



MOAGEM E AEROCLASSIFICAÇÃO DE MILHETO PÉROLA INTEGRAL, BRUNIDO E GERMINADO: IMPACTO NA DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DE PARTÍCULA E DENSIDADE

Alexander F. BRITO¹; Carlos W. P. DE CARVALHO²; José L. R. ASCHERI²

¹Doutorando, Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos/Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ)

²Pesquisador, Embrapa Agroindústria de Alimentos

*E-mail para correspondência: alexanderferreirabrito@ufrj.br

RESUMO: No presente trabalho, foram produzidas farinhas de milho pérola (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.), a partir de grãos integrais, não tratados, bem como de grãos submetidos aos pré-tratamