos de martelos convencionais, incorporando mecanismos que permitem um controle mais preciso da granulometria. Nesses sistemas, a moagem é realizada pelo impacto dos martelos rotativos de alta velocidade contra as partículas. A integração de um classificador de ar no mesmo equipamento permite que as partículas que já atingiram a finura desejada sejam removidas, enquanto as partículas maiores são recirculadas para moagem adicional. Essa combinação otimiza o processo, garantindo uma distribuição de tamanho de partícula mais estreita e uniforme, o que é crucial para farinhas ultrafinas (SADLER; STANLEY; BROOKS, 1975).

A escolha do tipo de moinho dependerá de diversos fatores, como as características do material a ser moído (dureza, abrasividade, sensibilidade ao calor), a granulometria final desejada, a capacidade de produção e os custos operacionais. Cada tecnologia oferece vantagens e desvantagens específicas, sendo fundamental uma análise aprofundada para determinar a solução mais adequada para cada aplicação (TYLER, 1984).

3.1.1 Estrutura dos cereais e influência na moagem

Grãos de cereais são estruturas de reprodução das plantas que contêm reservas energéticas necessárias à geração de uma nova planta. Eles são compostos basicamente por uma camada externa resistente rica em fibras chamada de pericarpo, o gérmen, que é a parte reprodutiva do grão e o endosperma, a reserva de energia do grão (Figura 1).

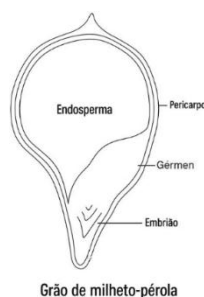


Figura 1: Representação simplificada da estrutura do grão de milho pérola inspirada em Taylor, 2016, com modificações. Elaborada pelo autor.

O gérmen contém o embrião que dará origem à nova planta, sendo abundante em lipídeos, vitaminas e minerais. O endosperma armazena energia para o desenvolvimento da semente na forma de amido, o qual é hidrolisado por enzimas durante o processo de germinação para obter energia, em especial pela enzima alfa-amilase (TAYLOR, 2016).

Farinhas de cereais são obtidas pela moagem dos grãos integrais ou após serem submetidos a algum tipo de tratamento para a retirada do pericarpo e do gérmen, uma vez que endosperma farináceo é a parte de maior interesse para a moagem (EVERS; MILLAR, 2002).

No endosperma, o amido é armazenado na forma de grânulos, que por sua vez ficam rodeados por uma matriz proteica. Dentre os principais parâmetros da moagem de grãos em farinhas, a dureza é o parâmetro físico que relaciona a adesão entre a matriz proteica e os grânulos de amido (DZIKI; LASKOWSKI, 2010).

Assim, quanto maior a dureza do grão, maior é a energia requerida para a sua quebra em partículas menores, uma vez que os corpos proteicos estão mais fortemente aderidos aos grânulos de amido (PASHA, 2010).

O tamanho de partícula tem influência central na moagem, pois norteia um dos principais parâmetros do processo, o grau de moagem almejado ou tamanho de corte, que define o tamanho final das partículas da farinha (PELGROM, 2013).

3.2 Aeroclassificação

A aeroclassificação é um processo de separação de partículas em uma mistura de sólidos particulados. O processo se baseia nos princípios físicos da força centrífuga e da elutriação, ou arrasto. O equipamento no qual ela ocorre é denominado aero-classificador dinâmico, o qual em geral possui formato cônico, similar a um ciclone. Este equipamento é capaz de separar partículas com diâmetro entre 200 e 1 μm (PULIVARTHI, 2023).

O sistema de separação é composto pelos subsistemas de alimentação, por onde a farinha é inserida, o subsistema de classificação, que separa as partículas por diferença de tamanho e um sistema de ar pressurizado, que auxilia na separação das partículas por diferença de densidades. O processo de separação consiste na passagem da farinha por uma peneira classificadora giratória, cuja rotação produz uma força centrífuga sobre as partículas

no seu interior, empurrando as mais densas para as extremidades. O sistema de ar pressurizado auxilia na separação arrastando as partículas menos densas no sentido oposto ao deslocamento das partículas mais densas, as quais sofrem maior influência da força centrífuga induzida pela peneira giratória (SCHUTYSER; VAN DER GOOT, 2011).

Ao final do processo, a farinha inserida no sistema de alimentação é dividida em duas frações (Figura 2). Uma das frações contém partículas de maior tamanho e densidade, a qual será chamada aqui de fração grosseira. A outra fração, com partículas menores e menos densas será denominada fração fina (PELGROM *et al.*, 2015).

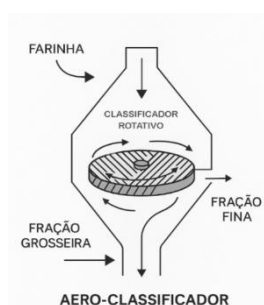


Figura 2: Ilustração simplificada do aeroclassificador e do processo de separação, elaborada pelo autor.

3.2.1 Efetividade da aeroclassificação

A aeroclassificação é um método eficaz, limpo e econômico para produzir ingredientes com perfil proteico elevado a partir de cereais e leguminosas. Pela modulação dos parâmetros de moagem e aeroclassificação, as frações obtidas podem conferir diferentes características desejáveis para aplicação em alimentos funcionais e sustentáveis (DE ANGELIS *et al.*, 2023).

A otimização dos parâmetros — moagem, umidade, velocidade do rotor e tipo de grão — é crucial para maximizar rendimento e funcionalidade dos ingredientes. Com o crescente interesse em produtos *plant-based*, essa tecnologia contribui decisivamente para a inovação e diversificação de ingredientes alimentícios (SCANLON, 2018).

Dentre as principais vantagens e propósitos destaca-se a concentração de proteína, que permite a obtenção de frações com alto teor proteico (40–65% em base seca) ao separar partículas finas (proteínas) de frações mais grossas (amido). Por ser um processo sustentável,

dispensa uso de solventes, insere-se facilmente em linhas de moagem e beneficiamento, promovendo maior valor agregado a ingredientes naturais (WANG, 2019).

Previamente à aeroclassificação, os grãos são moídos até tamanho adequado (ex.: <45 µm para proteína) usando moinho de impacto ou com classificador de impacto. A moagem deve fragmentar o endosperma preservando a proteína e danificando o mínimo de amido. Na etapa de aeroclassificação, o ajuste da velocidade do rotor e o fluxo de ar definem o ponto de corte – tamanho no qual a partícula tem iguais chances de estar na fração fina ou na grosseira - entre (i) fração fina (rico em proteína) e (ii) grossa (rico em amido). Parâmetros ideais variam conforme a finalidade do processo. Para a concentração proteica a partir de cevada, por exemplo, foram utilizados 4000 rpm e 50 m³/h para a velocidade do rotor e o fluxo de ar, respectivamente, obtendo bom rendimento na concentração proteica (SILVENTOINEN *et al.*, 2018).

Dentre os fatores que afetam eficiência do processo de aeroclassificação, destacam-se a umidade do grão moído, o teor de gordura e a microestrutura do grão. Segundo (SCHUTYSER; VAN DER GOOT, 2011), para o fracionamento mais eficiente a farinha deve ter um teor de umidade menor do que 12%.

Quanto à gordura, seu excesso prejudica a dispersão, reduzindo pureza da fração proteica. Embora não haja uma precisão quanto ao percentual máximo de lipídeos na literatura, somado ao fato de que as interações entre lipídeos e outros componentes variam conforme a matriz alimentar, estudos anteriores comprovaram que a remoção prévia de lipídeos melhora a eficiência de separação da aeroclassificação. Silbakov *et al.*, (2011) conseguiram dobrar a concentração de beta-glucanas nas frações enriquecidas em componentes da parede celular ao submeterem aveia em flocos a uma etapa prévia de remoção de gordura. O mesmo procedimento foi adotado por Silventoinen *et al.*, (2019) para farelo de arroz, melhorando as concentrações de fibras solúveis e proteína nas frações.

Em relação à microestrutura do grão, as variedades mostram desempenho diverso conforme estrutura, composição e dureza (SCHUTYSER, 2015). Os grânulos de amido podem ter diâmetro entre 15 e 40 µm em média (HOOVER *et al.*, 2010) e os corpos de proteína podem ter, também em média, diâmetros entre 1 e 10 µm (SCHUTYSER; VAN DER GOOT, 2011).

Portanto, durante a aeroclassificação espera-se que os grânulos de amido sejam recolhidos na fração grosseira e os corpos proteicos na fração fina. O sucesso da aeroclassificação depende do total desprendimento entre os grânulos de amido e os corpos proteicos que os rodeiam durante a moagem.

Assim, a moagem deve ter intensidade suficiente para promover a total separação entre os grânulos de amido e os corpos proteicos, contudo não deve ser excessiva, pois farinhas com tamanhos de partícula muito pequenos dificultam a aeroclassificação, a qual se baseia na diferença de tamanho e densidade entre os componentes da farinha. Isto significa que os componentes não proteicos como o amido e a fibra devem permanecer maiores que os corpos proteicos para que a aeroclassificação seja efetiva (PELGROM *et al.*, 2013).

Além disso, a moagem excessiva pode danificar os grânulos de amido e esses fragmentos, mais leves, podem ser arrastados pelo fluxo de ar que promove a aeroclassificação, contaminando a fração fina, na qual se espera que haja mais proteínas (PELGROM *et al.*, 2014).

A moagem excessiva pode ainda produzir um pó muito fino e com alta área superficial específica, causando aglomeração entre partículas por forças de Van der Waals e acarretando mau comportamento do fluxo coesivo (DIJKINK *et al.*, 2007; PELGROM *et al.*, 2014).

Por fim a moagem excessiva também provoca a ligação de pequenas partículas de proteína a grandes grânulos de amido, fenômeno denominado efeito anzol (ZHU *et al.*, 2020), levando essas proteínas à fração grossa e diminuindo a eficiência do processo de separação.

A composição química dos grãos, que além de proteínas e amido, contêm fibras, lipídeos e água, também pode interferir na eficiência do processo de separação por aeroclassificação.

Fibras e outros materiais insolúveis em grande quantidade na parede celular do grão podem dificultar a separação dos componentes proteicos e amiláceos (TYLER, 1984). Já o teor de lipídeos presente nos grãos não deve ser muito elevado, pois os lipídeos podem causar aglomeração, dificultando a separação das partículas suspensas no ar.

Por fim o teor de água, ou a umidade do grão, pode ter diferentes efeitos no processo de separação. Na literatura há trabalhos nos quais uma baixa umidade dificultou a purificação da proteína e outros onde a umidade beneficia a separação (PELGROM *et al.*, 2015).

Quanto às variáveis do processo de aeroclassificação, a alimentação mássica consiste na taxa de alimentação de material no equipamento (massa/tempo) a qual deve ser diretamente proporcional ao tamanho da peneira classificadora e ao fluxo de ar.

O tamanho de corte é outra varável, definida como o diâmetro no qual a partícula tem possibilidades iguais de estar na fração fina ou na grossa. Para a aeroclassificação 10 µm é próximo ao ideal para a separação de proteínas e amido, um pouco menor do que o grão de amido (PELGROM *et al.*, 2015).

Outras variáveis são a velocidade do classificador e o fluxo de ar, sendo a primeira definida como a velocidade da roda classificadora giratória e a segunda como o volume mássico de ar adicionado por unidade de tempo (PELGROM *et al.*, 2013).

3.3 Rendimento

O rendimento - percentual proteico em uma fração em relação à massa de farinha alimentada no aero-classificador - é dependente da matéria-prima, no entanto as concentrações de proteína por quantidade de farinha proveniente da moagem e da aeroclassificação variam entre 40 e 65 g/100 g (db.), (SKYLAS *et al.* 2022).

3.4 Limitações

Uma das principais limitações associadas ao processo de moagem e aeroclassificação é o fato de partículas abaixo de 10 µm apresentarem forças de interação de Van der Waals significativas entre si, o que demanda o uso de aeroclassificadores com maior aporte energético, aumentando o custo de produção. Também podem ser utilizados auxiliares de fluidez, como a sílica, para reduzir a agregação de partículas finas (WANG *et al.*, 2016; PELGROM *et al.*, 2015).

Outra limitação é o fracionamento de farinhas ricas em lipídios por aeroclassificação, pois o alto teor de óleo impede a livre dispersão das partículas moídas no ar (DIJINK *et al.*, 2007; SCHUTYSER; VAN DER GOOT, 2011).

Além disso, a aeroclassificação depende das diferenças de tamanho e densidade, logo a separação de partículas de amido e proteína similares em tamanho pode ser ineficiente (SOLMAZ TABTABAEI *et al.*, 2016; WANG *et al.*, 2016).

Finalmente, em vista da sustentabilidade da aeroclassificação, é preciso encontrar aplicações para aumentar o valor agregado da fração grosseira, normalmente enriquecida em amido e de menor interesse tecnológico, aumentando o lucro e a sustentabilidade global das operações comerciais (RATNAYAKE; NAGULESWARAN, 2021; REN *et al.*, 2016).

3.5 Pré-tratamentos

Uma abordagem para uma possível solução do problema associado ao aproveitamento da fração grosseira, apresentado no final da seção anterior, pode ser o pré-tratamento dos grãos submetidos à moagem e aeroclassificação. Tal abordagem tem como objetivo melhorar as condições de processamento – como a redução da dureza do grão, por exemplo – ou mudar as características físico-químicas do material para obter novas funcionalidades técnicas na formulação de alimentos.

Um dos pré-tratamentos mais empregados em cereais previamente à moagem é o brunimento, ou decorticação, que consiste na remoção parcial do pericarpo e parte do gérmen pelo contato com uma superfície abrasiva rotativa. A remoção da camada externa que protege o grão provoca redução na sua dureza, possibilitando uma moagem mais intensiva e a obtenção de partículas menores com menor gasto energético (SRUTHI; RAO; RAO, 2021). Além disso, o brunimento pode reduzir o percentual de fibras e outros componentes presentes no pericarpo e no gérmen, como lipídeos e polissacarídeos. O grau de remoção de tais componentes superficiais depende da intensidade do brunimento, a qual está associada à velocidade de rotação da superfície abrasiva e à taxa de alimentação dos grãos no equipamento (HAMA *et al.*, 2011).

Taylor, 2016, reportou que a espessura do grão pode ser reduzida em até 30% após o brunimento, reduzindo também o percentual de alguns componentes moleculares na composição dos grãos, como as fibras e minerais.

A germinação é outro pré-tratamento frequentemente empregado com a finalidade de alteração físico-química dos grãos e consequente mudança nas propriedades tecnofuncionais

da farinha após a moagem. Neste tipo de pré-tratamento, os grãos são imersos em água, colocados em uma estufa sob temperatura e umidade controladas e secos (BENINCASA *et al.*, 2019). Durante a germinação ocorre o aumento da atividade das enzimas fitases, glicosidases, amilases e proteases, responsáveis pelas alterações físico-químicas nos grãos (OBADINA *et al.*, 2016). Tais enzimas provocam a hidrólise de macromoléculas como o amido e as proteínas em componentes menores como sacarídeos e aminoácidos, respectivamente, provocando mudanças nas propriedades físicas, químicas, nutricionais e funcionais (BHAVADHARANI; GURUMOORTHY, 2025).

A extensão das mudanças físico-químicas depende do controle de parâmetros do processo de germinação como a proporção de água e massa de grãos durante a etapa de hidratação, o tempo e a temperatura durante a germinação e a posterior secagem do material germinado (GUNATHUNGA *et al.*, 2024).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e metodologias utilizados no presente trabalho estão sequenciados e resumidos no fluxograma da Figura 3 e serão detalhados nas seções subsequentes.

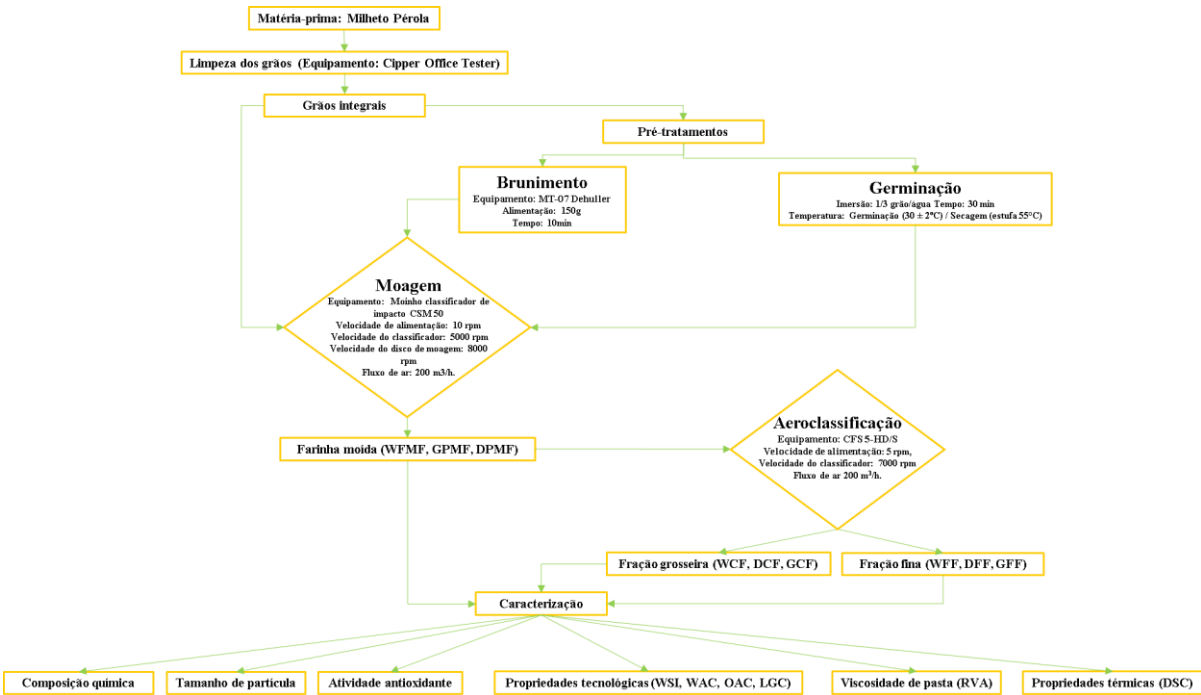


Figura 3: Resumo esquemático dos procedimentos e metodologia realizados no presente trabalho, elaborado pelo autor.

WPMF: farinha integral, DPMF: farinha brunida, GPMF: farinha germinada, WCF: fração grosseira da farinha integral, DCF: fração grosseira da farinha brunida, GCF: fração grosseira da farinha germinada, WFF: fração fina da farinha integral, DFF: fração fina da farinha brunida, GFF: fração fina da farinha germinada, WSI: índice de solubilidade em água, WAC: capacidade de absorção de água, OAC: capacidade de absorção de óleo, LGC: mínima concentração formadora de gel, RVA: analisador rápido de viscosidade e DSC: calorimetria diferencial de varredura.

4.1 Matéria-prima

Grãos de milheto pérola (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.), híbrido ADRg 9070 foram gentilmente doados pela empresa Atto Sementes (Rondonópolis, Brasil). A colheita foi feita em julho de 2021 nas coordenadas geográficas: 16°29' S latitude and 54°38' W longitude.

4.2 Limpeza dos grãos

Os grãos foram limpos em um separador de sementes a ar Clipper Office Tester, (AT Ferrell Company Inc., Bluffton, EUA) para remoção de outras sementes contaminantes, palha, poeira, galhos, pedras e outros resíduos agrônômicos.

4.3 Pré-tratamento dos grãos

As amostras limpas de grãos integrais foram submetidas a dois processamentos diferentes: brunimento e germinação. Os grãos crus integrais (não processados) foram utilizados como controle.

4.3.1 Brunimento

O brunimento dos grãos integrais de milheto foi realizado em uma máquina mecânica de descasque de arroz por abrasão modelo MT-97, nº 3788-5, (Suzuki, São Paulo, Brasil) a uma taxa de alimentação de 150 g por 10 min. Os grãos foram armazenados em sacos de polietileno e protegidos da luz sob refrigeração (4 ± 1 °C) até o processamento.

4.3.2 Germinação

Para a germinação, grãos integrais foram imersos em água (razão 1:3 grão para água) por 1 hora e, em seguida, drenados. Os grãos foram colocados para germinar em uma câmara de fermentação de oito portas (National Mfg. Co., Lincoln, EUA) com temperatura controlada (30 ± 2 °C) e umidade relativa (90%). Após 8 h de germinação, os grãos foram secos em estufa com ventilação a 30 °C por 24 h, até atingirem umidade final inferior a 7%.

4.3.3 Secagem

Os grãos, integrais e brunidos, foram secos (55 °C) até umidade inferior a 7%.

4.4 Processamento dos grãos

4.4.1 Moagem

Grãos integrais (WG), grãos brunidos (DG) e grãos germinados (GG) foram moídos separadamente em bateladas de 650 g em um moinho classificador LabCompaqPlus equipado com uma unidade de moagem CSM 50 (NETZSCH, Pomerode, Brasil) nas seguintes condições, que foram mantidas constantes: taxa de alimentação de 10 rpm, velocidade do aero-classificador ou peneira rotativa de 5000 rpm, velocidade de rotação do disco de moagem de 8000 rpm e fluxo de ar de 200 m³/h.

As farinhas obtidas para cada pré-tratamento foram assim denominadas: farinha de grão integral (WPMF), farinha de grão brunido (DPMF) e farinha de grão germinado (GPMF). Em seguida, as farinhas foram armazenadas em sacos de polietileno e mantidas em temperatura ambiente (cerca de 25 °C) até posterior processamento.

4.4.2 Aeroclassificação

300g de cada farinha moída (WPMF, DPMF e GPMF) foi processada no LabCompaqPlus equipado com o aeroclassificador CFS 5-HD/S (Netzsch do Brasil, Pomerode, Brasil). O teor de umidade foi ajustado por secagem para atingir a faixa de umidade padronizada (abaixo de 6%).

Os mesmos parâmetros de processamento foram aplicados para cada amostra: taxa de alimentação de 5 rpm, velocidade do aeroclassificador de 7000 rpm e fluxo de ar de 200 m³/h. Cada farinha gerou duas frações de acordo com o tamanho das partículas: uma fração grosseira e uma fração fina.

As frações produzidas para cada farinha – fração grosseira da farinha integral (WCF), fração grosseira da farinha brunida (DCF), fração grosseira da farinha germinada (GCF), fração fina da farinha integral (WFF), fração fina da farinha brunida (DFF) e fração fina da farinha germinada (GFF) – foram armazenadas em sacos de polietileno e mantidas em sob refrigeração (cerca de 4 °C) até processamento posterior.

4.5 Caracterização físico-química das farinhas

As farinhas obtidas nas etapas de processamento foram submetidas a ensaios de caracterização físico-química e funcional.

4.5.1 Composição centesimal

Os ensaios de composição centesimal seguiram os métodos de análise da AOAC (2010) para o teor de umidade (AOAC 925,09), teor de cinzas (AOAC 923,03), nitrogênio total (AOAC 2001,11), proteína total (nitrogênio total \times 6,25), e teor de lipídeos (AOAC 945,38). O teor de amido total (AACC 76-13.01) foi determinado utilizando o kit *Megazyme International Ireland Ltd* (Wicklow, Irlanda).

4.5.2 Distribuição de tamanho de partículas

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

A partir dos valores obtidos, são calculados mais dois parâmetros, a razão percentual de quebra da parede celular (Φ) e a amplitude de distribuição, conforme equações (1) e (2) abaixo, respectivamente.

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

$$Amplitude = \frac{D_{90}-D_{10}}{D_{50}} \quad (2)$$

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

4.5.3 Densidade

Foram feitos ensaios de densidade absoluta, aparente e volumétrica, para efeito de comparação e esclarecimento das propriedades físicas e tecnológicas das farinhas.

A densidade absoluta foi determinada no picnômetro de gás hélio AccuPyc II 1340 (Micromeritics, Norcross, EUA), usando o *software* Accupyc II 1340 para Windows (Micromeritics, Norcross, EUA) para análise de dados, conforme metodologia descrita por Bernardo *et al.*, 2018. Os ensaios de densidade absoluta foram realizados em duplicata.

A densidade absoluta é a medida da razão entre a massa conhecida e o volume das partículas do material, o qual é determinado pelo deslocamento de hélio gasoso injetado entre elas.

A densidade aparente foi determinada utilizando uma proveta graduada de 250 mL, conforme Liu *et al.*, (2022). O cálculo da densidade foi feito a partir do peso e do volume da proveta cheia da amostra, conforme a equação (3) abaixo.

$$\text{Densidade aparente g/cm}^3 = \frac{M}{V} \quad (3)$$

Na equação acima, M é a massa da amostra e V é o volume ocupado pela massa da amostra na proveta graduada.

Para a realização do experimento, foi feita a tara da proveta graduada, em seguida foi pesada uma massa inicial de $10 \pm 0,1$ g de farinha e anotado o volume ocupado na escala de graduação da proveta. Estes valores de volume foram considerados para efeito de cálculo da densidade aparente.

Em seguida, a base da proveta foi batida contra uma superfície sólida para que a farinha fosse compactada, conforme Liu *et al.*, (2022).

O processo foi repetido até que não mais houvesse variação de volume da farinha dentro da proveta. Os novos valores de volume serão considerados para efeito de cálculo da densidade volumétrica. Os ensaios de densidade aparente e volumétrica foram realizados em triplicata.

4.5.4 Morfologia

Foram utilizadas microscopia ótica e de varredura para a avaliação da morfologia das farinhas. Foram preparadas lâminas para a leitura no microscópio ótico Leitz Laborlux S (Leica, Famalicão, Portugal), sob luz polarizada, usando água deionizada como agente dispersor e submetendo as amostras a diferentes níveis de aumento 400X, 1000X e 4000X. As imagens foram registradas por uma câmera digital MShot (Guangzhou, China) acoplada ao microscópio.

Para a microscopia de varredura, as amostras foram deixadas em um dessecador por 15 dias para redução no teor de umidade, fixadas no suporte de análise com o auxílio de uma fita dupla face de carbono e inseridas no microscópio eletrônico de varredura de mesa TM-3000 (Hitachi, Tóquio, Japão) operado a 15 kV, com ampliação escolhida de modo a obter as melhores imagens nos aumentos de (400X; 500X; 1000X; 2000X; 2500X e 4000X).

4.5.5 Capacidade de absorção de água e solubilidade em água

As capacidades de absorção de água (*Water absorption capacity* - WAC) e o índice de solubilidade em água (*Water solubility index* - WSI) foram realizadas conforme método descrito por Gundogan e Karaca (2020), com modificações. Amostras de farinhas moídas e frações aero-classificadas foram pesadas (1 g) em tubos selados de 50 mL previamente pesados. Foram adicionados 5 mL de água deionizada, homogeneizadas em um vórtex Genie 2 (Scientific Industries, Bohemia, EUA) por 10 s e, em seguida, adicionou-se mais 5 mL de água deionizada, deixando-as em repouso em temperatura ambiente por 30 min.

Em seguida, os tubos foram levados à uma centrífuga Universal 320R (Hettich, Tuttlingen, Alemanha) a 9.000 rpm por 15 min, de acordo com o método descrito por Yilmaz & Emir (2016), com modificações. O sobrenadante foi removido e seco em estufa a 105°C durante a noite para determinar o índice de solubilidade em água (WSI). O sedimento foi pesado e utilizado para determinar a capacidade de absorção de água (WAC) por diferença de peso. O experimento foi realizado em quadruplicata.

4.5.6 Capacidade de absorção de óleo

Amostras foram pesadas (1 g) em tubos selados de 50 mL previamente pesados, aos quais foram adicionados 10 mL de óleo de soja. Em seguida, foram homogeneizadas em um vórtex Genie 2 (Scientific Industries, Bohemia, EUA) por 1 min e deixadas em repouso à temperatura ambiente por 30 min.

Posteriormente, os tubos foram centrifugados em uma centrífuga Universal 320R (Hettich, Tuttlingen, Alemanha) a 9.000 rpm por 15 min, conforme o método descrito por Yilmaz & Emir (2016), com modificações. O sobrenadante foi removido e o sedimento foi pesado para determinar a capacidade de absorção de óleo por diferença de peso. O experimento foi realizado em triplicata.

4.5.7 Capacidade de formação e estabilidade de emulsão

Uma solução a 0,5% p/p de cada amostra em pó foi preparada em água destilada para determinar o índice de atividade emulsificante (*Emulsion activity index* - EAI) e o Índice de Estabilidade da Emulsão (*Emulsion stability index* - ESI), de acordo com o método de Wani *et al.*, (2015), com algumas modificações.

A 60 mL da solução foram adicionados 20 mL de óleo de soja, e o pH foi ajustado para 7 usando NaOH 0,1 M ou HCl 0,1 M. Em seguida, utilizando um Ultra-Turrax T25 basic (IKA, Werke, Alemanha) com uma sonda S25 KV-18, a mistura foi homogeneizada mecanicamente a 9500 rpm por 1 min.

Da emulsão formada, 50 mL foram retirados, entre o meio e o fundo do béquer, adicionados a 5 mL de dodecil-sulfato de sódio (SDS) 0,1% p/p e homogeneizados em vórtex. Um espectrofotômetro (Biospectro, EUA) foi usado para ler as absorbâncias no comprimento de onda de 500 nm nos tempos 0 (A0) e 10 min (A10) após a formação da emulsão.

O EAI e o ESI foram calculados usando as seguintes equações (4) e (5), respectivamente:

$$\text{EAI (m}^2\text{/g)} = \frac{2 \times 2.303 \times \text{DF} \times \text{A0}}{c \times \theta \times 10000} \quad (4)$$

$$\text{ESI (min)} = \frac{\text{A0}}{\text{A0} - \text{A10} \times 10} \quad (5)$$

Nas equações acima, DF representa o fator de diluição (100), c é a concentração da solução inicial (g/mL), ϕ é o caminho óptico (0,01), θ é a porcentagem de óleo na emulsão (0,25), A0 e A10 são as absorbâncias da emulsão aos 0 min e 10 min, respectivamente.

4.5.8 Capacidade de formação e estabilidade de espuma

A determinação da capacidade de formação de espuma (*Foaming capacity* - FC) e da estabilidade de espuma (*Foaming stability* - FS) foi feita seguindo o método descrito por Ghribi *et al.*, (2015), com algumas modificações.

Soluções proteicas de 2,5 g/100 g foram preparadas e ajustadas para pH 7 usando NaOH 0,1 M ou HCl 0,1 M. Quinze mililitros foram transferidos para um béquer de 100 mL e homogeneizados por 2 min usando um ultra-turrax (Sonda S 25 KV-18 G), seguindo a rampa de rotação/tempo de 6500 rpm/30 s, 9500 rpm/30 s e 13500 rpm/60 s. A espuma formada foi cuidadosamente transferida para uma proveta graduada de 50 mL com o auxílio de uma espátula. A Capacidade de Formação de Espuma (FC) e a Estabilidade da Espuma (FS) foram calculadas de acordo com as equações (6) e (7):

$$FC (\%) = \frac{V_1 - V_0}{V_0} \times 100 \quad (6)$$

$$FS (\%) = \frac{V_2}{V_1} \times 100 \quad (7)$$

Onde V1 é o volume total logo após mistura, V0 é o volume inicial antes da mistura e V2 é o volume total após mistura tendo transcorrido 10, 30 e 60 min em repouso.

4.5.9 Capacidade de formação de gel

A menor concentração formadora de gel (*Least gelling concentration* - LGC) foi determinada conforme descrito por Boye *et al.*, (2010). Suspensões com concentrações variando de 2 a 20 g/100 g foram preparadas em 5 mL de água destilada e transferidas para tubos de ensaio de vidro selados. Os tubos foram imersos em um banho-maria a 100°C por 1h, depois resfriados imediatamente em banho de gelo e mantidos durante a noite a 4°C.

As amostras foram então vertidas e divididas em 3 classificações, em relação à formação de gel: (-) sem formação de gel, quando a solução estava líquida e fluía sem resistência; (±) gel fraco, quando a solução fluía com alguma resistência; (+) formação de gel, quando o tubo era invertido e a solução não fluía. A concentração mínima para formação

de gel foi definida como a menor concentração para formar um gel firme em todas as três repetições da mesma amostra.

4.5.10 Propriedades de Pasta

A propriedade de pasta foi avaliada em um analisador rápido de viscosidade Visco Analyzer série 4 RVA (Newport Scientific Pty Ltd., Warriewood, Austrália) seguindo o método descrito por Carvalho *et al.*, (2010), o qual considerou o perfil de 20 min começando à temperatura de 25 °C. Os dados foram analisados usando o software Thermocline para Windows (Newport Scientific Pty Ltd., Warriewood, Austrália).

As farinhas foram pesadas para atingir 14% de umidade em base úmida ao serem adicionadas a 25 mL de água destilada. As leituras da curva de viscosidade foram: temperatura de formação de pasta (PT), viscosidade de pico a 95 °C (PV), viscosidade mínima após aquecimento (mV) e viscosidade final (FV). A quebra de viscosidade (*breakdown viscosity*, BV) e a retrogradação (*setback viscosity*, SV) foram calculadas a partir dos demais parâmetros, conforme as equações 8 e 9 abaixo, respectivamente.

$$BV = PM - mV \quad (8)$$

$$SV = FV - mV \quad (9)$$

4.5.11 Calorimetria diferencial de varredura

Todas as amostras foram avaliadas em duplicata para suas propriedades térmicas em um DSC Q200 (TA Instruments, New Castle, EUA), utilizando o software Advantage versão 5 (TA Instruments, New Castle, EUA). Água deionizada na proporção de 2:1 foi adicionada a aproximadamente 2 mg de cada amostra em uma cápsula hermética de alumínio. As cápsulas foram seladas e deixadas em repouso por no mínimo 4 h antes da leitura. Uma cápsula vazia foi usada como referência. A temperatura de varredura foi definida na faixa de 5 a 110 °C a uma taxa de 10 °C/min.

4.5.12 Atividade antioxidante

A atividade antioxidante das amostras foi determinada usando o ensaio de eliminação de radicais ABTS, conforme Rufino *et al.*, (2007). Inicialmente, 5 g de amostra foram pesados e submetidos a um processo de extração sequencial. A primeira extração foi feita com 10 mL de metanol 50%, seguida de um período de descanso de 60 min à temperatura ambiente e protegido da luz. Em seguida, a mistura foi centrifugada a 2,000 rpm por 15 min e o supernadante foi coletado. O resíduo foi então extraído novamente com 10 mL de acetona 70%, seguido dos mesmos processo de descanso e centrifugação em condições idênticas à primeira extração. Os supernadantes das duas extrações foram combinados em um balão volumétrico de 25 mL e o volume foi completado com água destilada. Para o ensaio, 30 µL do extrato e um branco (etanol) foram transferidos para tubos de teste em triplicata. Em seguida, 3 mL de solução diluída de ABTS•+ [sal de diamônio 2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfônico)] foi adicionado a cada tubo em intervalos cronometrados e a mistura foi homogeneizada. A absorbância (Abs.) foi medida a 734 nm após 6 min de reação em um espectrômetro de feixe duplo UV visível (Biospectro, EUA). A atividade antioxidante foi calculada baseada em uma curva padrão de Trolox (ácido 6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcromano-2-carboxílico), numa faixa específica de concentração (100-2000 µM) e expresso como µmol de Trolox equivalentes por grama de amostra (µmol TE/g). A concentração da amostra em Trolox equivalentes (µmol/L) é determinada usando a seguinte equação, derivada da regressão linear da curva padrão Trolox ($Y = ax + b$):

$$C_f = [(Abs. \text{ do branco} - Abs. \text{ da amostra}) - b] / a \quad (10)$$

Onde:

C_f é a concentração final do extrato expressa em Trolox equivalentes (µmol/L);

a = Coeficiente angular (obtido da curva padrão de Trolox);

b = Coeficiente linear (obtido da curva padrão de Trolox).

A atividade antioxidante (AA), expressa em μmol de Trolox por grama de amostra, foi calculada usando a equação abaixo:

$$AA = C_f / C_s \quad (11)$$

Onde:

AA é a atividade antioxidante em μmol de Trolox por grama de amostra;

C_f é a concentração final do extrato expressa em Trolox equivalentes ($\mu\text{mol/L}$);

C_s é a concentração da amostra em gramas por litro (g/L).

4.6 Análise estatística

Os dados das análises foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e o teste de Tukey foi aplicado para comparação entre as médias considerando significância ($p < 0,05$). Tais análises foram executadas utilizando o *software* STATISTICA, versão 7.0 (StatSoft, Inc., Tulsa, USA).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização física das farinhas

5.1.1 Distribuição de tamanho de partícula

As curvas de distribuição de tamanho de partícula (*Particle size distribution* – PSD) exibidas na Figura 4 tendem a se deslocar no sentido da origem no eixo horizontal, partindo das frações grosseiras mais à direita e passando pelas farinhas até frações finas mais à esquerda, indicando redução no tamanho de partícula. Há também um estreitamento das curvas das frações grosseiras e finas em relação as farinhas.

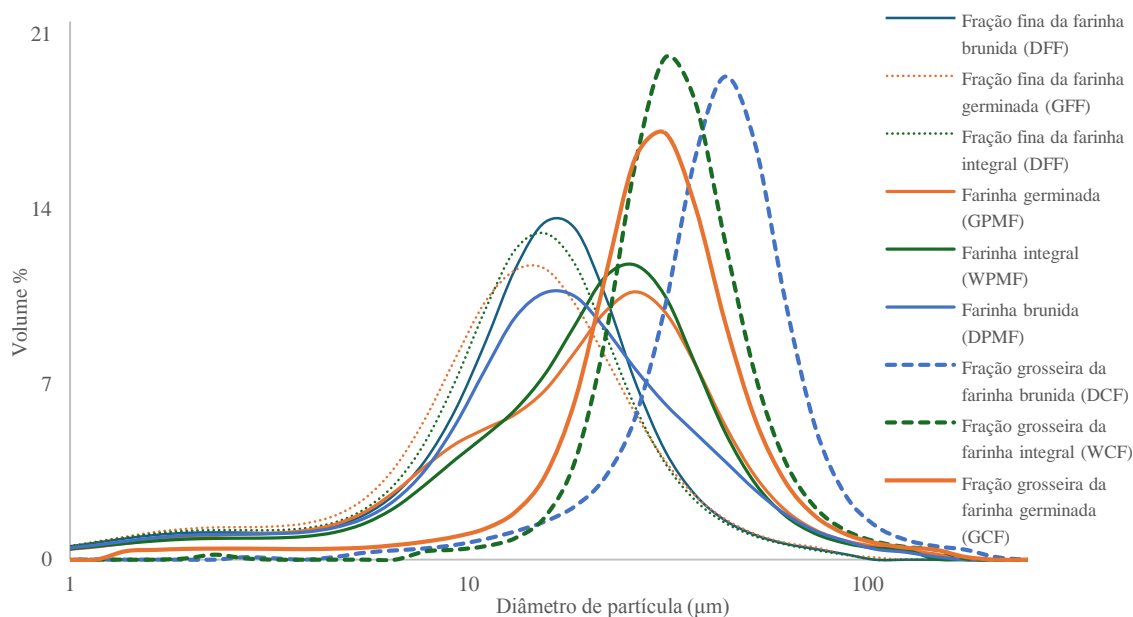


Figura 4: Curvas de distribuição de tamanho partícula das farinhas e frações de milho pérola.

A amplitude da distribuição (indicador da dispersão granulométrica) aumenta nas farinhas e nas frações finas em relação às grosseiras, sendo especialmente alta nas farinhas (até 2,78). Isso pode refletir a mistura de partículas remanescentes do corte da fração grosseira e da fração fina na farinha, indicando uma menor seletividade nesta etapa. Já as farinhas finas, apesar de mais uniformes em tamanho absoluto, ainda apresentam certa heterogeneidade (ex.: GFF = 2,39).

Assim, a aeroclassificação leva à obtenção de frações com distribuição granulométrica mais homogênea em relação à farinha moída original. Os resultados apontam para uma redução gradual do tamanho de partícula, pois os valores de D10, D50, D90, D95, D3,2 e D4,3 diminuem consistentemente das frações grosseiras (DCF, WCF, GCF) para as farinhas (DPMF, WPMF, GPMF) e, por fim, para as frações finas (DFF, WFF, GFF).

Isto pode ser confirmado pelos resultados numéricos exibidos na Tabela 2, onde para as amostras germinadas, por exemplo: D50: GCF = 27,17 μm \rightarrow GPMF = 15,81 μm \rightarrow GFF = 12,57 μm e D90: GCF = 47,88 μm \rightarrow GPMF = 38,19 μm \rightarrow GFF = 26,40 μm . Este padrão comprova que o processo de aeroclassificação foi eficiente na separação. Como esperado devido à natureza dos processamentos aplicados, a fração grosseira apresentou os maiores tamanhos de partículas, seguida pela farinha e pela fração fina para todos os pré-tratamentos. O D50 do processo de moagem é maior para WPMF do que GPMF, que por sua vez é maior

do que DPMF. Considerando configurações de moagem iguais, conclui-se que o brunimento dos grãos permitiu a obtenção de uma farinha comparativamente mais fina.

Levando em conta que as fibras e outros componentes da parede celular da camada do pericarpo podem aumentar a dureza do grão (SRUTHI; RAO; RAO, 2021), prejudicando a eficácia da moagem, a suposição anterior parece estar bem fundamentada, uma vez que tanto os grãos integrais quanto os germinados possuem tais componentes, diferentemente dos grãos brunidos que tiveram o pericarpo e o gérmen parcialmente removidos.

A moagem deveria separar ao máximo os grânulos de amido e os corpos proteicos, de modo a facilitar a posterior aeroclassificação, conforme a teoria da máxima sobreposição (PELGROM *et al.*, 2015), na qual foi postulado que as configurações ideais de moagem são alcançadas quando a curva de distribuição de partículas da farinha se sobrepõe à do amido ao máximo, de modo que o tamanho de partícula médio atinja o tamanho do grânulo de amido, garantindo a separação entre amido e proteína. Esta teoria foi usada no presente trabalho como referência para o estabelecimento de parâmetros ideais de moagem. Santos *et al.*, (2022), obtiveram uma curva de distribuição de amido de milho pérola com predominância de 93,58% das partículas até 20 μm .

Entre os pré-tratamentos, a porcentagem de farinha moída na faixa mencionada acima é apresentada na Tabela 1. Os resultados mostram que nenhuma das farinhas atingiu níveis semelhantes de predominância, mas a DPMF apresentou PSD mais próxima quando comparada ao amido. Considerando que todas as farinhas foram produzidas sob as mesmas configurações de moagem, isso pode reforçar que a DPMF é o pré-tratamento mais adequado ao comparar o desempenho da moagem.

Tabela 1: Estimativa percentual de sobreposição das curvas PSD das farinhas e do amido de milho pérola (considerando tamanho máximo do grânulo de amido menor ou igual a 20 μm , conforme Santos *et al.*, 2022).

Percentual de partículas até 20 μm		
WPMF	GPMF	DPMF
46,18%	47,98%	60.62%

WPMF: farinha integral, GPMF: farinha germinada e DPMF: farinha brunida.

Analisando a influência do pré-tratamento no D50 após a aeroclassificação, prevalece a sequência em que o tamanho de partícula das frações diminui na ordem: brunidas, integradas e germinadas.

Isto indica que para ambas as frações (grosseira e fina) a aeroclassificação das farinhas germinadas levou a obtenção de frações com menor tamanho médio de partículas.

A distribuição de partícula D50 da aeroclassificação apresenta comportamento oposto à moagem quanto ao pré-tratamento, o que parece razoável na medida que farinhas com D50 maiores são mais facilmente aeroclassificadas pela maior diferença de tamanho entre as partículas (PELGROM, 2015).

O menor D50 das frações germinadas pode estar relacionado à intensa hidrólise enzimática sobre os grânulos de amido, reduzindo o tamanho das partículas.

Quanto aos demais parâmetros, o diâmetro médio em micrômetros da distribuição de volume (D3,2), que é o centro de gravidade da distribuição, assim como o diâmetro médio ponderado em micrômetros da área superficial (D4,3) diminuem com a redução do D50, enquanto a razão de quebra da parede celular (Φ) e a área superficial específica (SSA) aumentam.

Tais efeitos estão relacionados à força mecânica aplicada, pois moagens mais intensas reduzem o D50 e o volume das partículas. Por outro lado, aumentam o percentual de quebra da parede celular e a área superficial específica. Tais parâmetros influenciam algumas propriedades de superfície, como a capacidade de formação de espuma.

A área superficial específica, por exemplo, aumentou expressivamente com a redução do tamanho de partícula. Nas frações finas, os valores atingem o máximo: GFF = 0,55938 m²/g; WFF = 0,53081 m²/g; DFF = 0,51052 m²/g.

Este parâmetro é diretamente correlacionado com o potencial funcional das farinhas (ex.: absorção de água, solubilidade, digestibilidade), o que destaca a relevância tecnológica das frações finas para formulações com maior reatividade e bioacessibilidade.

Tabela 2: Distribuição de tamanho partícula (PSD), amplitude de distribuição, razão de quebra da parede celular Φ (%) e área superficial específica (m^2/g) das farinhas e das frações de milho pérola.

Amostra	DCF	WCF	GCF	GPMF	WPMF	DPMF	DFF	GFF	WFF
D10 (μm)	21,22	19,43	13,81	5,17	5,87	5,10	4,52	3,84	4,20
D50 (μm)	39,57	30,40	27,17	19,33	19,67	15,81	14,01	12,57	13,06
D90 (μm)	63,98	50,61	47,88	41,23	39,81	38,19	26,84	26,40	25,98
D95 (μm)	77,16	62,05	59,67	52,29	49,88	49,11	33,88	33,82	32,89
D3,2 (μm)	42,38	33,77	30,11	22,29	22,18	19,81	15,59	14,63	14,81
D4,3 (μm)	40,69	32,10	28,63	20,53	20,66	18,30	14,63	13,57	13,88
Amplitude	1,41	1,40	1,69	2,44	2,24	2,78	2,10	2,39	2,20
Razão de quebra da parede celular Φ (%)	58,27%	69,78%	74,76%	88,76%	88,12%	95,04%	97,66%	99,15%	98,71%
Área superficial específica (m^2/g)	0,12681	0,14910	0,22827	0,41221	0,39214	0,44365	0,51052	0,55938	0,53081

DCF: fração grosseira da farinha brunida, WCF: fração grosseira da farinha integral, GCF: fração grosseira da farinha germinada, GPMF: farinha germinada, WPMF: farinha integral, DPMF: farinha brunida, DFF: fração fina da farinha brunida, GFF: fração fina da farinha germinada e WFF: fração fina da farinha integral.

Ao comparar os pré-tratamentos, verifica-se que as amostras provenientes de grãos germinados (GCF, GPMF, GFF) apresentam, em geral, tamanhos médios menores do que as farinhas dos demais tratamentos. Isso pode estar associado à fragmentação da matriz amiloprotéica durante a germinação, facilitando a quebra durante a moagem.

Já as amostras brunidas (DCF, DPMF, DFF) apresenta valores intermediários de tamanho de partícula, mas com maior SSA nas farinhas, o que pode ser atribuído à remoção parcial do pericarpo, reduzindo a resistência ao cisalhamento durante a moagem.

As amostras integrais (WCF, WPMF, WFF) tendem a apresentar partículas um pouco maiores do que as germinadas, mas com amplitude menor, sugerindo uma moagem mais homogênea quando não há alterações estruturais induzidas pelos pré-tratamentos.

5.1.2 Densidade

A densidade das matérias-primas é um parâmetro físico fundamental no processamento de farinhas por aeroclassificação, influenciando diretamente a eficiência da

separação, a qualidade das frações obtidas e o desempenho funcional das farinhas resultantes (PELGROM, 2015). Abaixo segue uma descrição técnico-científica detalhada sobre este parâmetro, seguida da análise dos resultados.

A aeroclassificação é uma técnica de separação física baseada na aplicação de um fluxo de ar controlado sobre partículas secas, permitindo sua classificação em frações de diferentes tamanhos e densidades. Neste processo, a densidade aparente e a densidade real das partículas determinam, em conjunto com o diâmetro e forma, o seu comportamento aerodinâmico, o que influencia sua trajetória e deposição nas diferentes zonas do separador (SCHUTYSER, 2011).

Partículas de menor densidade (menos compactas, com porosidade elevada) tendem a ser mais facilmente carregadas pelo fluxo de ar, sendo direcionadas para as frações finas. Partículas de maior densidade, mais pesadas por unidade de volume, tendem a assentar ou permanecer nas regiões inferiores, sendo classificadas como frações grosseiras. Esse princípio é essencial para a eficiência do processo, pois permite segregar componentes com propriedades funcionais distintas, mesmo quando apresentam tamanhos semelhantes (SKYLAS, 2022).

A densidade das partículas das farinhas está relacionada à sua composição, farinhas ricas em amido, como as frações centrais dos grãos, geralmente apresentam maior densidade, devido à compactação dos grânulos. Componentes ricos em fibras dietéticas, lipídeos e proteínas desnaturadas apresentam menor densidade e maior porosidade, sendo frequentemente direcionados às frações finas. O processo de germinação pode reduzir a densidade das partículas, ao induzir alterações estruturais como a hidrólise parcial e o amolecimento da matriz celular, o que aumenta a porosidade (GUNATHUNGA, 2024).

A densidade interfere no ajuste dos parâmetros operacionais do aeroclassificador, como velocidade e direção do ar, tempo de residência e geometria da câmara. A correta configuração é essencial para garantir eficiência de separação e rendimento por fração. O conhecimento prévio da densidade das matérias-primas permite projetar curvas de separação mais precisas, aumentando o aproveitamento dos componentes com características desejáveis (PELGROM, 2015). Variações na umidade e na granulometria também afetam a densidade aparente e devem ser rigorosamente controladas para evitar perda de eficiência na classificação.

A segregação por densidade permite enriquecer frações com maior teor de amido (maior densidade), ideais para aplicação em produtos extrudados, panificados e massas. Frações de menor densidade, com maior teor de fibras e compostos bioativos são adequadas a produtos funcionais, bebidas e sistemas dispersíveis. Essa diferenciação contribui para o uso racional e direcionado das farinhas, agregando valor a partir de um mesmo material de origem (DE ANGELIS, 2023).

Portanto, o controle e conhecimento da densidade das matérias-primas é crucial para o sucesso da aeroclassificação, influenciando tanto a separação física eficaz quanto o potencial tecnológico e nutricional das frações obtidas. Trata-se de um parâmetro que deve ser considerado com atenção no desenvolvimento de ingredientes funcionais e produtos alimentícios diferenciados a partir de cereais e pseudocereais (DE ANGELIS, 2023). A Tabela 3 apresenta os valores de densidade das amostras de milho pérola.

Tabela 3: Resultados dos ensaios de densidade absoluta, aparente e volumétrica da farinha e das frações de milho pérola. Diferentes letras (a, b, c) indicam que há diferenças estatísticas significativas entre os valores de densidade entre as amostras.

Amostra	WCF	WPMF	GCF	DPMF	DCF	WFF	GPMF	DFF	GFF
Densidade Absoluta (g/cm ³)	1,483 ± 0,004 ^a	1,469 ± 0,010 ^a	1,464 ± 0,001 ^b	1,463 ± 0,0007 ^b	1,461 ± 0,001 ^b	1,459 ± 0,000 ^b	1,450 ± 0,001 ^c	1,444 ± 0,003 ^c	1,444 ± 0,0007 ^c
Densidade aparente (g/cm ³)	0,455 ± 0,000 ^a	0,319 ± 0,012 ^c	0,385 ± 0,0005 ^b	0,385 ± 0,0005 ^b	0,455 ± 0,000 ^a	0,341 ± 0,012 ^d	0,357 ± 0,000 ^c	0,341 ± 0,012 ^d	0,313 ± 0,0005 ^c
Densidade volumétrica (g/m ³)	0,625 ± 0,000 ^a	0,455 ± 0,000 ^c	0,625 ± 0,000 ^a	0,500 ± 0,000 ^b	0,625 ± 0,000 ^a	0,500 ± 0,000 ^b	0,502 ± 0,002 ^b	0,500 ± 0,000 ^b	0,500 ± 0,000 ^b

WCF: fração grosseira da farinha integral, WPMF: farinha integral, GCF: fração grosseira da farinha germinada, DPMF: farinha brunida, DCF: fração grosseira da farinha brunida, WFF: fração fina da farinha integral, GPMF: farinha germinada, DFF: fração fina da farinha brunida e GFF: fração fina da farinha germinada.

Como descrito anteriormente, a densidade é uma propriedade fundamental na formulação e no processamento de ingredientes alimentícios, pois afeta diretamente a embalagem, transporte, fluidez, solubilidade e comportamento em sistemas dispersos. Foram analisadas três formas de densidade:

1. Densidade Absoluta (DA) – g/cm³

A densidade absoluta indica a massa de uma substância por unidade de volume sólido, excluindo os espaços porosos. Os dados revelam:

As frações grosseiras (WCF, GCF, DCF) apresentaram os maiores valores de densidade absoluta ($\sim 1,461$ a $1,483 \text{ g/cm}^3$), indicando maior compacidade estrutural, provavelmente devido à menor fragmentação. As frações finas (WFF, GFF, DFF) apresentaram os menores valores ($\approx 1,444$ a $1,459 \text{ g/cm}^3$), o que pode estar associado à maior área superficial e maior incorporação de ar durante o processamento, reduzindo a massa por volume sólido.

Assim, os resultados de densidade absoluta variam conforme o processamento, onde os valores para a fração grosseira são maiores do que os das farinhas moídas, que por sua vez são maiores do que a fração fina. Posto que a densidade absoluta mede a permeabilidade de um gás pelos espaços entre as partículas da farinha, quanto mais poros e espaços houver, mais gás será necessário e menor será a densidade registrada.

A estrutura dos grânulos de amido é porosa, com proteínas, fibras e outros componentes ligados a eles (PUNIA *et al.*, 2021). A quebra dessas ligações promove a abertura da estrutura, aumentando o número de poros e espaços disponíveis.

Há uma tendência de diminuição da densidade absoluta com a redução da D50. Tal comportamento se baseia nos espaços disponíveis para a permeação do gás, pois menor D50 implica moagem mais intensa e maior percentual de quebra da parede celular, promovendo mais poros e espaços disponíveis entre as partículas.

Avaliando a influência do pré-tratamento, os resultados seguem a sequência integral maior do que brunido, que é maior do que germinado após moagem, acompanhando a redução do D50, exceto para DPMF. Embora o D50 de DPMF seja menor, a intensa hidrólise enzimática quebra os grânulos de amido e torna a GPMF mais porosa, reduzindo a densidade aparente.

Após aeroclassificação, as frações integrais apresentam maior densidade absoluta, não havendo diferenças ($p < 0,05$) entre frações germinadas e brunidas. Tal resultado pode estar associado à presença de componentes do pericarpo, como fibras e polissacarídeos ligados ao amido e proteínas, diminuindo os espaços entre as partículas.

2. Densidade Aparente (DAp) – g/cm^3

Essa métrica inclui os espaços vazios entre partículas, sendo relevante para armazenamento, empacotamento e comportamento de escoamento:

A WCF (fração grosseira integral) e a DCF (fração grosseira brunida) apresentaram os maiores valores ($0,455 \text{ g/cm}^3$), denotando maior empacotamento natural das partículas maiores. As frações finas (WFF, DFF, GFF) e as farinhas (WPMF, GPMF) apresentaram os menores valores, com destaque para a GFF ($0,313 \text{ g/cm}^3$) e WPMF ($0,319 \text{ g/cm}^3$), indicando baixa compactação e maior porosidade entre partículas menores.

Portanto, a densidade aparente varia conforme o processamento na mesma ordem, onde a fração grosseira é maior do que a farinha moída, que por sua vez é maior do que a fração fina, conforme redução do D50. A única exceção é WFF maior do que WPMF. Dado que WPMF possui D50 e densidade absoluta maiores, há menos espaços disponíveis entre as partículas para compactação em relação a WFF. Logo, WFF ocupa um volume menor em relação a WPMF, justificando a maior densidade aparente.

Avaliando a influência do pré-tratamento, os resultados de densidade aparente seguem a sequência brunido maior do que germinado maior do que integral após moagem, aparentemente devido maior à capacidade de compactação do DPMF, com menor D50. Após aeroclassificação, a ordem passa a ser brunido maior do que integral maior do que germinado seguindo a redução no D50.

3. Densidade Volumétrica (DV) – g/m^3

Este valor representa a densidade da amostra em condições de empacotamento padrão, sendo relevante para dimensionamento de silos, misturadores e sistemas de dosagem:

A densidade volumétrica foi mais elevada (625 kg/m^3) nas frações grosseiras (WCF, GCF, DCF), que mantêm maior granulometria e compactação. As farinhas e frações finas apresentaram menor densidade volumétrica ($500\text{--}502 \text{ g/m}^3$), com exceção da WPMF (455 g/m^3), refletindo sua menor empacotabilidade.

Deste modo, o processamento influencia a densidade volumétrica de maneira análoga à densidade aparente. Quanto à influência do pré-tratamento, não há diferença ($p < 0,05$) entre as farinhas brunidas e germinadas. A farinha integral possui menor densidade volumétrica devido à sua baixa capacidade de compactação, conforme discutido anteriormente. Não houve diferença ($p < 0,05$) de densidade volumétrica entre os pré-tratamentos após aeroclassificação.

Tais resultados estão de acordo com a natureza do processo de aeroclassificação, que separa a farinha em duas frações com base na densidade e no tamanho das partículas. Portanto, é esperado que as frações grosseiras tenham maior densidade, seguidas das farinhas moídas e das frações finas. Contudo, é importante considerar as mudanças ocorridas na densidade aparente mediante os diferentes pré-tratamentos aplicados, pois ficou constatado que estes melhoram a capacidade de compactação da farinha e das frações de milheto pérola.

5.2 Caracterização morfológica das farinhas

5.2.1 Microscopia ótica

As imagens exibidas na Figura 5 foram obtidas sob luz polarizada para verificar a integridade dos grânulos de amido pela presença da cruz de Malta, formada devido ao efeito de birrefringência causado pela estrutura cristalina. Grande parte dos grânulos de amido polarizados aparecem organizados em aglomerados maiores (Figura 5, E2), o que denota que não foram totalmente separados durante a moagem. Tal organização já foi reportada previamente como uma matriz de componentes, proteínas, lipídios e fibras, onde os grânulos de amido estão incorporados (BHATTARAI *et al.*, 2018; ROONEY; MILLAR; MARTIN, 1981; BACIC; STONE, 1981).

Todos os níveis de processamento exibem esses aglomerados, diminuindo em quantidade à medida que o D50 da amostra diminui. Assim, as frações grosseiras (Figura 5, D1:integral, E1: brunida e F1: germinada) têm maiores quantidades de aglomerados, seguidas pelas farinhas moídas (Figura 5, A1:integral, B1: brunida e C1: germinada) e frações finas (Figura 5, G1:integral, H1: brunida e I1: germinada). A observação é esperada, uma vez que essas estruturas são densas e pesadas, o que favorece seu acúmulo na fração grosseira durante a aeroclassificação.

A presença de aglomerados de grânulos de amido na fração fina, por outro lado, é uma indicação de configurações insuficientes de aeroclassificação. Uma vez que o grânulo de amido tem maior tamanho, massa molecular e densidade quando comparado a outros componentes, como proteínas e fibras, ele é mais suscetível à força centrífuga e menos capaz de ser arrastado pelo fluxo de ar para as palhetas do disco classificador rotativo. Portanto, a

presença de amido nas frações finas sugere que aglomerados menores de grânulos de amido podem ter sido arrastados pelo alto fluxo de ar e foram capazes de entrar no disco classificador devido à sua baixa velocidade de rotação, o que permitiu que partículas maiores passassem para as frações finas.

As imagens também mostram que as amostras germinadas de todos os níveis de processamento apresentaram uma quantidade visivelmente reduzida de cruces de Malta (Figura 5, C1: farinha da moagem, F1: fração grosseira e I1: fração fina), o que denota perda de birrefringência pelos grânulos de amido. Tal fato pode ser explicado pela hidrólise dos grânulos de amido em carboidratos menores pela ação enzimática, causando danos às estruturas cristalinas e perda de birrefringência.

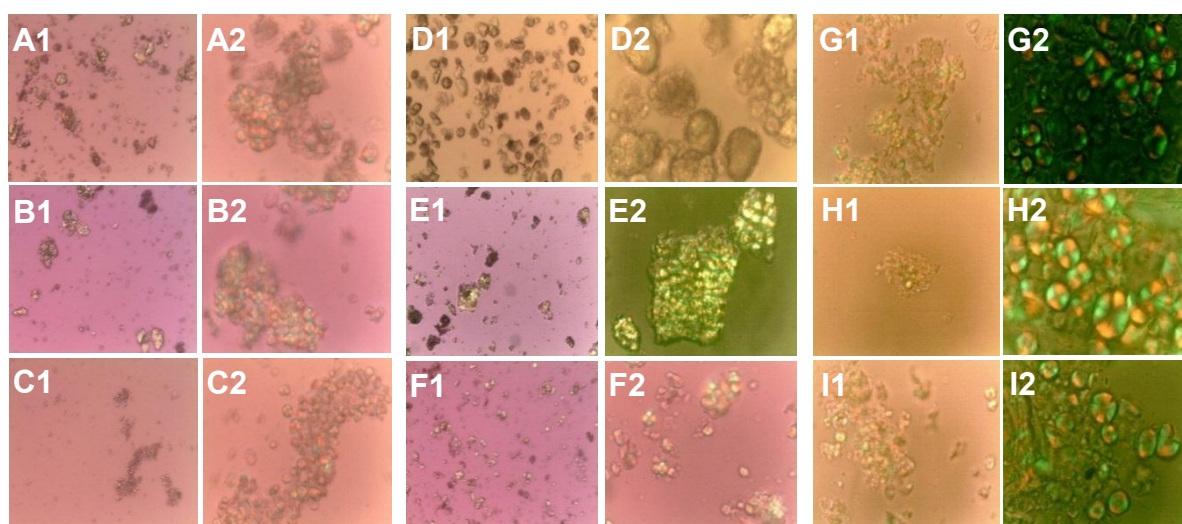


Figura 5: Vista das farinhas e frações de milho pérola ao microscópio ótico sob luz polarizada. A1: WPMF (100x), A2: WPMF (400x), B1: DPMF (100x), B2: DPMF (400x), C1: GPMF (100x), C2: GPMF (400x), D1: WCF (100x), D2: WCF (400x), E1: DCF (100x), E2: DCF (400x), F1: GCF (100x), F2: GCF (400x), G1: WFF (400x), G2: WFF (1000x), H1: DFF (400x), H2: DFF (1000x), I1: GFF (400x), I2: GFF (1000x)

WPMF: farinha integral, DPMF: farinha brunida, GPMF: farinha germinada, WCF: fração grosseira da farinha integral, DCF: fração grosseira da farinha brunida, GCF: fração grosseira da farinha germinada, WFF: fração fina da farinha integral, DFF: fração fina da farinha brunida e GFF: fração fina da farinha germinada.

5.2.2 Microscopia eletrônica de varredura

As imagens capturadas no microscópio eletrônico de varredura estão ilustradas (Figura 6) nas quais se pode notar partículas de diferentes formas, desde esféricas (indicadas pela seta vermelha) a poligonais ou com geometria irregular (indicadas pela seta azul). Pesquisas anteriores associaram as partículas de formato poligonal ao endosperma córneo com estrutura cristalina e as formas esféricas ao endosperma farináceo com estrutura frouxa e compactada (SRICHUWONG *et al.*, 2017).

Outra característica identificada nas imagens de MEV é a morfologia das amostras germinadas, com a presença de mais poros, orifícios e grânulos de amido aparentemente quebrados em comparação com as amostras integrais e brunidas (destacados no retângulo amarelo). Essas características já foram relatadas anteriormente na literatura após a germinação do Milheto Pérola (ADEBIYI *et al.*, 2016; SRICHUWONG *et al.*, 2017).

Como mencionado, isso pode ser devido à hidrólise enzimática durante a germinação. Krishna & Thayumanavan (1998), postulam que as amilases hidrolisam os grânulos de amido da região do hilo para o exterior. Existem ainda algumas estruturas fibrosas (elipse laranja), em amostras integrais e germinadas, que podem ser partes da camada do pericarpo.

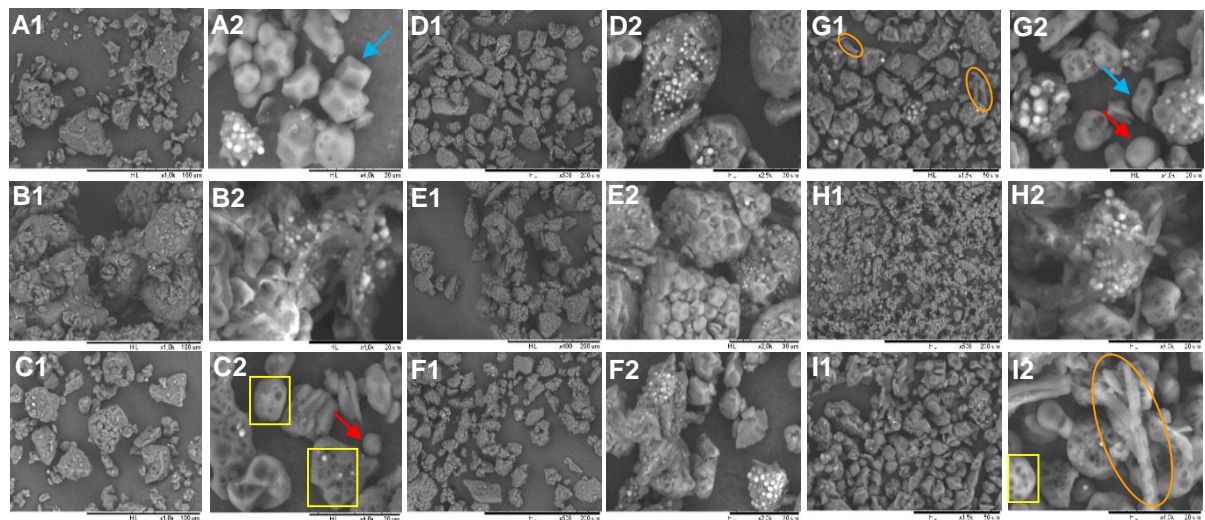


Figura 6: Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) das farinhas e frações de milheto pérola. A1: WPMF (x1,0k), A2: WPMF (x4,0k), B1: DPMF (x1,0k), B2: DPMF (x4,0k), C1: GPMF (x1,0k), C2: GPMF (x4,0k), D1: WCF (x500), D2: WCF (x2,5k), E1: DCF (x400), E2: DCF (x2,0k), F1: GCF (x500), F2: GCF (x2,0k), G1: WFF (x1,5k), G2: WFF (x4,0k), H1: DFF (x500), H2: DFF (x4,0k), I1: GFF (x1,5k), I2: GFF (x4,0k).

WPMF: farinha integral, DPMF: farinha brunida, GPMF: farinha germinada, WCF: fração grosseira da farinha integral, DCF: fração grosseira da farinha brunida, GCF: fração grosseira da farinha germinada, WFF: fração fina da farinha integral, DFF: fração fina da farinha brunida e GFF: fração fina da farinha germinada.

5.3 Caracterização química

5.3.1 Composição centesimal

Os resultados de composição centesimal das diferentes amostras de milho pérola estudadas são exibidos na Tabela 4.

Tabela 4: Composição centesimal das farinhas e frações de Milho Pérola.

Amostra	Amido (%)	Proteína (%)	Umidade (%)	Lipídeos (%)	Cinzas (%)
GCF	60,38 ± 3,85 ^d	10,69 ± 0,00 ^c	6.54 ± 0.28 ^d	4.92 ± 0,08 ^a	1,47 ± 0,04 ^{abc}
WCF	64,29 ± 0,70 ^c	10,56 ± 0,00 ^c	6.86 ± 0.24 ^{cd}	4.62 ± 0,06 ^a	1,34 ± 0,04 ^{ab}
DPMF	69,67 ± 0,40 ^b	12,38 ± 0,090 ^a	7.43 ± 0.31 ^b	4,62 ± 0,40 ^a	1,42 ± 0,01 ^{abc}
DCF	72,90 ± 1,22 ^a	11,00 ± 0,00 ^b	6.46 ± 0.28 ^d	4,33 ± 0,18 ^a	1,19 ± 0,06 ^a
DFF	66,10 ± 0,64 ^c	12,28 ± 0,04 ^a	7.10 ± 0.26 ^{bc}	3,95 ± 0,13 ^a	1,62 ± 0,01 ^c
GPMF	64,94 ± 0,61 ^c	10,66 ± 0,13 ^c	8.68 ± 0.08 ^a	1,84 ± 0,08 ^b	1,39 ± 0,03 ^{ab}
GFF	58,52 ± 3,97 ^d	10,50 ± 0,09 ^c	5.86 ± 0.05 ^e	1,62 ± 0,24 ^{bc}	1,48 ± 0,01 ^{abc}
WFF	63,49 ± 1,86 ^c	10,56 ± 0,27 ^c	6.72 ± 0.15 ^{cd}	1,40 ± 0,32 ^{bc}	1,50 ± 0,06 ^{bc}
WPMF	64,29 ± 0,49 ^c	10,56 ± 0,00 ^c	5.64 ± 0.27 ^e	0,72 ± 0,01 ^c	1,44 ± 0,01 ^{abc}

GCF: fração grosseira da farinha germinada, WCF: fração grosseira da farinha integral, DPMF: farinha brunida, DCF: fração grosseira da farinha brunida, DFF: fração fina da farinha brunida, GPMF: farinha germinada, GFF: fração fina da farinha germinada, WFF: fração fina da farinha integral e WPMF: farinha integral.

A seguir, apresenta-se a uma análise da composição centesimal das farinhas de milho pérola submetidas a diferentes pré-tratamentos (controle, germinação e brunimento) e fracionadas por meio da moagem e aeroclassificação. Os resultados de composição centesimal das farinhas e frações, exibidos na Tabela 4, mostram que houve diferença ($p < 0,05$) no teor de amido para DCF, com o maior teor e para GCF e GFF com os menores teores. Dentre as demais amostras não houve diferença ($p < 0,05$).

Esses resultados mostram que a moagem mais intensa das amostras brunidas promoveu maior separação entre componentes, resultando em maior teor de amido na fração grosseira. Além disso, houve redução no teor de amido das amostras germinadas, o que possivelmente está relacionado com a hidrólise enzimática do amido durante a germinação.

Avaliando a influência do processamento, a sequência de redução no teor de amido segue a ordem fração grosseira maior do que farinha moída, a qual é maior do que fração fina, sendo a única exceção GPMF, que é maior do que GCF. Dada a natureza do processo de aeroclassificação, é esperado que os grânulos de amido estejam em maior quantidade na fração grosseira, por terem maior tamanho e densidade.

Partindo do mesmo raciocínio, é esperado que a fração fina tenha menor teor de amido em relação à fração grosseira e à farinha moída original. A exceção pode estar relacionada à quebra dos grânulos de amido durante o processo de germinação, resultando em perda de eficiência de aeroclassificação e ocasionando maior teor de amido na farinha.

Quanto à influência do pré-tratamento, esta segue a ordem brunido maior do que integral maior do que germinado, com a única exceção sendo GPMF maior do que WPMF. Tal resultado pode ser justificado pelas hipóteses já discutidas em relação ao maior grau de moagem das amostras brunidas e aos efeitos da germinação nos grânulos de amido e na eficiência da aeroclassificação.

Em relação ao teor de proteína, não houve diferença ($p < 0,05$) entre a farinha e as frações para o mesmo pré-tratamento, o que significa que o processamento não exerceu um papel significativo neste contexto. A única exceção foi no brunimento, onde farinha e finos tiveram níveis maiores em relação à fração grosseira.

Comparando os pré-tratamentos, o brunimento retornou níveis mais altos de proteína na farinha e nas frações finas. Isso sugere que a remoção da camada do pericarpo e de parte do gérmen, além de facilitar a moagem conforme evidenciado nos resultados de PSD, também melhora o desprendimento entre corpos proteicos e grânulos de amido.

A fração grosseira brunida foi a única entre os pré-tratamentos que diferiu ($p < 0,05$) da farinha e da fração fina, apresentando menor teor de proteína. Isso também é uma evidência de que este pré-tratamento foi o mais adequado para moagem e aeroclassificação entre os três avaliados quando a concentração de proteína é desejada no processo.

A farinha e as frações integrais e germinadas apresentaram níveis semelhantes ($p < 0,05$) de proteína, indicando que esses pré-tratamentos precisam de configurações de processo aprimoradas para concentrar proteína quando comparados às amostras brunidas.

O teor de umidade é variável, pois não apresenta uma tendência clara considerando tanto o pré-tratamento quanto o processamento. Para as amostras brunidas, por exemplo, há maior teor de umidade na farinha e na fração fina em relação à fração grosseira.

O teor de umidade difere ($p < 0,05$) entre as amostras germinadas, sendo maior na farinha e menor na fração fina. Já para as amostras integrais, a umidade não difere ($p < 0,05$) entre as frações aeroclassificadas, mas ambas têm maior teor em relação à farinha. Durante o armazenamento de farinhas, a tendência de ocorrência de reações químicas, enzimáticas e o crescimento de microrganismos diminui com a redução da umidade.

O pré-tratamento influencia o teor de lipídeos, que não difere ($p < 0,05$) entre as farinhas integral e germinada, mas é menor nas farinhas brunidas, pois o brunimento extrai parte do gérmen dos grãos, que contém lipídeos. É notável o fato de que a germinação não alterou significativamente o teor de lipídeos em relação à farinha integral.

Após a aeroclassificação não há diferença ($p < 0,05$) no teor de lipídeos entre as frações aeroclassificadas dos diferentes pré-tratamentos, contudo os valores da fração grosseira são maiores do que as farinhas originais e as frações finas possuem os menores teores dentre os três níveis de processamento.

Tal prevalência nas frações grosseiras pode ser atribuída à própria natureza do processo de aeroclassificação, pois os lipídeos podem atuar como camada adesiva entre partículas, formando aglomerados de maior tamanho. O oposto é válido para justificar o baixo teor nas frações finas. Farinhas com teores lipídicos menores estão menos sujeitas à oxidação lipídica, tendo maior estabilidade durante o armazenamento.

Quanto ao teor de cinzas, não há influência clara do pré-tratamento ou nível de processamento. A única amostra que apresenta diferença ($p < 0,05$) é a fração fina brunida, sendo necessário maior nível de investigação em pesquisas futuras para elucidação.

5.4 Caracterização tecnofuncional

5.4.1 Determinação do grau de modificação do amido

5.4.1.1 Viscosidade de pasta

A temperatura de pasta (Tp) é muito similar entre as amostras (Figura 7), considerando tanto o processamento quanto o pré-tratamento. O perfil de formação de pasta também é similar, mas varia com o tamanho da partícula. As viscosidades de pico (PV) diminuem na ordem na qual as frações grossas têm PV maior do que as farinhas moídas, que por sua vez é maior do que o das frações finas. Ao avaliar o pré-tratamento, a disposição é brunido maior do que integral, que é maior do que o germinado.

Tal comportamento pode estar associado à quantidade, o tamanho e a integridade dos grânulos de amido em cada fração, pois quanto maior a quantidade e o D50, mais os grânulos podem absorver água e inchar se estiverem íntegros. Logo, a quebra dos grânulos de amido por ação enzimática pode justificar a menor PV de amostras germinadas.

A diferença entre os pré-tratamentos brunido e integral pode estar relacionada aos componentes da camada do pericarpo, como fibras e proteínas, que competem pela água, diminuindo a capacidade de hidratação e inchamento, exigindo maior temperatura de pasta. Estudos anteriores concluíram que o alto teor de proteína e fibra leva a interações fibra-amido e amido-proteína que dificultam os arranjos estruturais de amilose e amilopectina, diminuindo a taxa de hidratação do amido (HENSHAW *et al.*, 1996).

Os valores de quebra de viscosidade (BV) seguem a mesma tendência da PV tanto para as condições de pré-tratamento quanto de processamento. O rompimento dos grânulos de amido por ação enzimática durante a germinação, é a provável causa dos valores de BV mais baixos, uma vez que os grânulos de amido já quebrados não conseguem inchar na mesma extensão que os amidos presentes nas farinhas de grãos integrais e brunidos.

A viscosidade máxima após o resfriamento apresenta uma característica particular entre as amostras no presente trabalho devido à presença de um pico durante o resfriamento, também denominada de viscosidade de retrogradação, atribuída à presença de moléculas de amilose que se reagruparam formando complexos e, assim, aumentaram a viscosidade. Tal

comportamento foi maior nas frações grosseiras e menos intenso entre as farinhas moídas e as frações finas.

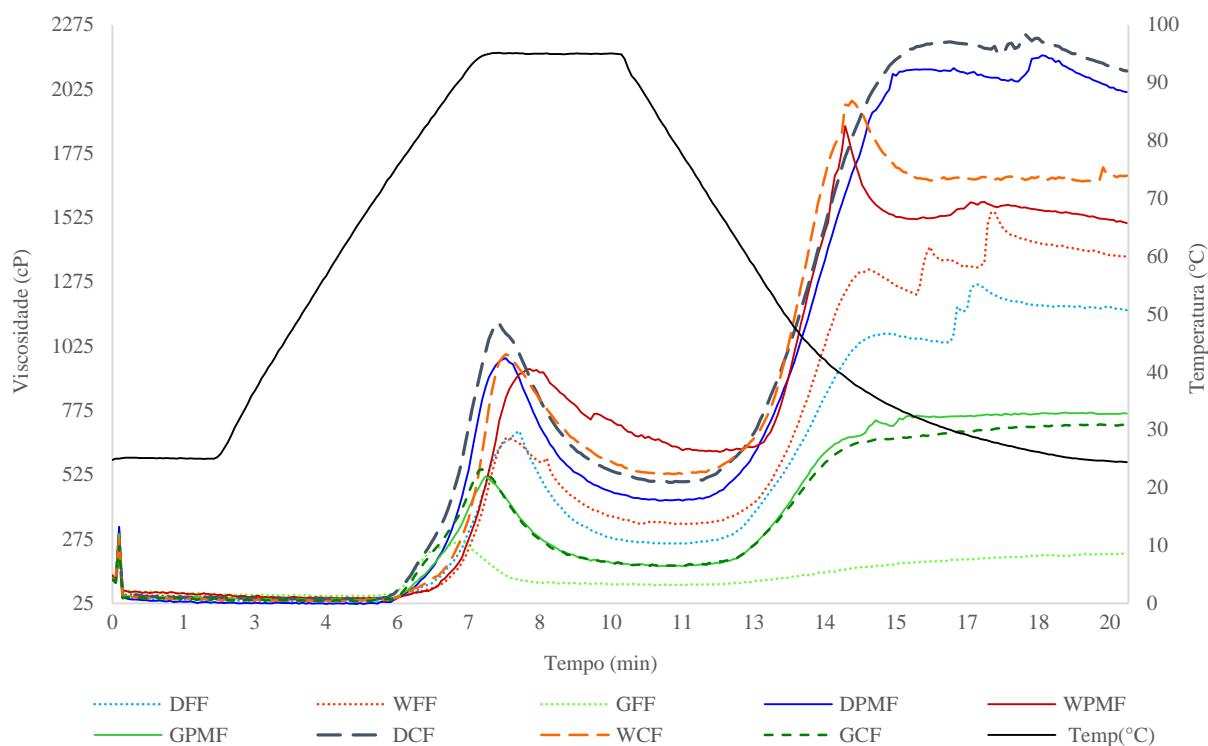


Figura 7: Curvas de viscosidade de pasta das farinhas e frações do milho pérola.

DFF: fração fina da farinha brunida, GPMF: farinha germinada, WFF: fração fina da farinha integral, DCF: fração grosseira da farinha brunida, GFF: fração fina da farinha germinada, WCF: fração grosseira da farinha integral, DPMF: farinha brunida, GCF: fração grosseira da farinha germinada e WPMF: farinha integral.

A presença de um pico durante o resfriamento também foi relatada em pesquisas anteriores com amido de milho pérola isolado (SANTOS *et al.*, 2022), como uma perturbação do fluxo de viscosidade após 15 min de teste, atribuída à formação intermitente de emaranhados de moléculas de amilose devido ao cisalhamento constante, dificultando a formação de complexos entre amilose e outras macromoléculas residuais, como lipídios e proteínas.

Os picos mostram um leve aumento na viscosidade sob cisalhamento constante durante o resfriamento, seguido por uma redução e estabilização súbitas. Essa característica

pode estar relacionada à faixa de tamanho de partícula reduzida das amostras, ao conteúdo, tamanho e integridade dos grânulos de amido.

Essa hipótese é sustentada pelo fato de que as frações grosseiras, com maior teor de amido e maior D50, apresentam os picos mais expressivos, seguidas pelas farinhas moídas e frações finas, com menor concentração de amido e D50. Não há pico de resfriamento para GCF, por exemplo, devido ao menor teor e integridade do amido para esta fração, uma vez que a germinação desestrutura os grânulos de amido e dificulta a retrogradação.

A retrogradação (*setback*) também segue a mesma tendência, exceto para WFF, que possui o maior valor entre as frações finas. Isso indica que a WFF possui melhor retrogradação do que as outras frações finas, o que pode estar relacionado à presença de componentes da camada do pericarpo na WFF, os quais podem ter facilitado a reorganização estrutural formando complexos com o amido, conforme mencionado anteriormente. Alta retrogradação é desejada quando a aplicação exige alta força de gel associada a alta viscosidade (SANTOS *et al.*, 2022).

A redução da viscosidade causada pela germinação foi previamente relatada por outros pesquisadores (GRIFFITH; CASTELL-PEREZ, 1998; MALLESHI, DAODU, CHANDRASEKHAR, 1989; MOSHA; SVANBERG, 1990). Isto sugere que farinhas germinadas podem ser usadas para o desenvolvimento de mingaus e bebidas, especialmente quando fórmulas nutricionalmente enriquecidas estão em vista, uma vez que viscosidades mais baixas facilitam o ajuste da concentração da farinha (ALEXANDER, 1983; MOSHA; SVANBERG, 1990).

As viscosidades finais seguem a mesma tendência relatada para outros parâmetros. Alta PV e FV já foram associadas ao teor de amido anteriormente (SUMMER *et al.*, 1985).

5.4.1.2 Propriedade térmica

A Tabela 5 contém os dados estimados de calorimetria diferencial de varredura (DSC) das amostras de milho pérola, apresentando os valores médios de T_o (°C): temperatura de início da gelatinização; T_p (°C): temperatura de pico; T_f (°C): temperatura final; ΔH (J/g): entalpia da transição.

A análise térmica realizada no calorímetro de varredura diferencial ou DSC foi usada para determinar o impacto da moagem e da aeroclassificação sobre o amido. Dessa forma, em excesso de água a fusão do amido pode ser observada, bem como algum dano físico sobre a estrutura granular ou integridade do grânulo de amido, causado ou não pela moagem. Os parâmetros analisados — temperatura de início (T_o), temperatura de pico (T_p), temperatura final (T_f) e entalpia de transição (ΔH) — refletem as alterações estruturais no amido, particularmente relacionadas à perda da cristalinidade resultante da organização das moléculas ramificadas da amilopectina.

1. Farinhas (A: brunido, B: integral, C: germinado)

As farinhas apresentaram perfis típicos de gelatinização do amido, com valores de T_p variando entre 72,0 e 75,0°C, e ΔH moderada em comparação a outros resultados da literatura (SANTOS, 2022). A farinha germinada (C) demonstrou uma redução nos valores de ΔH , sugerindo a parcial degradação da estrutura cristalina do amido devido à atividade enzimática induzida pelo processo de germinação. Tal efeito é consistente com a literatura, onde a germinação provoca hidrólise parcial do amido e proteínas, facilitando a gelatinização (BHAVADHARANI; GURUMOORTHY, 2025).

2. Frações Grosseiras (D, E, F)

As frações grosseiras apresentaram maiores valores de entalpia de transição (ΔH), indicando maior teor de amido com estrutura cristalina preservada. Essa observação é especialmente notável nas amostras D (brunido) e E (integral), com valores de ΔH superiores às frações finas, refletindo a concentração de grânulos de amido maiores e menos danificados pelo processo de moagem e classificação. Já a fração F (germinado) novamente mostrou ΔH mais baixo, corroborando o impacto da germinação.

3. Frações Finas (G, H, I)

As frações finas apresentaram valores de T_p ligeiramente mais baixos e entalpias significativamente menores, particularmente na amostra I (germinado). Isso sugere que essas frações podem ter sido mais enriquecidas em componentes não amiláceos como fibras solúveis, proteínas desnaturadas e compostos fenólicos, os quais interferem na organização cristalina do amido. Esses dados também apontam para a maior suscetibilidade térmica dessas frações, possivelmente associada à maior área superficial e menor tamanho de partícula (TANG; WATANABE; MITSUNAGA, 2002; HUANG *et al.*, 2022).

O efeito combinado da germinação e da aeroclassificação evidencia-se na alteração da estabilidade térmica do amido. A germinação reduziu a energia necessária para a transição gelatinosa (menor ΔH), enquanto a aeroclassificação separou frações com diferentes perfis térmicos. As frações grosseiras concentraram mais amido nativo, enquanto as finas retiveram materiais estruturais menos organizados termicamente.

Essas diferenças no comportamento térmico são relevantes para aplicações industriais. Farinhas com maior ΔH (como as grosseiras) podem ser indicadas para formulações que exigem maior resistência térmica ou textura firme, como snacks extrudados. Por outro lado, as frações finas, com menor ΔH , são promissoras para produtos que requerem rápida gelatinização ou digestibilidade aumentada, como papinhas infantis e bebidas instantâneas (DE ANGELIS *et al.*, 2024).

Tabela 5: Dados médios estimados de DSC para farinhas de milheto pérola.

Amostra	To (°C)	Tp (°C)	Tf (°C)	ΔH (J/g)
DPMF	61,4	73,6	80,5	3,87
WPMF	60,9	73,5	81,4	3,95
GPMF	60,7	72,8	79,9	2,68
DCF	61,5	74,5	82,3	4,36
WCF	61,6	75,1	83,2	4,58
GCF	60,5	73,1	80,1	2,89
DFF	61,3	72,9	80,2	2,74
WFF	60,6	73,2	81,3	3,02
GFF	60,2	71,7	78,8	2,33

DPMF: farinha brunida, WPMF: farinha integral, GPMF: farinha germinada, DCF: fração grosseira da farinha brunida, WCF: fração grosseira da farinha integral, GCF: fração grosseira da farinha germinada, DFF: fração fina da farinha brunida, WFF: fração fina da farinha integral e GFF: fração fina da farinha germinada.

A partir dos dados pode ser constatado que as frações grosseiras brunido e integral (D e E) apresentaram maiores entalpias (ΔH), indicando maior preservação da estrutura cristalina do amido. As menores entalpias nas amostras germinadas, especialmente a fina germinada (I), refletem a provável degradação por enzimas. Por fim, é possível observar pequenas variações nas temperaturas de transição térmica entre as frações, com ligeiro aumento nos valores de Tf nas frações grosseiras.

Devido à composição mista das amostras, não é possível atribuir com precisão as entalpias à gelatinização do amido ou à desnaturação proteica. Não obstante, no presente trabalho as entalpias serão atribuídas à gelatinização do amido devido à sua prevalência na composição centesimal. As entalpias diminuem partindo da fração grosseira, passando pela farinha, que por sua vez é maior do que frações finas.

Uma vez que a quantidade dos grânulos de amido e sua D50 diminuem nesta mesma ordem, os resultados sugerem a redução da entalpia de gelatinização na medida que a quantidade e o tamanho dos grânulos de amido diminuem. Não há uma influência clara do pré-tratamento na entalpia de gelatinização.

Os picos de temperatura para a gelatinização do amido parecem se comportar de outra forma, com a temperatura de pico (T_p) diminuindo na sequência integral maior do que germinado, que é maior do que brunido, de acordo com o pré-tratamento. A única exceção é a fração grosseira, onde a sequência é GCF maior do que WCF, que é maior do que DCF.

Tais resultados podem estar relacionados à presença de macromoléculas do pericarpo e do gérmen, que podem formar complexos com o amido que exigem mais energia para serem quebrados antes da gelatinização do amido, uma vez que as amostras integrais e germinadas podem conter esses componentes em maiores quantidades, respectivamente, do que nas amostras brunidas.

Avaliando a temperatura de pico (T_p) quanto ao processamento, esta é maior para a farinha, seguida pela fração grosseira, que por sua vez é maior do que a fração fina para amostras brunidas. As amostras germinadas seguem a ordem fração grosseira maior do que farinha moída, que é maior do que fração fina. Para as amostras integrais, a sequência é farinha moída maior do que fração fina, a qual é maior do que fração grosseira.

Assim, não há como fazer uma associação sistemática do processamento com a temperatura de pico, dadas as variações observadas entre os diferentes pré-tratamentos. É provável que a mistura de componentes, uma vez que não se trata de frações isoladas de amido ou proteínas, seja um fator determinante para a não linearidade de resultados de T_p entre as amostras. As ligações entre proteínas e amido, ou entre amido e lipídios influenciam o comportamento térmico do amido, pois a demanda de energia é maior para a quebra de tais ligações antes da completa gelatinização do amido.

Ao trabalhar com aeroclassificação de endosperma industrial de cevada, Silventoinen *et al.* (2018), obtiveram T_p decrescente partindo da fração fina, seguida da farinha original e da fração grosseira, sugerindo que a forte ligação dos grânulos de amido menores à matriz proteica atrasa a gelatinização e requer temperaturas mais altas.

Portanto, os resultados sugerem que conforme o tamanho dos grânulos de amido diminui, menor é a entalpia associada à sua gelatinização, independente do pré-tratamento realizado. No entanto, não é possível relacionar a temperatura de pico de gelatinização, dada a complexidade da composição das amostras.

5.4.2 Propriedades de superfície

5.4.2.1 Solubilidade em água

O índice de solubilidade em água (WSI) é um parâmetro funcional que reflete a quantidade de sólidos solúveis liberados por uma farinha em meio aquoso. Este índice está relacionado à degradação do amido e das macromoléculas, como proteínas e fibras solúveis, sendo, portanto, um indicativo indireto do grau de modificação estrutural sofrida pelos constituintes da farinha durante o processamento (ANDERSON; CONWAY; PEPLINSKI, 1970). Os valores de WSI das farinhas e frações de milho pérola são exibidos na Figura 8.

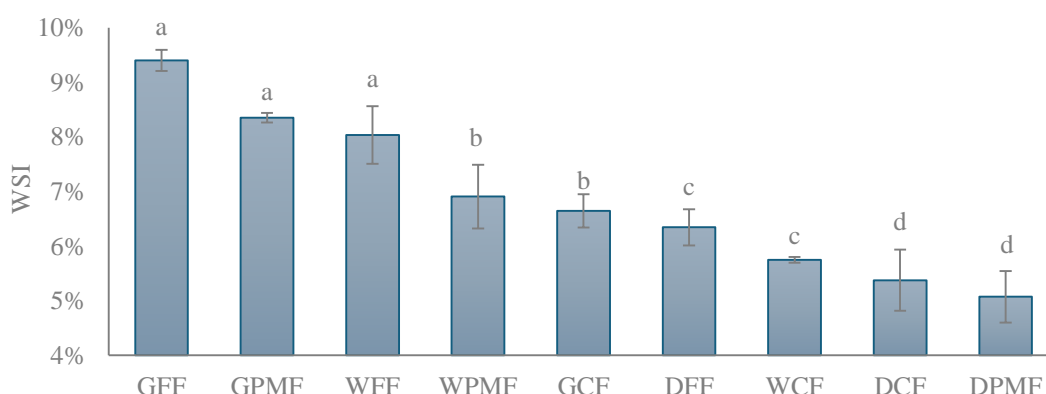


Figura 8: Índice de solubilidade em água (WSI) da farinha e das frações de milho pérola.

GFF: fração fina da farinha germinada, GPMF: farinha germinada, WFF: fração fina da farinha integral, WPMF: farinha integral, GCF: fração grosseira da farinha germinada, DFF: fração fina da farinha brunida, WCF: fração grosseira da farinha integral, DCF: fração grosseira da farinha brunida e DPMF: farinha brunida.

As farinhas apresentaram valores intermediários de WSI. A amostra germinada exibiu um aumento no WSI em relação à farinha integral crua, o que pode ser atribuído à ação de enzimas ativadas durante o processo de germinação, especialmente amilases e proteases. Essas enzimas promovem a hidrólise parcial do amido e das proteínas, originando fragmentos menores e mais solúveis em água, o que justifica o maior índice observado.

Já as frações grosseiras oriundas da aeroclassificação apresentaram os menores valores de WSI, especialmente nas amostras não germinadas. Essa baixa solubilidade pode estar relacionada à maior concentração de grânulos de amido íntegros e de proteínas estruturais com menor grau de desnaturação, além de reduzido teor de fibras solúveis. Tal resultado sugere que o menor grau de processamento térmico e enzimático nestas frações resultou em uma estrutura mais íntegra, menos suscetível à solubilização.

As frações finas, por sua vez, apresentaram os maiores valores de WSI, com destaque para a fração fina germinada. Esse comportamento pode estar associado ao maior grau de degradação estrutural, promovido tanto pelo efeito da germinação quanto pelo acúmulo de componentes de menor peso molecular, como dextrinas, açúcares redutores e peptídeos, que são mais abundantes nestas frações. Além disso, a maior área superficial das partículas finas favorece a interação com a água, contribuindo para a elevação do WSI.

Frações germinadas finas possuem maior suscetibilidade à solubilização, indicando um perfil funcional mais adequado para produtos instantâneos, como bebidas solúveis e sopas em pó. Por outro lado, as frações grosseiras, com menor WSI, podem ser mais adequadas para formulações que exijam estabilidade em água ou liberação gradual de nutrientes (DE ANGELIS *et al.*, 2024).

O WSI é um parâmetro crucial para aplicações em que a dispersão, absorção e digestibilidade são determinantes para a qualidade do produto final. Assim, as diferenças observadas entre as frações demonstram o potencial de uso direcionado de cada componente da farinha de milho: Frações finas germinadas: recomendadas para alimentos instantâneos, bebidas e produtos para nutrição especializada. Frações grosseiras: mais indicadas para pães,

massas e produtos extrusados que requeiram menor solubilidade e maior textura (DE ANGELIS *et al.*, 2024).

Os valores de WSI seguem a ordem germinado maior do que integral, que é maior do que brunido ao avaliar o pré-tratamento. A razão para isso é, presumivelmente, a atividade enzimática que quebra o amido em polissacarídeos menores e solúveis em água nas amostras germinadas, seguida pelas moléculas solúveis do pericarpo nas amostras integrais, aumentando a solubilidade em relação as amostras brunidas.

Ao comparar as taxas de processamento, o WSI segue a ordem fração fina maior do que farinha moída, que é maior do que fração grosseira. O tamanho da partícula é considerado aqui como a principal razão para essa sequência de prevalência, já que quanto menor o tamanho da partícula, maior sua área específica para interação com a água.

Esses resultados estão em concordância com estudos anteriores (DE ANGELIS *et al.*, 2021; SOLAESA *et al.*, 2020), os quais constataram que a composição química contribui para a WSI, especialmente quando há proteínas em elevada concentração. Resultados da literature para WSI de cereais via aeroclassificação reportaram resultados variados, Wang *et al.* (2016), obtiveram 6,23% para farelo de arroz integral, enquanto Solaesa *et al.* (2020), obtiveram resultados na faixa de 8 – 17,5% para quinoa. Comparando a estes resultados, os valores obtidos no presente trabalho (5,1 – 9,4%) revelaram-se majoritariamente baixos, apesar de superarem alguns resultados obtidos para o farelo de arroz integral. Quanto à aplicação, a alta solubilidade favorece a formulação de alimentos que demandam solubilização de proteínas, como substitutos de leite e bebidas proteicas não ácidas (DE ANGELIS *et al.*, 2023). As características tecnológicas associadas ao WSI das amostras, bem como as potenciais aplicações industriais são sumarizadas na Tabela 6.

Tabela 6: Características tecnológicas e possíveis aplicações com base no WSI.

Grupo de Amostras	Faixa de WSI (%)	Características Tecnológicas	Aplicações Industriais Sugeridas
DPMF, DCF	4,8 – 5,4	Baixa solubilidade; alta integridade estrutural; maior proporção de amido intacto	Snacks extrudados crocantes, biscoitos com textura firme, produtos de panificação com estrutura estável
WCF, DFF	5,5 – 6,5	Solubilidade moderada; presença de dextrinas e proteínas parcialmente desnaturadas	Massas instantâneas, cereais matinais, barras energéticas com boa digestibilidade
GCF, WPMF	6,6 – 7,2	Solubilidade elevada; indicativo de degradação amido e fibras; boa dispersibilidade	Bebidas vegetais, papas infantis, sopas instantâneas, substitutos lácteos
WFF, GPMF, GFF	8,0 – 9,2	Altamente solúveis; elevada presença de compostos de baixo peso molecular; pré-digeridos	Alimentos para nutrição clínica, bebidas funcionais, suplementos esportivos, emulsificantes

DPMF: farinha brunida, DCF: fração grosseira da farinha brunida, WCF: fração grosseira da farinha integral, DFF: fração fina da farinha brunida, GCF: fração grosseira da farinha germinada, WPMF: farinha integral, WFF: fração fina da farinha integral, GPMF: farinha germinada e GFF: fração fina da farinha germinada.

5.4.2.2 Capacidade de absorção de água

A capacidade de absorção de água (*water absorption capacity* – WAC) é um parâmetro funcional essencial para caracterizar farinhas e ingredientes alimentares, refletindo sua capacidade de hidratar e reter água durante o processamento. Essa propriedade está intimamente relacionada à composição química, estrutura molecular, granulometria e estado físico das macromoléculas, especialmente do amido e das fibras alimentares (ANDERSON; CONWAY; PEPLINSKI, 1970).

Os valores de WAC das diferentes amostras de milho pérola são apresentados no gráfico de barras da Figura 9. As amostras WFF, GPMF e DPMF apresentaram os menores valores de WAC (próximos de 2,12 g/g), estatisticamente inferiores às demais (grupo "b"). Isso pode indicar, baixo teor de amido funcional ou amido parcialmente degradado. Presença de partículas com estrutura compacta e de baixa porosidade, menor presença de polímeros hidrofílicos como fibras solúveis ou proteínas desnaturadas. Esse comportamento pode estar associado a frações com menor processamento térmico ou enzimático, ou ainda a frações menos afetadas pela germinação, com estrutura mais intacta e menos disponível para absorção de água.

A amostra GFF apresentou valor intermediário de WAC, sem diferença significativa em relação aos grupos "a" e "b", o que sugere uma composição híbrida, com níveis moderados de componentes hidratáveis. A inclusão das letras "ab" pode indicar que esta fração contém mistura de amido funcional e proteínas parcialmente desnaturadas, conferindo capacidade de absorção moderada.

As amostras WPMF, DFF, DCF, WCF e GCF exibiram os maiores valores de WAC (acima de 2,30 g/g), sendo estatisticamente superiores (grupo "a"). Isso pode ser atribuído a maior teor de amido gelatinizado ou pré-cozido, altamente hidratável, à presença de proteínas desnaturadas, que expõem grupos polares e facilitam a retenção de água, à elevada porosidade e maior área superficial das partículas ou à ação enzimática (especialmente nas frações germinadas) que gera polímeros hidrofílicos de menor peso molecular.

GCF e WCF, em especial, mostraram os maiores valores absolutos de WAC, o que sugere que essas frações concentram os componentes com maior afinidade pela água, como fibras solúveis, amido danificado e proteínas desnaturadas, possivelmente oriundas do pericarpo e da ação combinada da germinação e da aeroclassificação.

O WAC é uma propriedade crítica na formulação de alimentos, como produtos extrudados e expandidos, onde alta absorção de água contribui para a expansão e textura porosa, massas alimentícias e panificados, onde o WAC impacta na viscosidade da massa e na retenção de umidade, além de produtos instantâneos ou hidratáveis, como bebidas, cremes e papinhas. As frações com maior WAC são tecnicamente interessantes para essas aplicações, enquanto aquelas com menor WAC podem ser úteis em produtos secos ou com menor teor de umidade (DE ANGELIS *et al.*, 2024).

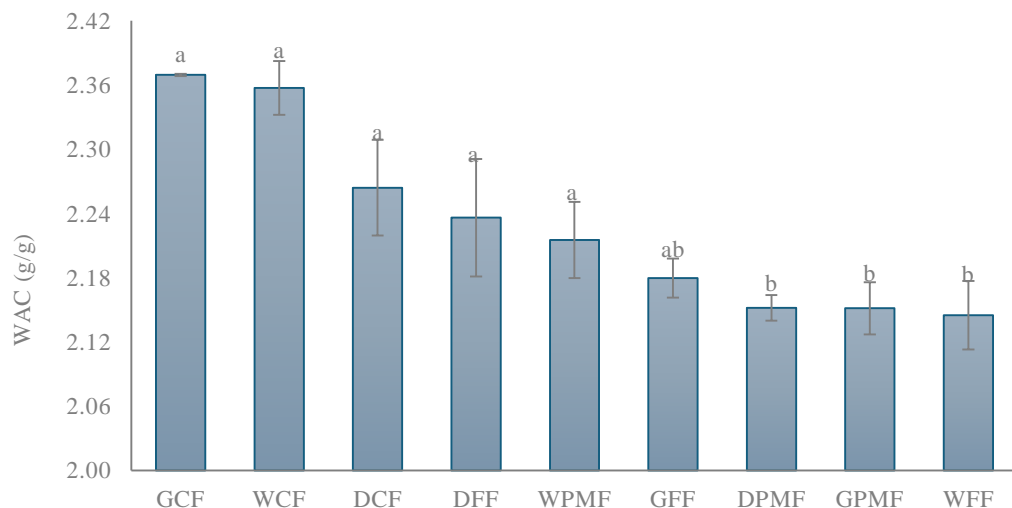


Figura 9: Capacidade de absorção de água (WAC) das farinhas e frações de milho pérola.

GCF: fração grosseira da farinha germinada, WCF: fração grosseira da farinha integral, DCF: fração grosseira da farinha brunida, DFF: fração fina da farinha brunida, WPMF: farinha integral, GFF: fração fina da farinha germinada, DPMF: farinha brunida, GPMF: farinha germinada e WFF: fração fina da farinha integral.

A capacidade de absorção de água (WAC) das amostras, de acordo com o processamento, segue a sequência fração grosseira é maior do que fração fina, que por sua vez é maior do que as farinhas moídas, com exceção de WPMF, a qual é maior do que WFF. A absorção está majoritariamente relacionada à capacidade das moléculas de ligação ao excesso de água após um processo de aquecimento (DU *et al.*, 2014).

Essa capacidade não depende apenas do tamanho da partícula, mas também varia de acordo com a proporção de grupos hidrofílicos na amostra (SOLAESA *et al.*, 2020). Outro aspecto importante a considerar é o teor de amido das amostras, uma vez que o amido possui grande capacidade de ligação com a água.

Uma hipótese para justificar a prevalência da fração grosseira é a presença de componentes moleculares solúveis, como fibras e proteínas, nos aglomerados de grânulos de amido detectados na microscopia, os quais aumentam a interação com água.

A melhor WAC das frações finas em relação às farinhas moídas deve estar relacionada aos menores tamanhos de partícula das primeiras, uma vez que partículas menores possuem maiores áreas específicas para interagir com a água (NASROLLAHZADEH *et al.*, 2022). Ao avaliar a exceção, a maior WAC da WPMF pode ser justificada pelo seu maior teor de amido em comparação à WFF, melhorando a absorção de água.

Considerando o pré-tratamento, cada um prevalece de acordo com o processamento da amostra. Entre as frações grosseiras, por exemplo, a ordem de prevalência para a WAC é germinado maior do que integral, que é maior do que brunido. A prevalência da GCF pode ser devido à grande afinidade pela água dos sacarídeos gerados na hidrólise enzimática do amido durante a germinação, o que ajuda a aumentar a WAC.

Estudos anteriores reportaram que a germinação também promove a quebra de proteínas em peptídeos mais solúveis (ANNOR *et al.*, 2017; ELKHALIFA; BERNHARDT, 2010). A prevalência da WCF sobre DCF pode estar relacionada aos componentes da camada do pericarpo, que possuem alta afinidade por água e aumentam a WAC.

Analisando a fração fina, a ordem é brunido maior do que integral, que é maior do que germinado. Os maiores ($p < 0,05$) teores de amido e proteína da DFF podem explicar a prevalência sobre as outras. O maior teor de amido também pode ser a razão da prevalência da WFF sobre GFF.

Finalmente, entre as farinhas moídas, a sequência é integral maior do que brunido, que é maior do que germinado. Tal tendência pode estar relacionada ao efeito dos polissacarídeos da camada do pericarpo no aumento da WAC na WPMF. Comparando DPMF com GPMF, a prevalência da primeira pode estar relacionada a um maior teor de amido e proteínas.

Os resultados da literatura se mostram similares às frações enriquecidas em proteínas obtidas por fracionamento à seco. Schlangen *et al.*, (2022), obtiveram 2,15, 1,53 e 2,06 g de água/g para feijão mungo, ervilha amarela e feijão caupi, respectivamente. Já Silventoinen *et al.*, (2018), obtiveram 1,23 g de água/g para endosperma industrial de cevada.

Quanto à aplicação, a capacidade de absorção de água é um parâmetro importante para o processamento. Para a elaboração de análogos de carne, por exemplo, esta propriedade influencia na definição da quantidade de água a ser adicionada à mistura sólida para o processo de extrusão úmida. As principais características tecnológicas e suas possíveis aplicações em relação a capacidade de absorção de água estão expostas na Tabela 7.

Tabela 7: Características tecnológicas com base na capacidade de absorção de água (WAC) das amostras.

Código da Amostra	Classificação de WAC	Características Tecnológicas	Aplicações Industriais Sugeridas
WFF	Baixo	Baixa capacidade de retenção de água; estrutura compacta	Misturas secas, panificados firmes
GPMF	Baixo	Baixa hidratação; menor presença de amido funcional	Biscoitos secos, massas laminadas
DPMF	Baixo	Pouco inchamento; possível presença de partículas inteiras	Produtos com baixa umidade
GFF	Intermediário	Capacidade de hidratação moderada; composição híbrida	Pães integrais, massas enriquecidas
WPMF	Alto	Boa retenção de água; proteínas e amido funcional	Produtos panificados hidratados, snacks
DFF	Alto	Alto potencial de hidratação; presença de amido danificado	Snacks extrudados, sopas instantâneas
DCF	Alto	Rápida hidratação; ideal para extrusão ou pães macios	Pães aerados, massas extrudadas
WCF	Muito Alto	Excelente absorção; adequado para produtos expandidos	Snacks expandidos, cereais matinais
GCF	Muito Alto	Alta hidratação e viscosidade; ideal para papas e cremes	Alimentos infantis, bebidas cremosas

WFF: fração fina da farinha integral, GPMF: farinha germinada, DPMF: farinha brunida, GFF: fração fina da farinha germinada, WPMF: farinha integral, DFF: fração fina da farinha brunida, DCF: fração grosseira da farinha brunida, WCF: fração grosseira da farinha integral e GCF: fração grosseira da farinha germinada.

5.4.2.3 Capacidade de absorção de óleo

A capacidade de absorção de óleo (OAC) é uma propriedade funcional crítica que indica a habilidade da farinha em reter lipídeos em sua matriz. Esse parâmetro está diretamente relacionado à estrutura física (porosidade, área superficial), composição química (proteínas, fibras, amido danificado) e grau de modificação estrutural da matéria-prima (LIN; HUMBERT; SOSULSKI, 1974). Na Figura 10, apresenta-se o gráfico da capacidade de absorção de óleo.

Dentre os fatores que influenciam a OAC, um dos principais é o teor de proteínas desnaturadas, pois grupos hidrofóbicos expostos se ligam facilmente ao óleo. Outro fator é a granulometria, pois partículas finas com maior área superficial tendem a absorver mais óleo. A presença de fibras insolúveis também influencia, uma vez que suas estruturas porosas retêm lipídeos.

Tratamentos térmicos ou enzimáticos prévios, como a germinação, alteram a estrutura da matriz e a capacidade de retenção de compostos não polares, bem como o baixo teor de amido funcional ou a presença de amido gelatinizado, que contribuem menos para a absorção de óleo (LIN; HUMBERT; SOSULSKI, 1974).

Os resultados descritos no gráfico de OAC representam os valores de OAC (g de óleo absorvido por g de amostra) para as diferentes amostras de milho pérola. A escala varia de ~1,65 g/g a ~2,05 g/g. A interpretação dos grupos estatísticos (letras a, b e c) permite inferir diferenças significativas: Grupo com menor OAC (letra c) – DPMF e WCF. As amostras DPMF e WCF apresentaram os menores valores de absorção de óleo, indicando, presença predominante de amido intacto ou proteínas não desnaturadas, com baixa capacidade de retenção lipídica; menor teor de fibras ou proteínas expostas que contribuam com grupos hidrofóbicos; estrutura mais densa e com menor porosidade superficial. Essas frações são menos indicadas para produtos onde a retenção de óleo é desejada, como hambúrgueres vegetais ou alimentos com textura cremosa e rica em gordura.

Grupo intermediário (letra b) – GPMF, GCF e DCF, essas frações exibiram valores moderados de OAC (~1,75–1,85 g/g), o que indica presença equilibrada entre amido e proteínas parcialmente desnaturadas; nível médio de porosidade e partículas de granulometria mista; provavelmente, maior proporção de casca (fibras insolúveis) no caso de GCF e GPMF.

Estas amostras possuem versatilidade tecnológica e podem ser utilizadas em panificados, bolos ou massas que requeiram equilíbrio entre hidratação e retenção de gordura.

Grupo com maior OAC (letra a) – DFF, WPMF, WFF, GFF, essas frações apresentaram os maiores valores de OAC, especialmente GFF, com valores superiores a 2,0 g/g. Isso sugere alta presença de proteínas desnaturadas e fibras estruturadas, resultantes da germinação e fracionamento; elevada área superficial e porosidade das partículas finas; potencial de formação de estruturas com maior retenção de lipídeos, útil para aplicações que exigem suculência, viscosidade ou untuosidade.

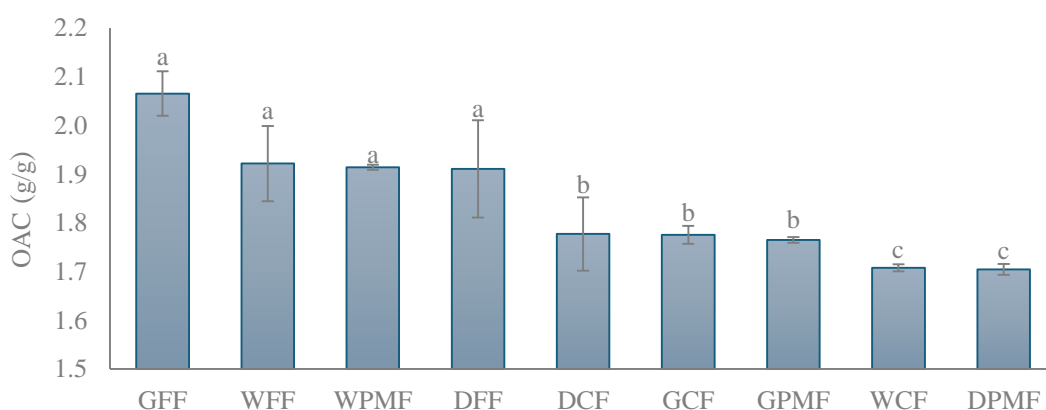


Figura 10: Capacidade de absorção de óleo (OAC) das farinhas e frações de milho pérola.

GFF: fração fina da farinha germinada, WFF: fração fina da farinha integral, WPMF: farinha integral, DFF: fração fina da farinha brunida, DCF: fração grosseira da farinha brunida, GCF: fração grosseira da farinha germinada, GPMF: farinha germinada, WCF: fração grosseira da farinha integral e DPMF: farinha brunida.

Ao avaliar as farinhas oriundas da moagem, a farinha integral possui OAC maior do que a germinada, que por sua vez é maior do que a brunida. O brunimento remove parte do gérmen, reduzindo o teor de gordura no grão, o que significa uma quantidade reduzida de constituintes não polares para interagir com o óleo.

Acredita-se que a germinação consuma parte do teor de gordura no gérmen, uma vez que este contém o embrião que gera as raízes para a nova planta, reduzindo também os constituintes não polares. O grão integral contém todo o teor de gordura do grão, interagindo melhor com o óleo.

Entre as frações grosseiras, a OAC é maior para as amostras brunidas e germinadas, as quais têm valores maiores do que as integrais. Vale ressaltar que não há diferença ($p <$

0,05) entre as amostras brunidas e germinadas. Por fim, entre as frações finas, as amostras germinadas possuem valores maiores do que as integrais, as quais são maiores do que as brunidas. Tais resultados podem estar relacionados também à quantidade de componentes não polares em cada fração.

Uma análise mais aprofundada dos pré-tratamentos revela que entre as amostras integrais, a farinha possui a maior OAC, mas a fração fina possui valor intermediário e a fração grosseira possui o menor valor.

As amostras germinadas apresentam OAC intermediária para a farinha moída e a fração grosseira, mas o maior valor entre as frações finas. As amostras brunidas possuem a menor OAC para a farinha moída e a fração fina, mas a maior para a fração grosseira.

Portanto, cada pré-tratamento prevalece em uma faixa de PSD diferente, com o brunimento apresentando OAC superior para PSD mais alta, o integral sendo intermediário e a germinação prevalecendo entre a faixa de PSD reduzida. Além disso, há uma tendência de aumento da OAC com o teor de amido para a fração grosseira.

Para as frações finas, o oposto é verdadeiro, onde a OAC diminui com o teor de amido. Isso sugere que interações lipídio-amido ocorrem na fração grosseira durante a aeroclassificação, conforme foi sugerido na análise de composição, levando a maiores quantidades de componentes não polares na fração grossa.

Ao avaliar o processamento, o OAC das frações finas é maior do que o das frações grosseiras, que por sua vez é maior do que o das farinhas moídas, exceto para amostras integrais, onde WPMF é maior do que WCF. Assim, a aeroclassificação parece melhorar a propriedade de OAC, o que pode estar relacionado a distribuição de PSD mais uniforme, com menor amplitude de PSD.

A prevalência das frações finas pode estar relacionada à menor PSD, que aumenta a superfície específica para interação com óleo. As frações grosseiras têm maior teor de amido, além do caráter não polar das interações lipídio-amido facilitando a absorção de óleo.

As amostras integrais, por sua vez, parecem se comportar de forma diferente, com a farinha moída apresentando maior OAC em comparação com a fração grossa. Tal fenômeno requer mais pesquisas para elucidação, uma vez que fatores como composição química e tamanho de partícula não parecem ser esclarecedores.

Dentre os resultados da literatura para farinhas obtidas por fracionamento à seco, De Angelis *et al.* (2021), reportaram valores entre 0,45 e 0,53 g de óleo/g para lentilha, grão-de-bico e ervilha, enquanto Silventoinen *et al.* (2018) reportaram 1,13 e 1,0 g de óleo/g para endosperma industrial de cevada e farelo de trigo, respectivamente.

No aspecto tecnológico, a OAC é um parâmetro crucial para o desenvolvimento de alimentos, pois em alimentos para veganos/análogos de carne auxilia na retenção de óleo vegetal, garantindo textura e suculência. Já em alimentos extrudados e snacks, influencia a textura, expansão e aceitação sensorial. Nos produtos de panificação, impacta na maciez e durabilidade. Por fim, nos sistemas em pó e misturas secas contribui para estabilidade e homogeneidade (DE ANGELIS *et al.*, 2024).

A capacidade de absorção de óleo (OAC) das farinhas de milho pérola varia significativamente conforme o pré-tratamento e as condições de processamento, assim como varia com a composição das amostras (proteínas, fibras, amido). O conhecimento e controle desse parâmetro permitem a customização das farinhas para diferentes fins tecnológicos e funcionais na indústria de alimentos. Tal conhecimento também é importante para o dimensionamento do processo produtivo, como por exemplo para definir a quantidade de óleo na formulação de um produto.

As amostras aqui avaliadas podem ser aplicadas na produção de hambúrgueres vegetais e análogos cárneos, que requerem retenção de gordura para textura e palatabilidade. Também podem ser produzidos produtos assados e panificados ricos, como bolos, muffins e cookies. Por outro lado, uma baixa OAC favorece a redução na absorção de óleo em alimentos fritos (VOGELSANG-ODWYER *et al.*, 2020; DE PAIVA GOUVÊA *et al.*, 2023).

A OAC das amostras avaliadas, classificando conforme o valor e descrevendo as principais características tecnológicas associadas estão expostas na Tabela 8.

Tabela 8: Resumo da capacidade de Absorção de Óleo (OAC) das amostras de milho pérola e características tecnológicas associadas.

Amostra	OAC (g/g)	Caracterização tecnológica
DPMF	1,67	Menor retenção de lipídeos; baixa exposição de proteínas
WCF	1,68	Baixo teor de fibras e proteínas desnaturadas
GPMF	1,75	Equilíbrio entre fibras e amido
GCF	1,78	Presença de fibras com porosidade moderada
DCF	1,8	Composição mista, adequada para panificados
DFF	1,91	Alta exposição proteica; retenção eficaz de óleo
WPMF	1,93	Boa porosidade e proteínas desnaturadas
WFF	1,94	Componente funcional para alimentos ricos
GFF	2,04	Maior retenção lipídica; ideal para análogos cárneos

DPMF: farinha brunida, WCF: fração grosseira da farinha integral, GPMF: farinha germinada, GCF: fração grosseira da farinha germinada, DCF: fração grosseira da farinha brunida, DFF: fração fina da farinha brunida, WPMF: farinha integral, WFF: fração fina da farinha integral e GFF: fração fina da farinha germinada.

5.4.2.4 Índice de atividade emulsificante e índice de estabilidade de emulsão

O índice de atividade emulsificante (EAI) representa a capacidade da farinha ou proteína de formar emulsões estáveis óleo/água, indicando a área interfacial que pode ser estabilizada por unidade de proteína ou fração funcional presente. Este índice é altamente influenciado pela presença de proteínas solúveis e/ou desnaturadas, que se adsorvem rapidamente na interface óleo/água. Já o índice de estabilidade da emulsão (ESI) reflete o tempo em que a emulsão formada se mantém sem separar-se. Está relacionado com a capacidade de formação de filmes viscoelásticos ao redor das gotículas de óleo, interações proteína-proteína e proteína-polissacarídeo, que reforçam a estrutura. Também dependem do tamanho e uniformidade das partículas, afetando o colapso ou a coalescência da emulsão. Uma granulometria mais fina favorece a dispersão e o contato com a fase oleosa. O pH e a carga elétrica da fração afetam a solubilidade das macromoléculas (LI *et al.*, 2021). O índice de atividade emulsificante das farinhas está disposto na Figura 11.

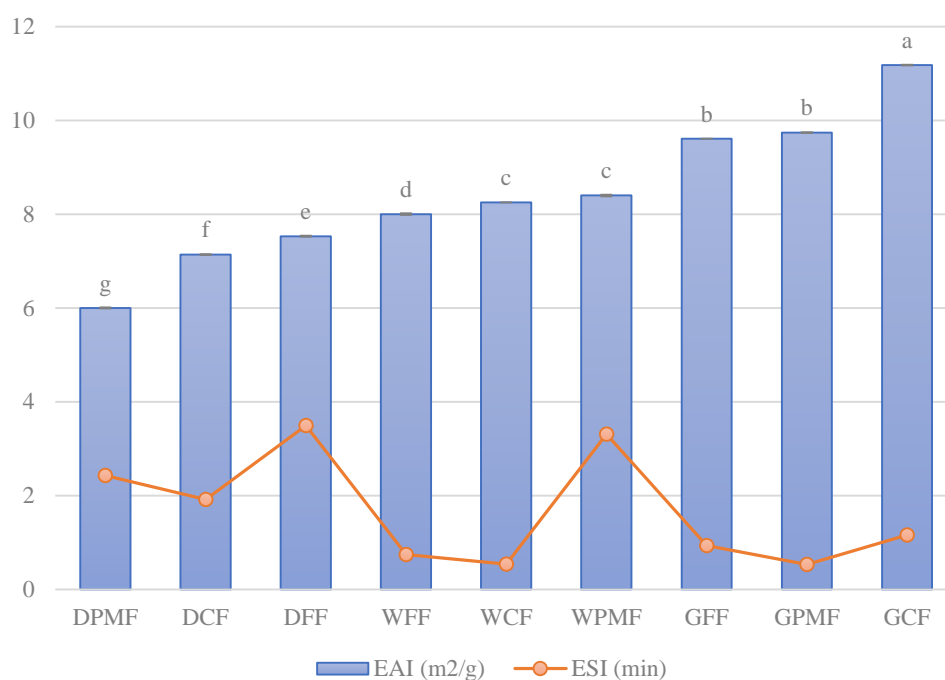


Figura 11: Índice de atividade emulsificante (EAI) e estabilidade da emulsão (ESI) das farinhas e frações de milho de pérola.

DPMF: farinha brunida, DCF: fração grosseira da farinha brunida, DFF: fração fina da farinha brunida, WFF: fração fina da farinha integral, WCF: fração grosseira da farinha integral, WPMF: farinha integral, GFF: fração fina da farinha germinada, GPMF: farinha germinada e GCF: fração grosseira da farinha germinada.

Amostras com menor EAI ($< 7 \text{ m}^2/\text{g}$): DPMF, DCF apresentaram atividade emulsificante na faixa ($\sim 6\text{--}7 \text{ m}^2/\text{g}$) e estabilidade ($\sim 2 \text{ min}$). Isso indica que pode haver menor presença de proteínas funcionais e partículas coesas, com baixa capacidade de formação e estabilização de emulsões. Possivelmente sua composição é rica em amido intacto, com baixo teor de proteínas hidrossolúveis.

A DFF exibiu valor ligeiramente superior de EAI ($\sim 7,5 \text{ m}^2/\text{g}$) e ESI ($\sim 3,7 \text{ min}$), evidenciando que, embora sua atividade emulsificante não seja a mais alta, forma emulsões mais estáveis, possivelmente devido a maior proporção de fibras ou proteínas estruturadas.

Frações com EAI intermediário ($\sim 8 \text{ a } 8,5 \text{ m}^2/\text{g}$), WFF, WCF, WPMF, apresentaram EAI significativamente maior ($p < 0,05$) e ESI entre $0,6\text{--}2,9 \text{ min}$. A maior atividade emulsificante sugere presença de proteínas desnaturadas. O ESI ligeiramente reduzido pode indicar instabilidade das emulsões formadas, especialmente nas frações com maior teor de amido. A fração WPMF destaca-se por bom equilíbrio entre EAI e ESI ($\sim 2,8 \text{ min}$).

Frações com EAI elevado ($> 9 \text{ m}^2/\text{g}$), GFF, GPMF, GCF, apresentaram os maiores valores de EAI, especialmente GCF ($> 10 \text{ m}^2/\text{g}$). Esses resultados indicam que as frações germinadas possuem elevada atividade emulsificante, provavelmente pela ativação enzimática e exposição de proteínas funcionais durante a germinação. No entanto, o ESI foi baixo em todas essas frações germinadas ($\sim 0,9$ a $1,3 \text{ min}$), o que revela que, embora formem emulsões rapidamente, essas não são tão estáveis ao longo do tempo. Isso pode ser consequência da degradação parcial de proteínas e amido durante a germinação, gerando peptídeos ou dextrinas que reduzem a coesão da interface.

As aplicações tecnológicas de amostras com alto EAI incluem produtos emulsificados instantâneos, como maioneses veganas, molhos e bebidas vegetais, assim como sistemas extrudados que exigem emulsão de fase oleosa e produtos ricos em proteínas com fase lipídica dispersa. Já as amostras com alto ESI podem ser empregadas nas formulações onde a estabilidade da emulsão é mais crítica que sua formação inicial, produtos como sopas em pó, sobremesas aeradas, emulsões estáveis a prateleira (DE ANGELIS *et al.*, 2024).

Consequentemente, o desempenho emulsificante das amostras de milho pérola depende fortemente da composição proteica, granulometria e histórico de processamento. As frações germinadas destacam-se por alta atividade emulsificante (EAI), mas com estabilidade reduzida (ESI). Já frações como DFF e WPMF oferecem melhor equilíbrio funcional, sendo indicadas para formulações com emulsões estáveis e nutritivas.

Avaliando a influência do pré-tratamento, os resultados mostram valores maiores de EAI para as amostras germinadas, seguidas das integrais e por fim as brunidas. Ao avaliar o grau de processamento, não existe uma predominância clara entre farinha e frações aeroclassificadas.

Dentre as amostras brunidas, há predominância das frações aero-classificadas sobre a farinha. Já entre as amostras germinadas, a fração grosseira e a farinha possuem maior EAI do que a fração fina. Nas amostras integrais, por sua vez, os valores não diferem entre farinha e as duas frações aeroclassificadas ($p < 0,05$).

Os resultados mostram que GCF e GPMF apresentaram os maiores valores de EAI, enquanto a DPMF teve os menores. As outras amostras apresentaram valores intermediários. Os resultados indicam aumento na EAI para farinhas moídas e frações grosseiras germinadas quando comparadas às integrais e brunidas.

Por outro lado, dentre os pré-tratamentos, as amostras brunidas possuem os maiores valores de ESI, seguidas pelas germinadas e as integrais, respectivamente. A única exceção ocorre entre as frações grosseiras, pois WCF é maior do que GCF. Quanto ao nível de processamento, as farinhas possuem os maiores valores de ESI, predominando as brunidas e as germinadas. Portanto, a moagem proporciona emulsões mais estáveis do que a aeroclassificação.

A atividade emulsificante está relacionada à capacidade que algumas moléculas possuem de envolver gotas de óleo em um meio aquoso, funcionando como uma interface entre o óleo e a água que permite a dispersão das gotas de óleo no meio aquoso.

As proteínas possuem essa capacidade de melhorar a formação e promover a estabilidade da emulsão quando presentes em grande quantidade. Contudo, já foi observado que a presença de outros componentes, como as fibras por exemplo, também contribui para a estabilização das emulsões (SILVENTOINEN *et al.*, 2018).

Tais componentes atuam aumentando a viscosidade da fase aquosa contínua, o que permite maior estabilização das gotas de óleo dispersas. Segundo Solaesa *et al.* (2018), menores tamanhos de partícula melhoram as propriedades emulsificantes, pois aumentam o acesso das proteínas à interface óleo – água.

Com base nas constatações da literatura científica, pode ser concluído que os componentes moleculares oriundos do pericarpo e do gérmen melhoram o EAI das amostras germinadas e integrais. Analogamente, as amostras brunidas têm sua EAI reduzida devido à menor quantidade de tais componentes.

A predominância das amostras germinadas sobre as integrais deve estar associada à liberação de sacarídeos após a hidrólise enzimática dos grânulos de amido. Tais componentes possuem efeito espessante, aumentando a viscosidade da fase contínua e consequentemente melhorando o EAI.

Quanto ao ESI, aparentemente a aeroclassificação possui efeito negativo, dado que as farinhas possuem valores muito maiores em relação às frações. Tal fenômeno necessita de investigação mais aprofundada para sua elucidação, pois não foi identificada nenhuma correlação com os dados obtidos no presente trabalho.

Dentre os resultados da literatura para farinhas obtidas por fracionamento a seco, De Paiva Gouvêa *et al.* (2023), reportaram EAI entre 14,03 e 18,00 m²/g a partir de ervilha e

feijão fava. Já Saldanha do Carmo *et al.* (2020), obtiveram EAI entre 12,32 e 18,80 m²/g partir de ervilha amarela e feijão fava. Boa EAI é desejável na formulação de alimentos emulsificados, como cremes, maioneses e molhos para salada (DE ANGELIS *et al.*, 2024).

As propriedades emulsificantes de EAI e ESI, sugerindo potenciais aplicações das amostras na formulação de alimentos estão expostas na Tabela 9.

Tabela 9: Resumo das propriedades emulsificantes: índice de atividade emulsificante (EAI) e índice de estabilidade da Emulsão (ESI) das amostras de milho pérola.

Amostra	EAI (m ² /g)	ESI (min)	Desempenho Funcional	Aplicações industriais sugeridas
DPMF	6,2	2,4	Baixa atividade emulsificante e estabilidade moderada	Produtos secos, panificados
DCF	6,8	1,9	Atividade moderada; emulsões pouco estáveis	Snacks, misturas instáveis
DFF	7,5	3,7	Boa estabilidade da emulsão; atividade moderada	Sopas em pó, sobremesas emulsificadas
WFF	8,1	0,9	Alta atividade emulsificante; baixa estabilidade	Molhos e emulsões instantâneas
WCF	8,3	0,6	Boa atividade; estabilidade limitada	Bebidas vegetais com óleo
WPMF	8,5	2,8	Bom equilíbrio entre EAI e ESI	Produtos com fase oleosa estável
GFF	9,2	1,1	Alta formação de emulsão; baixa resistência ao tempo	Maioneses vegetais, patês
GPMF	9,3	0,9	Atividade elevada; instabilidade de emulsão	Molhos cremosos, emulsões rápidas
GCF	10,5	1,3	Máximo EAI; estabilidade baixa	Molhos espessos, sistemas instantâneos

DPMF: farinha brunida, DCF: fração grosseira da farinha brunida, DFF: fração fina da farinha brunida, WFF: fração fina da farinha integral, WCF: fração grosseira da farinha integral, WPMF: farinha integral, GFF: fração fina da farinha germinada, GPMF: farinha germinada e GCF: fração grosseira da farinha germinada.

5.4.2.5 Capacidade de formação de espuma

A capacidade de formação de espuma (FC) é uma propriedade funcional relevante em sistemas alimentares aerados, representando a habilidade de proteínas e outros compostos da farinha em aprisionar ar na interface líquido-ar, formando uma estrutura espumosa estável. Esse parâmetro é fundamental para o desenvolvimento de produtos como sobremesas

espumosas, pães de estrutura leve, bebidas instantâneas aeradas, substitutos de ovos veganos. Dentre os fatores que influenciam a formação de espuma, considera-se a composição proteica, pois proteínas com estrutura flexível e grupos hidrofóbicos expostos tendem a se adsorver rapidamente à interface ar/água, facilitando a formação de bolhas. Por outro lado, a solubilidade e desnaturação proteica, favorecem o rearranjo molecular na interface, promovendo a estabilidade da espuma (COFFMANN; GARCIAJ, 2007).

Outro fator é a granulometria, pois partículas finas com maior superfície de contato favorecem a dispersão e estabilização das bolhas. A presença de compostos antiespumantes, como lipídeos e amido íntegro podem dificultar a formação de espuma. Na Figura 12 apresenta-se o gráfico sobre a capacidade de formação de espuma.

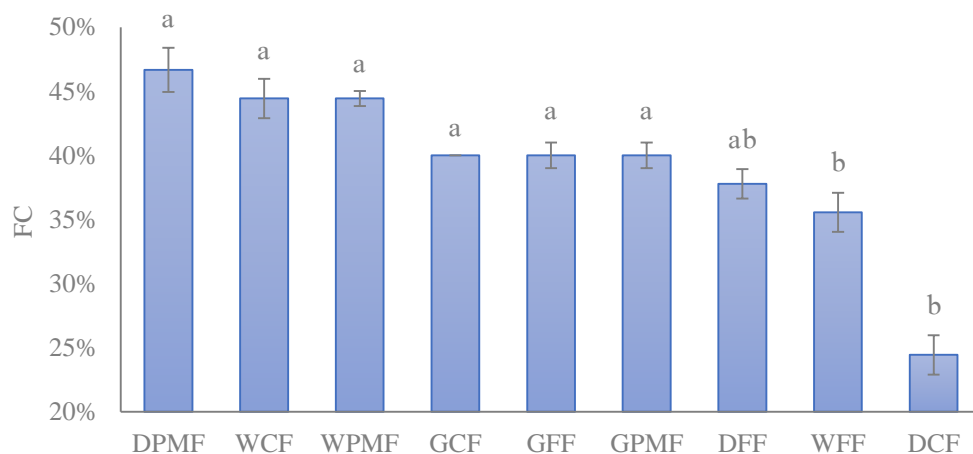


Figura 12: Capacidade de formação de espuma (FC) das farinhas e frações de milho pérola.

DPMF: farinha brunida, WCF: fração grosseira da farinha integral, WPMF: farinha integral, GCF: fração grosseira da farinha germinada, GFF: fração fina da farinha germinada, GPMF: farinha germinada, DFF: fração fina da farinha brunida, WFF: fração fina da farinha integral e DCF: fração grosseira da farinha brunida.

De acordo com os valores de FC (%), o grupo com menor capacidade de formação de espuma (letra b) contém DCF (~24%) e WFF (~35%). Onde DCF apresentou o menor valor absoluto, sugerindo baixa concentração de proteínas solúveis e possível predominância de amido ou fibras insolúveis.

A fração WFF teve desempenho melhor, mas ainda inferior a outras frações, podendo conter proteínas menos desnaturadas, o que reduz sua capacidade de formar filmes elásticos na interface.

O grupo intermediário (letras ab), contém DFF (~38). A possível exposição parcial de proteínas contribui para esse comportamento. É provável que a fração tenha composição equilibrada entre proteína funcional e componentes dispersantes.

O grupo com maior capacidade de formação de espuma (letra a) é composto por GCF, GFF, GPMF, WCF, WPMF, DPMF (~40–47%), essas amostras se destacaram pela maior eficiência em aprisionar ar, com destaque para DPMF (~47%), o valor mais elevado do conjunto.

A presença de proteínas parcialmente hidrolisadas pela germinação (caso de GCF, GFF, GPMF) ou a ação do fracionamento aerodinâmico, que concentra frações proteicas funcionais favorece esse comportamento. A fração DPMF sugere alto potencial espumante devido à possível concentração de proteínas estruturadas e partículas de boa solubilidade.

Do ponto de vista tecnológico, amostras com maior capacidade de formação de espuma (FC) são indicadas para produtos veganos substitutos de clara de ovo, bolos aerados, mousses, sobremesas instantâneas e bebidas proteicas em pó com melhor dispersibilidade. Por outro lado, frações com baixa FC, como DCF, podem ser mais indicadas para produtos densos ou com baixa incorporação de ar, como massas compactas, bolachas ou sistemas extrudados (DE ANGELIS *et al.*, 2024).

Nesse sentido, a capacidade de formação de espuma das farinhas de milho pérola é fortemente influenciada pelo tipo de fração obtida por aeroclassificação e pela composição proteica resultante. As capacidades de formação de espuma, caracterizando seu desempenho funcional e sugerindo potenciais aplicações na formulação de alimentos estão expostas na Tabela 10.

Tabela 10: Características da capacidade de formação de espuma (FC) das farinhas e frações de milho pérola.

Amostra	FC (%)	Desempenho Funcional	Aplicações industriais sugeridas
DCF	24	Fraca incorporação de ar; possível presença de amido predominante	Massas compactas, biscoitos, extrusados densos
WFF	35	Alguma atividade espumante; proteínas menos funcionais	Panificados leves, massas mistas
DFF	38	Composição equilibrada; proteínas parcialmente desnaturadas	Bolos, pães macios
GCF	40	Boa dispersibilidade; presença de proteínas solúveis	Sobremesas aeradas, substitutos de ovos
GFF	41	Potencial funcional por germinação; estrutura flexível	Bebidas aeradas, mousses veganas
GPMF	41	Germinação favorece exposição proteica	Produtos espumosos, emulsões aeradas
WCF	44	Boa solubilidade e capacidade espumante	Espumas instantâneas, panificação leve
WPMF	44	Boa estabilidade de espuma e incorporação de ar	Bebidas espumosas, merengues veganos
DPMF	47	Excelente atividade espumante; alta funcionalidade	Substituto de clara de ovo, sobremesas espumadas

DCF: fração grosseira da farinha brunida, WFF: fração fina da farinha integral, DFF: fração fina da farinha brunida, GCF: fração grosseira da farinha germinada, GFF: fração fina da farinha germinada, GPMF: farinha germinada, WCF: fração grosseira da farinha integral, WPMF: farinha integral e DPMF: farinha brunida.

Os resultados de estabilidade de espuma (FS) são exibidos no gráfico da Figura 13. Os valores ao longo do tempo mostram que a capacidade de formação de espuma (FC) não depende das configurações do processo, uma vez que os valores são equivalentes ($p < 0,05$). O pré-tratamento também não tem influência na FS, de acordo com os resultados.

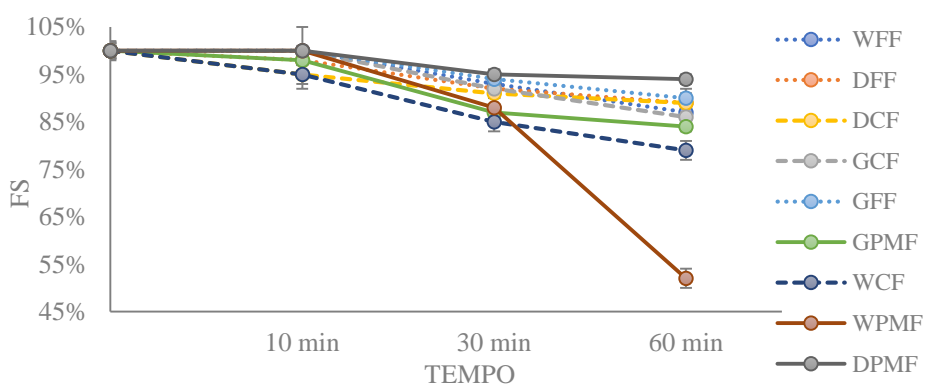


Figura 13: Estabilidade de espuma (*Foaming stability* - FS) para as amostras de milho pérola.

WFF: fração fina da farinha integral, DFF: fração fina da farinha brunida, DCF: fração grosseira da farinha brunida, GCF: fração grosseira da farinha germinada, GFF: fração fina da farinha germinada, GPMF: farinha germinada, WCF: fração grosseira da farinha integral, WPMF: farinha integral e DPMF: farinha brunida.

Avaliando os resultados, observa-se que a farinha DPMF apresentou a maior estabilidade da espuma (FS), enquanto WPMF, a menor. O processamento influenciou a FS após 10 min para as amostras brunidas e integrais, visto que as farinhas moídas e frações finas apresentaram valores mais altos em comparação com as frações grossas. No mesmo período, o pré-tratamento não teve influência na FS.

Após 30 min, as frações finas tiveram maior FS para as amostras germinadas e integrais, evidenciando a influência do processamento. O pré-tratamento não teve influência na FS após 30 min. A FS das farinhas moídas após 60 min foi influenciada pelo pré-tratamento, seguindo a ordem brunido maior do que germinado, que é maior do que integral. O processamento não teve influência após 60 min. No geral, tanto o pré-tratamento quanto o processamento tiveram pouca ou nenhuma influência na estabilidade da espuma.

Segundo Vogelsang-O'Dwyer *et al.* (2020) e Tabatabaei *et al.* (2019), proteínas obtidas por fracionamento a seco (DF) possuem estrutura nativa mais preservada em relação àquelas obtidas por extração em via úmida. Supõe-se que a estrutura íntegra dessas proteínas proporciona maior capacidade de retenção das bolhas de ar na superfície, formando uma espuma mais estável.

Para fins de comparação entre cereais, De Angelis *et al.* (2023) obtiveram valores de capacidade de formação de espuma (FC) de 52,50% e 287,50% para proteínas concentradas de aveia e glúten de trigo, respectivamente, por meio de processamento de extração úmida (WE). A FS após 10 min para aveia e glúten de trigo foi de 19,08% e 75,65%, respectivamente. O mesmo trabalho relatou 182,92% e 82,77% como valores médios de FC e FS após 10 min, respectivamente, para diferentes concentrados proteicos de leguminosas obtidos por processamento de fracionamento a seco (DF).

Outro trabalho, publicado por Saldanha do Carmo *et al.* (2016) reportou capacidade de formação de espuma em proteína de ervilha fracionada a seco e proteína de fava de 55% e 45%, respectivamente. Silventoinen *et al.* (2018), reportou 48% para FC e FS após 30 min para a fração fina obtida a partir de endosperma industrial de cevada por aeroclassificação.

Comparativamente, a melhor capacidade de formação de espuma encontrada no presente trabalho foi de aproximadamente 46% para DPMF.

De Paiva Gouvêa *et al.* (2023) também avaliaram FC e FS de diferentes leguminosas obtidas via WE e DF. Os resultados também mostraram valores consideravelmente mais altos para FC, sendo o menor valor superior a 60%. O artigo referido também avaliou a FS após diferentes períodos: 10, 30 e 60 min. Os resultados mostram uma tendência similar à observada para o milho pérola no presente trabalho.

As propriedades de formação e estabilidade de espuma dependem ainda da presença de outros compostos que podem inibir ou melhorar as propriedades espumantes, como os lipídeos e o amido, respectivamente. Lipídeos em elevada concentração podem inibir a formação de espuma, já o amido pode atuar na sua estabilização.

Proteínas em elevada concentração podem melhorar as propriedades espumantes, em especial quando estão em pH próximo ao seu ponto isoelétrico, pois devido à carga neutra as proteínas conseguem interagir melhor entre si. Há ainda a natureza da proteína como fator a considerar, pois proteínas ricas em albuminas possuem maior capacidade de formação de filmes na interface água - ar.

É possível concluir com base nos resultados que não foi possível correlacionar os dados obtidos com a FC e a FS, sendo necessária uma investigação mais aprofundada quanto à natureza química das amostras para elucidar os resultados obtidos. Contudo, tais resultados são comparáveis aos de outras publicações, indicando um caminho viável para a obtenção de farinhas com capacidade intermediária de formação de espuma.

5.4.2.6 Mínima concentração formadora de gel

A mínima concentração formadora de gel (LGC) representa a menor concentração de uma amostra capaz de formar um gel autossustentável sob condições definidas, como temperatura, tempo e repouso (BOYE *et al.*, 2010). Esse parâmetro é particularmente importante para formulações de sobremesas gelificadas, alimentos com textura cremosa ou estruturada e aplicações como espessantes ou substitutos de gordura.

A capacidade de formação de gel (também chamada de capacidade de gelificação) está relacionada principalmente à presença de amido funcional, capaz de formar redes

tridimensionais com retenção de água, ao conteúdo e estado das proteínas, que podem contribuir com a formação de gel por desnaturação e agregação e à presença de fibras solúveis ou gomas, que atuam como agentes estruturantes auxiliares (DE ANGELIS *et al.*, 2024). A concentração mínima de formação de gel das amostras é exibida na Tabela 11.

Tabela 11: Concentração mínima para a formação de gel (*Least gelling concentration* - LGC). Os valores assinalados como “-” indicam que não houve formação de gel, “±”

Amostra	Concentração (%)																							
	2			4			6			8			10			12			14			16		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
DCF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	±	±	±	±	±	±	±	±	±	+	+	+
DFF	-	-	-	-	-	-	±	±	±	±	±	±	±	±	±	+	+	+	+	+	+	+	+	+
DPMF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	±	±	±	±	±	±	±	±	±	+	+	+
GCF	-	-	-	-	-	-	±	±	±	±	±	±	±	±	±	+	+	+	+	+	+	+	+	+
GFF	±	±	±	±	±	±	±	±	±	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
GPMF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	±	±	±	±	±	±	±	±	±	+	+	+
WCF	-	-	-	-	-	-	±	±	±	±	±	±	±	±	±	+	+	+	+	+	+	+	+	+
WFF	±	±	±	±	±	±	±	±	±	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
WPMF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	±	±	±	±	±	±	±	±	±	+	+	+

indicam formação parcial de gel, ou gel fraco e “+” indica a formação de gel firme. As letras A, B e C indicam as repetições do teste para cada concentração avaliada.

DCF: fração grosseira da farinha brunida, DFF: fração fina da farinha brunida, DPMF: farinha brunida, GCF: fração grosseira da farinha germinada, GFF: fração fina da farinha germinada, GPMF: farinha germinada, WCF: fração grosseira da farinha integral, WFF: fração fina da farinha integral e WPMF: farinha integral.

As amostras com baixa capacidade de gelificação (predominância de “-”) foram DCF, DPMF, GPMF e WPMF. Tais amostras apresentaram ausência de gelificação em praticamente todas as concentrações analisadas (até 16%). Isso pode indicar baixo teor de amido funcional, presença de fibras insolúveis ou proteínas não estruturantes e provável interferência de componentes degradados (por germinação ou moagem intensa). Essas amostras não são recomendadas para aplicações estruturadas por gelificação.

As amostras que apresentaram gelificação parcial (predominância de “±”), foram DFF, GCF e WCF, em concentrações a partir de 6%. Isso indica que as amostras apresentam potencial funcional moderado, provavelmente pela presença de amido danificado ou de proteínas parcialmente desnaturadas. Podem ser úteis como espessantes moderados ou em combinação com outros ingredientes gelificantes.

Por fim, as amostras com melhor desempenho gelificante (presença de “+”) foram GFF e WFF, as quais apresentaram formação de gel firme (sinal “+”) em concentrações a partir de 8%. Essas amostras tendem a apresentar maior proporção de amido funcional e proteínas estruturantes, favorecendo a formação de uma rede gelificada densa e coesa. São ideais para aplicação em sobremesas gelificadas, molhos espessos, substitutos de gordura ou recheios estruturados.

Avaliando os resultados com base no processamento (moagem, aeroclassificação) verifica-se que a concentração mínima para a formação de gel (LGC) é claramente influenciada, pois a farinha moída apresenta os maiores resultados, seguida pela fração grosseira e a fração fina, respectivamente. Logo, aparentemente a aeroclassificação melhora a capacidade de gelificação, uma vez que as frações exigem menor concentração para formar géis estáveis. Tal comportamento deve estar associado à uma maior capacidade de reorganização das ligações durante a retrogradação, formando géis com maior facilidade. Essa capacidade pode estar relacionada com o grau de acessibilidade entre as partículas, o que facilitaria as interações entre elas.

As frações aeroclassificadas possuem como principal diferença em relação às farinhas o PSD, especialmente a amplitude de distribuição de partículas, que é notadamente menor para as frações. Uma distribuição mais uniforme significa que a farinha possui partículas com tamanhos que não diferem tanto entre si, o que poderia facilitar as interações entre elas. Contudo, tal hipótese necessita de maior investigação para ser confirmada.

Avaliando quanto ao pré-tratamento, as frações grosseiras e finas brunidas apresentam valores mais altos do que as equivalentes germinadas e integrais. A LGC das farinhas moídas não é influenciada pelo pré-tratamento, pois não diferem entre si ($p < 0,05$). Aparentemente o brunimento diminui a capacidade de gelificação das frações aeroclassificadas, uma vez que DFF e DCF têm menor capacidade de formação de gel, comparada às frações oriundas de grãos integrais e germinados.

Tal resultado está associado à presença de componentes moleculares do pericarpo e do gérmen, que estando presentes nas amostras integrais e germinadas, facilitam a formação de novas ligações durante a retrogradação, aumentando a força do gel. A ausência ou menor quantidade de tais componentes nas amostras brunidas explica a maior LGC.

Para fins de comparação com a literatura, Diedericks *et al.* (2022) obtiveram LGC de 11–12% para farinhas de amendoim enriquecidas com proteínas. Já Nasrollahzadeh *et al.* (2022), obtiveram LGC próxima a 10% para feijão mungo, ervilha amarela e feijão-caupi. De Paiva Gouvêa *et al.* (2023) obtiveram valores de 10% e 12% para concentrados proteicos obtidos por aeroclassificação de ervilha e fava, respectivamente. Foram obtidos valores na faixa de 12–14% para proteína de quinoa fracionada a seco (SOLAESA *et al.*, 2018).

Os resultados obtidos no presente trabalho são comparáveis aos da literatura, o que demonstra que é possível utilizar moagem e aeroclassificação para a melhoria da LGC. Na Tabela 12, a seguir, são apresentados possíveis usos das frações obtidas quanto à formação de gel das diferentes frações.

Tabela 12. Características de formação ou não de géis das diferentes amostras de farinha e frações de milho pérola.

Classificação	Frações	Aplicações recomendadas
Sem gel	DCF, DPMF, GPMF e WPMF	Misturas secas, panificados, extrudados secos
Gel parcial	GCF, DFF e WCF	Sopas, molhos leves, bebidas espessadas
Gel firme	GFF e WFF	Sobremesas, produtos gelificados, recheios estáveis

DCF: fração grosseira da farinha brunida, DPMF: farinha brunida, GPMF: farinha germinada, WPMF: farinha integral, GCF: fração grosseira da farinha germinada, DFF: fração fina da farinha brunida, WCF: fração grosseira da farinha integral, GFF: fração fina da farinha germinada e WFF: fração fina da farinha integral.

5.4.2.7 Atividade antioxidante

Os resultados da atividade antioxidante para a farinha de milho pérola e suas frações aeroclassificadas são apresentados na Tabela 13. De modo geral, a farinha de grão integral moída (WPMF) exibiu a maior atividade antioxidante ($17,50 \pm 0,29$ μmol de Trolox/g). Em contraste, a fração grosseira do grão integral (WCF) apresentou uma perda quase total de atividade antioxidante, com o menor valor ($0,17 \pm 0,24$ μmol de Trolox/g). A fração fina brunida (DFF) reteve a atividade mais significativa entre as amostras restantes ($15,51 \pm 0,28$ μmol de Trolox/g). Esta foi seguida pela fração fina integral (WFF) com ($14,56 \pm 0,10$ μmol de Trolox/g). A fração fina germinada (GFF) teve uma redução substancial ($6,10 \pm 0,37$ μmol de Trolox/g). A farinha moída germinada (GPMF) apresentou uma alta capacidade antioxidante ($12,85 \pm 0,46$ μmol de Trolox/g), estatisticamente semelhante (grupo “ab”) à fração grossa brunida (DCF), com ($12,96 \pm 0,76$ μmol de Trolox/g). As amostras DPMF e

GCF tiveram valores menores, $8,45 \pm 0,42$ μmol de Trolox/g e $7,37 \pm 0,70$ μmol de Trolox/g, respectivamente.

Tabela 13: Atividade antioxidante da farinha de milho e suas frações aeroclassificadas. Letras diferentes (a, b, c) indicam diferenças estatisticamente significativas.

Sample	Antioxidant activity (μmol Trolox/g sample)
WPMF	$17,50 \pm 0,29^a$
DFF	$15,51 \pm 0,28^b$
WFF	$14,56 \pm 0,10^{bc}$
DCF	$12,96 \pm 0,76^{cd}$
GPMF	$12,85 \pm 0,46^{cd}$
DPMF	$8,45 \pm 0,42^e$
GCF	$7,37 \pm 0,70^e$
GFF	$6,10 \pm 0,37^f$
WCF	$0,17 \pm 0,24^g$

WPMF: farinha de grão integral, DFF: fração fina da farinha descascada, WFF: fração fina da farinha integral, DCF: fração grossa da farinha descascada, GPMF: farinha germinada, DPMF: farinha descascada, GCF: fração grossa da farinha germinada, GFF: fração fina da farinha germinada e WCF: fração grossa da farinha integral.

Os pré-tratamentos aplicados ao grão antes da moagem tiveram impacto na capacidade antioxidante dos produtos finais. Tanto a germinação quanto o brunimento reduziram a atividade antioxidante geral quando comparados à farinha integral original (WPMF). Avaliando a influência do processamento, a aeroclassificação produziu efeitos diferentes dependendo do pré-tratamento. Para o grão integral, a aeroclassificação resultou em uma diminuição da atividade antioxidante, uma vez que a WPMF apresentou um valor maior do que suas frações fina (WFF) e grossa (WCF).

Por outro lado, a aeroclassificação provou ser um método eficaz para concentrar compostos antioxidantes nas amostras germinadas e brunidas. As frações germinadas (GFF e GCF) mostraram atividade antioxidante maior em comparação com a farinha moída germinada original (GPMF). Da mesma forma, a fração fina brunida (DFF) apresentou maior atividade antioxidante do que a farinha moída brunida original (DPMF), indicando uma concentração bem sucedida desses compostos na fração fina durante o processamento.

Os valores de atividade antioxidante obtidos para as farinhas e frações de milho pérola neste estudo são notavelmente altos quando comparados a dados da literatura existente. Por exemplo, estudos com milho pérola relataram atividades antioxidantes de

1,73 a 1,80 μmol de Trolox/g para variedades de milho pérola integral (OBILANA *et al.*, 2018) e 4,15 μmol de Trolox/g ao analisar compostos fenólicos insolúveis (CHANDRASEKARA E SHAHIDI, 2011). Os resultados do presente trabalho são aproximadamente quatro a dez vezes maiores, sugerindo que a variedade específica de milho pérola e as metodologias de processamento empregadas foram excepcionalmente eficazes na preservação ou concentração desses compostos bioativos.

Quando comparada a outras matrizes, a capacidade antioxidante das frações permanece superior. Híbridos comerciais de milho exibiram uma faixa de TEAC de 0,650 a 0,890 μmol de Trolox/g (KLJAK E GRBESA, 2015) e frações de moagem de soja estavam na faixa de 0,282 a 1,256 μmol de Trolox/g (LEE *et al.*, 2016). Os valores obtidos neste estudo são substancialmente maiores do que os relatados tanto para o milho quanto para a soja.

Um resultado comparável foi obtido do caule de *Pereskia aculeata* Miller (ora-pró-nóbis), que registrou uma alta atividade de 13,82 μmol de Trolox/g (CIRÍACO *et al.*, 2023). As frações WFF e DFF estão dentro dessa faixa, enquanto a WPMF a superou. Essa comparação destaca que as farinhas de milho pérola processadas apresentam uma capacidade antioxidante competitiva.

6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste estudo demonstram que a associação entre moagem de impacto e aeroclassificação aplicada aos grãos de milho pérola, combinada com pré-tratamentos como brunimento e germinação, constitui uma estratégia tecnológica para a produção de ingredientes com características físico-químicas, funcionais e nutricionais moduladas.

A separação granulométrica promovida pela aeroclassificação resultou em frações distintas quanto ao tamanho de partícula, área superficial específica, rendimento e densidade. As farinhas finas apresentaram elevada homogeneidade, maior área superficial e menor densidade aparente, características desejáveis em formulações que exigem alta solubilidade e funcionalidade, como bebidas instantâneas ou sistemas dispersíveis.

Do ponto de vista composicional, a farinha proveniente do brunimento apresentou os maiores teores de proteína (12,38%) e lipídeos (4,62%), evidenciando o potencial do processo

para a concentração seletiva de nutrientes. A germinação promoveu alterações significativas, com redução do teor de amido atribuída à atividade enzimática sobre os polissacarídeos, enquanto as amostras brunidas preservaram teores superiores de lipídeos e minerais, especialmente nas frações finas. Esses achados reforçam que o tipo de pré-tratamento influencia diretamente a funcionalidade e o valor nutricional dos ingredientes resultantes.

Além dos aspectos composicionais, as amostras apresentaram diferenciações importantes em propriedades tecnológicas. A capacidade de absorção de água (WAI) foi superior nas amostras mais densas e com maior teor de fibras e proteínas desnaturadas, como DPMF e WPMF, sendo promissoras para aplicações em produtos estruturados ou extrusados. Já a capacidade de absorção de óleo (OAC) foi mais elevada nas frações grosseiras e finas (GFF, WFF), destacando seu potencial em sistemas com fase lipídica contínua, como análogos de carne e patês vegetais.

No que se refere à atividade emulsificante (EAI) e à estabilidade da emulsão (ESI), observou-se que frações como GCF e GPMF apresentaram alta capacidade de formação de emulsões, mas com baixa estabilidade, ao passo que WPMF e DFF exibiram melhor equilíbrio entre formação e manutenção da emulsão, recomendando seu uso em molhos, bebidas cremosas e sistemas emulsificados com vegetais.

A capacidade de formação de espuma (FC) foi mais pronunciada nas frações DPMF e WPMF, com valores superiores a 44%, evidenciando funcionalidade promissora para aplicação como substituto de claras de ovo em produtos espumados, sobremesas aeradas e panificação leve. Por outro lado, frações como DCF e GCF mostraram desempenho limitado neste parâmetro, restringindo seu uso a formulações menos estruturadas.

A avaliação da mínima concentração formadora de gel (LGC) revelou que as frações GFF e WFF foram capazes de formar gel firme em concentrações a partir de 8%, demonstrando funcionalidade superior para aplicações que exigem estruturação, como sobremesas gelificadas, molhos espessos e recheios. Finalmente, a avaliação da capacidade antioxidante resultou em valores superiores comparados à literatura, principalmente para WPMF, WFF e DFF, revelando o potencial de modulação de ingredientes tecnofuncionais a partir de milho pérola integral, brunido e germinado por moagem de impacto e aeroclassificação.

Dessa forma, este estudo confirma que o milheto pérola, especialmente quando submetido a tratamentos prévios e técnicas de fracionamento como a aeroclassificação, representa uma alternativa promissora para a obtenção de ingredientes alimentícios funcionais, sustentáveis e adaptáveis a diferentes aplicações industriais. A possibilidade de modular as propriedades funcionais por meio da escolha das frações permite atender a diversas demandas tecnológicas da indústria alimentícia, promovendo ainda o aproveitamento de uma matéria-prima acessível, cultivada em ambientes de baixa exigência hídrica, alinhada aos princípios da bioeconomia e segurança alimentar.

7 REFERÊNCIAS

AACC. American Association of Cereal Chemists. **Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists**. 9. ed. Saint Paul, v. 1-2, 1995.

AACC. American Association of Cereal Chemists. **Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists**. 10. ed. Saint Paul, v. 2, 2000.

ADEBIYI, J. A. et al. Effect of fermentation and malting on the microstructure and selected physicochemical properties of pearl millet (*Pennisetum glaucum*) flour and biscuit. **Journal of Cereal Science**, [s. l.], v. 70, p. 132-139, jul. 2016.

AKDOGAN, H. High moisture food extrusion. **International Journal of Food Science & Technology**, [s. l.], v. 34, n. 3, p. 195–207, jun. 1999.

ALAM, M. S. et al. Extrusion and Extruded Products: Changes in Quality Attributes as Affected by Extrusion Process Parameters: A Review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [s. l.], v. 56, n. 3, p. 445–473, 9 jan. 2015.

ALEXANDER, C. Preparation of weaning foods with high nutrient density using flour of germinating cereals. **Food and Nutrition Bulletin**, [s. l.], v. 5, n. 2, p. 10-14, 1983.

ANDERSON, R. A.; CONWAY, H. F.; PEPLINSKI, A. J. Gelatinization of Corn Grits by Roll Cooking, Extrusion Cooking and Steaming. *Starch - Stärke*, v. 22, n. 4, p. 130–135, 1970.

ANGELIS, D. D. et al. Rheological properties of dry-fractionated mung bean protein and structural, textural, and rheological evaluation of meat analogues produced by high-moisture extrusion cooking. **Current Research in Food Science**, [s. l.], v. 7, p. 100552–100552, 1 jan. 2023.

ANNOR, G. A. et al. Why do millets have slower starch and protein digestibility than other cereals? **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 66, p. 73-83, ago. 2017.

AOAC. Association of Official Analytical Chemists. **Official Methods of Analysis of Association of Official Analytical Chemists**. 18. ed. Washington, DC., 2010.

ASCHERI, José Luis Ramirez. **Perguntas e respostas sobre extrusão termoplástica de alimentos - Uma abordagem simplificada**. Ponta Grossa - PR: Atena, 2022.

ASSATORY, A. et al. Dry fractionation methods for plant protein, starch and fiber enrichment: A review. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 86, p. 340–351, 1 abr. 2019.

BACIC, A.; STONE, B. Chemistry and Organization of Aleurone Cell Wall Components From Wheat and Barley. **Functional Plant Biology**, [s. l.], v. 8, n. 5, p. 475, 1981.

BENINCASA, P. et al. Sprouted Grains: A Comprehensive Review. **Nutrients**, [s. l.], v. 11, n. 2, 17 fev. 2019.

BERNARDO, C. O. et al. Ultrasound Assisted Extraction of Yam (*Dioscorea bulbifera*) Starch: Effect on Morphology and Functional Properties. **Starch - Stärke**, [s. l.], v. 70, n. 5-6, p. 1700185, 23 mar. 2018.

BHATTARAI, R. R. et al. Intact cellular structure in cereal endosperm limits starch digestion in vitro. **Food Hydrocolloids**, [s. l.], v. 81, p. 139-148, ago. 2018.

BHAVADHARANI, P. V.; GURUMOORTHY, P. Impact of germination on nutritional components, antinutritional, and functional properties of proso and barnyard millets. **Food Chemistry Advances**, v. 6, p. 100896, mar. 2025.

BOUVIER, J.-M.; CAMPANELLA, O. H. **Extrusion Processing Technology**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2014.

BOYE, J.; ZARE, F.; PLETCH, A. Pulse proteins: Processing, characterization, functional properties and applications in food and feed. **Food Research International**, [s. l.], v. 43, n. 2, p. 414–431, 1 mar. 2010.

CAMIRE, M. E. Protein functionality modification by extrusion cooking. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, [s. l.], v. 68, n. 3, p. 200–205, mar. 1991.

CARVALHO, C. W. P. et al. Relative effect of particle size on the physical properties of corn meal extrudates: Effect of particle size on the extrusion of corn meal. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 98, n. 1, p. 103-109, maio 2010.

CHAIYAKUL, S. et al. Effect of protein content and extrusion process on sensory and physical properties of extruded high-protein, glutinous rice-based snack. [S. l.], p. 81–90, 1 jan. 2008.

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

CHEN, F. et al. System parameters and product properties response of soybean protein extruded at wide moisture range. [S. l.], v. 96, n. 2, p. 208–213, 1 jan. 2010.

CHEN, F. L.; WEI, Y. M.; ZHANG, B. Chemical cross-linking and molecular aggregation of soybean protein during extrusion cooking at low and high moisture content. **LWT - Food Science and Technology**, [s. l.], v. 44, n. 4, p. 957–962, maio 2011.

CHEN, Q. et al. Rheological properties of pea protein isolate-amylose/amylopectin mixtures and the application in the high-moisture extruded meat substitutes. **Food Hydrocolloids**, [s. l.], v. 117, p. 106732, ago. 2021.

CHIANG, J. H. et al. Effects of soy protein to wheat gluten ratio on the physicochemical properties of extruded meat analogues. **Food Structure**, [s. l.], v. 19, p. 100102, jan. 2019.

COFFMANN, C. W.; GARCIAJ, V. V. Functional properties and amino acid content of a protein isolate from mung bean flour*. *International Journal of Food Science & Technology*, v. 12, n. 5, p. 473–484, jan. 1977.

DE ANGELIS, Davide et al. Antinutritional factors, mineral composition and functional properties of dry fractionated flours as influenced by the type of pulse. **Heliyon**, [S. l.], v. 7, n. 2, p. e06177, 1 fev. 2021.

DE ANGELIS, Davide et al. Techno-functional properties of dry-fractionated plant-based proteins and application in food product development: a review. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, Chichester, v. 104, n. 4, p. 1884-1896, 9 dez. 2023.

DE ANGELIS, D. et al. Techno-functional, rheological, and chemical properties of plant-based protein ingredients obtained with dry fractionation and wet extraction. **Current Research in Food Science**, Amsterdam, v. 9, p. 100906, 2024.

DAVIES, J.; LIGHTOWLER, H. Plant-based alternatives to meat. **Nutrition & Food Science**, [s. l.], v. 98, n. 2, p. 90–94, abr. 1998.

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

DE ASSIS, R. L.; DE FREITAS, R. S.; MASON, S. C. Pearl millet production practices in Brazil: a review. **Experimental Agriculture**, Cambridge, v. 54, n. 5, p. 699-718, 2018. Disponível em: AGRIS (FAO). Acesso em: 24 jul. 2025.

DIEDERICKS, C. F. et al. Physicochemical properties and gelling behaviour of Bambara groundnut protein isolates and protein-enriched fractions. **Food Research International**, [s. l.], v. 138, p. 109773, 2020.

DIJKINK, B. H. et al. Air dispersion of starch–protein mixtures: A predictive tool for air classification performance. **Powder Technology**, [s. l.], v. 172, n. 2, p. 113-119, mar. 2007.

DU, S. K. et al. Physicochemical and functional properties of whole legume flour. **LWT**, [s. l.], v. 55, n. 1, p. 308-313, 2014. DOI: 10.1016/j.lwt.2013.06.001.

DZIKI, D.; LASKOWSKI, J. Study to analyze the influence of sprouting of the wheat grain on the grinding process. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 96, n. 4, p. 562-567, 2010.

ELKHALIFA, A. E. O.; BERNHARDT, R. Influence of grain germination on functional properties of sorghum flour. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 121, n. 2, p. 387-392, 2010. DOI: 10.1016/j.foodchem.2009.12.041.

FAOSTAT. Agriculture Organization of the United Nations **Statistics Division.Data–Crops-Yield. (2023)**. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. Acesso em: 24 jul. 2025.

FANG, Y.; ZHANG, B.; WEI, Y. Effects of the specific mechanical energy on the physicochemical properties of texturized soy protein during high-moisture extrusion cooking. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 121, p. 32–38, jan. 2014.

FERNANDO, S. Production of protein-rich pulse ingredients through dry fractionation: A review. **LWT**, [s. l.], v. 141, p. 110961, abr. 2021.

GHRIBI, A. M. et al. Effect of drying methods on physico-chemical and functional properties of chickpea protein concentrates. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 165, p. 179-188, nov. 2015.

GRIFFITH, L. D.; CASTELL-PEREZ, M. E. Effects of Roasting and Malting on Physicochemical Properties of Select Cereals and Legumes. **Cereal Chemistry Journal**, [s. l.], v. 75, n. 6, p. 780-784, nov. 1998.

GUAN, E. et al. Ultrafine grinding of wheat flour: Effect of flour/starch granule profiles and particle size distribution on falling number and pasting properties. **Food Science and Nutrition**, v. 8, n. 6, p. 2581–2587, 1 maio 2020.

GUERRERO, P. et al. Extrusion of soy protein with gelatin and sugars at low moisture content. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 110, n. 1, p. 53–59, maio 2012.

GULDIKEN, B. et al. Effect of extrusion conditions on the physical properties of desi chickpea-barley extrudates and quality attributes of their resulting flours. [S. l.], v. 51, n. 2, p. 300–307, 1 abr. 2020.

GUNATHUNGA, C. et al. Germination effects on nutritional quality: A comprehensive review of selected cereals and pulses changes. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 128, p. 106024, 1 abr. 2024.

GUNDOGAN, R.; KARACA, A. C. Physicochemical and functional properties of proteins isolated from local beans of Turkey. **LWT**, [s. l.], v. 130, p. 109609, ago. 2020.

GUYONY, V.; FAYOLLE, F.; JURY, V. High moisture extrusion of vegetable proteins for making fibrous meat analogs: A review. **Food Reviews International**, [s. l.], p. 1–26, 10 jan. 2022.

HAMA, F. et al. Changes in micro-and macronutrient composition of pearl millet and white sorghum during in field versus laboratory decortication. **Journal of Cereal Science**, [s. l.], v. 54, p. 425-433, 2011.

HELLEMANS, T. et al. Variation in amylose concentration to enhance wheat flour extrudability. **Journal of Cereal Science**, [s. l.], v. 95, p. 102992–102992, 1 set. 2020.

HEMMLER, D. et al. Insights into the Chemistry of Non-Enzymatic Browning Reactions in Different Ribose-Amino Acid Model Systems. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 8, n. 1, 15 nov. 2018.

HENSHAW, F. O. et al. Pasting properties of cowpea flour: Effects of soaking and decortication method. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s. l.], v. 44, n. 7, p. 1864-1870, 1996. DOI: 10.1021/jf950698d.

HOOVER, R. et al. Composition, molecular structure, properties, and modification of pulse starches: A review. **Food Research International**, [s. l.], v. 43, n. 2, p. 399-413, mar. 2010.

HOSOKAWAMICRON. **Basics of Classification Technology from Hosokawa**. [S. l.]: Hosokawa Micron, [2024]. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=wCalN9pAgDw&list=WL&index=13>. Acesso em: 28 jan. 2024.

HUANG, X. et al. Superfine grinding affects physicochemical, thermal and structural properties of Moringa Oleifera leaf powders. **Industrial Crops and Products**, v. 151, p. 112472, set. 2020.

HÜTTNER, E. K.; ARENDT, E. K. Recent advances in gluten-free baking and the current status of oats. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 21, n. 6, p. 303–312, jun. 2010.

IDELFONSO, Mateus Leal. **Moagem ultrafina de gipsita em moinhos a jato e planetário: um estudo comparativo**. 2023. 40 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia de Minas, Departamento de Engenharia de Minas, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/53150>. Acesso em: 22 jul. 2025.

ILO, S.; SCHOENLECHNER, R.; BERGHOF, E. Role of lipids in the extrusion cooking processes. **Grasas y Aceites**, [s. l.], v. 51, n. 1-2, p. 97–110, 30 abr. 2000.

KENDLER, C. et al. Effect of Oil Content and Oil Addition Point on the Extrusion Processing of Wheat Gluten-Based Meat Analogues. **Foods**, [s. l.], v. 10, n. 4, p. 697, 25 mar. 2021.

KIM, T. et al. The effect of cooling and rehydration methods in high moisture meat analogs with pulse proteins-peas, lentils, and faba beans. **Journal of Food Science**, [s. l.], v. 86, n. 4, p. 1322–1334, 24 mar. 2021.

KRISHNA KUMARI, S.; THAYUMANAVAN, B. **Plant Foods for Human Nutrition**, [s. l.], v. 53, n. 1, p. 47-56, 1998.

KUMAR, P. et al. Meat analogues: Health promising sustainable meat substitutes. **Critical reviews in food science and nutrition**, [s. l.], v. 57, n. 5, p. 923–932, 2017.

KYRIAKOPOULOU, K.; KEPPLER, J. K.; VAN DER GOOT, A. J. Functionality of Ingredients and Additives in Plant-Based Meat Analogues. **Foods**, [s. l.], v. 10, n. 3, p. 600, 12 mar. 2021.

LI, C. et al. Effect of germination on the structures and physicochemical properties of starches from brown rice, oat, sorghum, and millet. [S. l.], v. 105, p. 931-939, 1 dez. 2017.

LI, K. et al. Use of high-intensity ultrasound to improve emulsifying properties of chicken myofibrillar protein and enhance the rheological properties and stability of the emulsion. v. 98, p. 105275–105275, 1 jan. 2020.

LIN, M. J. Y.; HUMBERT, E. S.; SOSULSKI, F. W. CERTAIN FUNCTIONAL PROPERTIES OF SUNFLOWER MEAL PRODUCTS. *Journal of Food Science*, v. 39, n. 2, p. 368–370, mar. 1974.

LIN, S.; HUFF, H. E.; HSIEH, F. Extrusion Process Parameters, Sensory Characteristics, and Structural Properties of a High Moisture Soy Protein Meat Analog. **Journal of Food Science**, [s. l.], v. 67, n. 3, p. 1066–1072, abr. 2002.

LIN, S.; HUFF, H. E.; HSIEH, F. Texture and Chemical Characteristics of Soy Protein Meat Analog Extruded at High Moisture. **Journal of Food Science**, [s. l.], v. 65, n. 2, p. 264–269, mar. 2000.

LIU, K.; HSIEH, F.-H. Protein–Protein Interactions during High-Moisture Extrusion for Fibrous Meat Analogues and Comparison of Protein Solubility Methods Using Different Solvent Systems. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s. l.], v. 56, n. 8, p. 2681–2687, abr. 2008.

LIU, K.; ZHU, H.; ZHANG, Y. Effect of Mechanical Grinding on the Physicochemical, Structural, and Functional Properties of Foxtail Millet (*Setaria italica* (L.) P. Beauv) Bran Powder. **Foods**, [s. l.], v. 11, n. 17, p. 2688–2688, 3 set. 2022.

LUCAS et al. Physical and techno-functional properties of a common bean protein concentrate compared to commercial legume ingredients for the plant-based market. [S. l.], v. 137, p. 108351–108351, 1 abr. 2023.

MALAV, O. P. et al. Meat Analog: A Review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [s. l.], v. 55, n. 9, p. 1241–1245, 11 out. 2013.

MALLESHI, N.; DAODU, M.; CHANDRASEKHAR, A. Development of weaning food formulations based on malting and roller drying of sorghum and cowpea. **International Journal of Food Science and Technology**, [s. l.], v. 24, n. 5, p. 511-519, 1989.

PULIVARTHI, Manoj Kumar et al. Dry fractionation process operations in the production of protein concentrates: A review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, Hoboken, v. 22, n. 6, p. 4670-4697, 1 out. 2023.

MASKAN, M.; ALTAN, A. **Advances in food extrusion technology**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2012.

MOSHA, A. C.; SVANBERG, U. The Acceptance and Intake of Bulk-Reduced Weaning Foods: The Luganga Village Study. **Food and Nutrition Bulletin**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 1-6, mar. 1990.

NASROLLAHZADEH, F. et al. Effect of microwave and conventional heating on structural, functional and antioxidant properties of bovine serum albumin-maltodextrin conjugates through Maillard reaction. **Food Research International**, [s. l.], v. 100, p. 289-297, out. 2017.

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

OSEN, R. et al. Effect of high moisture extrusion cooking on protein-protein interactions of pea (*Pisum sativum*L.) protein isolates. **International Journal of Food Science & Technology**, [s. l.], v. 50, n. 6, p. 1390–1396, 9 mar. 2015.

OSEN, R. et al. High moisture extrusion cooking of pea protein isolates: Raw material characteristics, extruder responses, and texture properties. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 127, p. 67–74, abr. 2014.

PASCALLE J. M. PELGROM; MAARTEN A. I. SCHUTYSER; BOOM, R. M. Thermomechanical Morphology of Peas and Its Relation to Fracture Behaviour. **Food and Bioprocess Technology**, [s. l.], v. 6, n. 12, p. 3317–3325, 30 dez. 2012.

PASHA, I.; ANJUM, F. M.; MORRIS, C. F. Grain hardness: a major determinant of wheat quality. **Food Science and Technology International = Ciencia Y Tecnologia De Los Alimentos Internacional**, v. 16, n. 6, p. 511–522, 1 dez. 2010.

PELGROM, P. J. M. et al. Dry fractionation for production of functional pea protein concentrates. **Food Research International**, [s. l.], v. 53, n. 1, p. 232–239, ago. 2013.

PELGROM, P. J. M. et al. Pre- and post-treatment enhance the protein enrichment from milling and air classification of legumes. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 155, p. 53–61, jun. 2015.

PELGROM, P. J. M. et al. Preparation of functional lupine protein fractions by dry separation. **LWT - Food Science and Technology**, [s. l.], v. 59, n. 2, Part 1, p. 680–688, 1 dez. 2014.

PELGROM, P. J. M.; BOOM, R. M.; SCHUTYSER, M. A. I. Functional analysis of mildly refined fractions from yellow pea. **Food Hydrocolloids**, [s. l.], v. 44, p. 12–22, fev. 2015.

PELGROM, P. J. M.; BOOM, R. M.; SCHUTYSER, M. A. I. Method Development to Increase Protein Enrichment During Dry Fractionation of Starch-Rich Legumes. **Food and Bioprocess Technology**, [s. l.], v. 8, n. 7, p. 1495–1502, 8 abr. 2015.

PIETSCH, V. L. et al. High moisture extrusion of soy protein concentrate: Influence of thermomechanical treatment on protein-protein interactions and rheological properties. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 251, p. 11–18, jun. 2019.

PIETSCH, V. L. et al. High moisture extrusion of wheat gluten: Relationship between process parameters, protein polymerization, and final product characteristics. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 259, p. 3–11, out. 2019.

PIETSCH, V. L.; EMIN, M. A.; SCHUCHMANN, H. P. Process conditions influencing wheat gluten polymerization during high moisture extrusion of meat analog products. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 198, p. 28–35, abr. 2017.

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

PUNIA, S. et al. Pearl millet grain as an emerging source of starch: A review on its structure, physicochemical properties, functionalization, and industrial applications. **Carbohydrate Polymers**, v. 260, p. 117776, maio 2021.

RATNAYAKE, W. S.; NAGULESWARAN, S. Utilizing side streams of pulse protein processing: A review. **Legume Science**, [s. l.], 20 ago. 2021.

REN, W.; LIU, J.; YU, Y. Design of a rotor cage with non-radial arc blades for turbo air classifiers. **Powder Technology**, [s. l.], v. 292, p. 46-53, 1 maio 2016.

RIAZ, M. N. **Extruders in Food Applications**. [S. l.]: CRC Press, 2000.

RIAZ, M. N. **Soy Applications in Food**. [S. l.]: Informa, 2005.

RIAZ, M. N. Stability of Vitamins during Extrusion. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [s. l.], v. 49, n. 4, p. 361–368, 24 fev. 2009.

RIAZ, M. N. Texturized soy protein as an ingredient. In: **Proteins in Food Processing**. [S. l.: s. n.], 2004. p. 517–558.

ROONEY, L. W.; MILLER, F. R.; MERTIN, J. V. Variation in the structure and kernel characteristics of sorghum. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SORGHUM GRAIN QUALITY, 28., 1981. **Proceedings [...]**. [S. l.]: [s. n.], 1981. p. 143–162.

SADLER, L. Y. III; STANLEY, D. A.; BROOKS, D. R. Attrition mill operating characteristics. **Powder Technology**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 19-28, 1975.

SALDANHA DO CARMO, C. et al. Meat analogues from a faba bean concentrate can be generated by high moisture extrusion. **Future Foods**, [s. l.], v. 3, p. 100014, 2021.

SANDOVAL MURILLO, J. L. et al. Towards understanding the mechanism of fibrous texture formation during high-moisture extrusion of meat substitutes. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 242, p. 8–20, fev. 2019.

SANTOS, et al. Exploring starches from varied sorghum genotypes compared to commercial maize starch. **Journal of Food Process Engineering**, [s. l.], v. 46, n. 10, 26 dez. 2022.

SCANLON, M. G. et al. The critical role of milling in pulse ingredient functionality. **Cereal Foods World**, [s. l.], v. 63, p. 201–206, 2018.

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

SCHUTYSER, M. A. I. et al. Dry fractionation for sustainable production of functional legume protein concentrates. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 45, n. 2, p. 327–335, out. 2015.

SCHUTYSER, M. A. I.; VAN DER GOOT, A. J. The potential of dry fractionation processes for sustainable plant protein production. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 22, n. 4, p. 154–164, abr. 2011.

SHI, Z. H.; UTRACKI, L. A. Development of polymer blend morphology during compounding in a twin-screw extruder. Part I: Droplet dispersion and coalescence—A review. **Polymer Engineering and Science**, [s. l.], v. 32, n. 24, p. 1824–1835, dez. 1992.

SIBAKOV, J. et al. Lipid removal enhances separation of oat grain cell wall material from starch and protein. **Journal of Cereal Science**, [S. l.], v. 54, n. 1, p. 104–109, 1 jul. 2011.

SILVENTOINEN, P. et al. Use of air classification technology to produce protein-enriched barley ingredients. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 222, p. 169–177, abr. 2018.

SILVENTOINEN, P. et al. Biochemical and Techno-Functional Properties of Protein- and Fibre-Rich Hybrid Ingredients Produced by Dry Fractionation from Rice Bran. **Food and Bioprocess Technology**, New York, v. 12, n. 9, p. 1487–1499, 3 jul. 2019.

SINGH, S.; GAMLATH, S.; WAKELING, L. Nutritional aspects of food extrusion: a review. **International Journal of Food Science & Technology**, [s. l.], v. 42, n. 8, p. 916–929, ago. 2007.

SKYLAS, D. J. et al. Characterisation of Protein Isolates Prepared from Processed Mungbean (*Vigna radiata*) Flours. **Journal of Agricultural Science**, [s. l.], v. 9, n. 12, p. 1, 15 nov. 2017.

SKYLAS, D. J. et al. Optimised dry processing of protein concentrates from Australian pulses: A comparative study of faba bean, yellow pea and red lentil seed material. **Legume Science**, [s. l.], v. 5, n. 1, 13 out. 2022.

SOLAESA, Á. G. et al. Protein and lipid enrichment of quinoa (cv.Titicaca) by dry fractionation. Techno-functional, thermal and rheological properties of milling fractions. **Food Hydrocolloids**, [s. l.], v. 105, p. 105770–105770, 1 ago. 2020.

SOLMAZ TABTABAEI et al. Development and optimization of a triboelectrification bioseparation process for dry fractionation of legume flours. [S. l.], v. 163, p. 48-58, 11 maio 2016.

SRICHUWONG, S. et al. Physicochemical properties and starch digestibility of whole grain sorghums, millet, quinoa and amaranth flours, as affected by starch and non-starch constituents. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 233, p. 1-10, out. 2017.

Sruthi, N.U., RAO, P.S., RAO, B.D. Decortication induced changes in the physico-chemical, anti-nutrient, and functional properties of sorghum. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 102, p. 104031, set. 2021.

SUMNER, A. K. et al. Composition and properties of pearled and fines fractions from hulled and hull-less barley. **Cereal Chemistry**, [s. l.], v. 62, p. 112-116, 1985.

SUN, P. L. et al. The Experimental Study about the Influence of Extrusion System Parameters on Textured Degree of High Moisture Content Fibriform Imitated Meat. **Advanced Materials Research**, [s. l.], v. 188, p. 250–253, mar. 2011.

TABTABAEI, S. et al. Functional properties of navy bean (*Phaseolus vulgaris*) protein concentrates obtained by pneumatic tribo-electrostatic separation. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 283, p. 101–110, jun. 2019.

TANG, H.; WATANABE, K.; MITSUNAGA, T. Structure and functionality of large, medium and small granule starches in normal and waxy barley endosperms. *Carbohydrate Polymers*, v. 49, n. 2, p. 217–224, ago. 2002.

THADAVATHI, Y. L. N.; WASSÉN, S.; KÁDÁR, R. In-line rheological and microstructural characterization of high moisture content protein vegetable mixtures in single screw extrusion. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 245, p. 112–123, mar. 2019.

TAYLOR, J. R. N. Millet Pearl: Overview. **Encyclopedia of Food Grains**, p. 190–198, 2016.

TOLSTOGUZOV, V. B. Thermoplastic extrusion-the mechanism of the formation of extrudate structure and properties. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, [s. l.], v. 70, n. 4, p. 417–424, 1 abr. 1993.

TOLSTOGUZOV, V. Texturising by phase separation. **Biotechnology Advances**, [s. l.], v. 24, n. 6, p. 626–628, nov. 2006.

TYLER, R. T. Impact Milling Quality of Grain Legumes. **Journal of Food Science**, [s. l.], v. 49, n. 3, p. 925–930, maio 1984.

U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **FoodData Central**. [S. l.]: U.S. Department of Agriculture, [2024?]. Disponível em: <https://fdc.nal.usda.gov/>. Acesso em: 28 jan. 2024.

VERBEEK, C. J. R.; VAN DEN BERG, L. E. Extrusion Processing and Properties of Protein-Based Thermoplastics. **Macromolecular Materials and Engineering**, [s. l.], v. 295, n. 1, p. 10–21, 18 jan. 2010.

VOGELSANG-O'DWYER, M. et al. Comparison of Faba Bean Protein Ingredients Produced Using Dry Fractionation and Isoelectric Precipitation: Techno-Functional, Nutritional and Environmental Performance. **Foods (Basel, Switzerland)**, [s. l.], v. 9, n. 3, 11 mar. 2020.

WANG, J. et al. Dietary fibre enrichment from defatted rice bran by dry fractionation. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 186, p. 50-57, out. 2016.

WANG, N.; MAXIMIUK, L. Effect of air classification processing variables on yield, composition, and certain antinutrients of air-classified fractions from field peas by response surface methodology. **Journal of Food Processing and Preservation**, [s. l.], v. 43, n. 7, 14 maio 2019.

WANI, I. A. et al. Physico-chemical and functional properties of native and hydrolyzed kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.) protein isolates. **Food Research International**, [s. l.], v. 76, p. 11-18, out. 2015.

WELLENKAMP, Franz-Josef. **Moagens fina e ultrafina de minerais industriais: uma revisão**. Rio de Janeiro: CETEM, 1999. (Série Tecnologia Mineral, 75). Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/124>. Acesso em: 22 jul. 2025.

WEY Y., ZHAO D., KANG L., ZHANG B. Effects of Process Parameters on Products Characteristics of Textural Soy Protein. **Chin. J. Grain Oil**, [s. l.], n. 24, p. 20–25, 2009.

WILD, F. The evolution of a plant-based alternative to meat: From niche markets to widely accepted meat alternatives. **Agro Food Industry Hi-Tech**, [s. l.], v. 25, n. 1, p. 45–49, fev.

WITTEK, P.; KARBSTEIN, H. P.; EMIN, M. A. Blending Proteins in High Moisture Extrusion to Design Meat Analogues: Rheological Properties, Morphology Development and Product Properties. **Foods**, [s. l.], v. 10, n. 7, p. 1509, 30 jun. 2021.

WOLZ, M.; KASTENHUBER, S.; KULOZIK, U. High moisture extrusion for microparticulation of whey proteins –Influence of process parameters. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 185, p. 56–61, set. 2016.

WU, M. et al. Dynamic mechanical properties and fractal analysis of texturized soybean protein/wheat gluten composite produced by high moisture extrusion. **International Journal of Food Science & Technology**, [s. l.], v. 54, n. 2, p. 499–508, 24 set. 2019.

WU, S. Formation of dispersed phase in incompatible polymer blends: Interfacial and rheological effects. **Polymer Engineering and Science**, [s. l.], v. 27, n. 5, p. 335–343, 1 mar. 1987.

YASIR, S. et al. The impact of Maillard cross-linking on soy proteins and tofu texture. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 104, n. 4, p. 1502–1508, 2007.

YILMAZ, E.; EMIR, D. D. Extraction and Functional Properties of Proteins from Pre-roasted and Enzyme Treated Poppyseed (*Papaver somniferum* L.) Press Cakes. **Journal of Oleo Science**, [s. l.], v. 65, n. 4, p. 319–329, 2016.

ZHANG, B. et al. The effects of screw configuration on the screw fill degree and special mechanical energy in twin-screw extruder for high-moisture texturised defatted soybean meal. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 157, p. 77–83, jul. 2015.

ZHANG, J. et al. Changes in conformation and quality of vegetable protein during texturization process by extrusion. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [s. l.], v. 59, n. 20, p. 3267–3280, 12 jul. 2018.

ZHANG, J. et al. High-moisture extrusion of peanut protein-/carrageenan/sodium alginate/wheat starch mixtures: Effect of different exogenous polysaccharides on the process forming a fibrous structure. **Food Hydrocolloids**, [s. l.], v. 99, p. 105311, fev. 2020.

ZHANG, W. et al. Relationships between the gelatinization of starches and the textural properties of extruded texturized soybean protein-starch systems. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 174, p. 29–36, abr. 2016.

ZHANG, Z. et al. High-moisture Extrusion Technology Application in the Processing of Textured Plant Protein Meat Analogues: A Review. **Food Reviews International**, [s. l.], p. 1–36, 7 fev. 2022.

ZHENG, H.-G. et al. Preparation of soluble soybean protein aggregates (SSPA) from insoluble soybean protein concentrates (SPC) and its functional properties. **Food Research International**, [s. l.], v. 41, n. 2, p. 154–164, jan. 2008.

ZHU, H.-G. et al. Optimization of the powder state to enhance the enrichment of functional mung bean protein concentrates obtained by dry separation. **Powder Technology**, [s. l.], v. 373, p. 681–688, 1 ago. 2020.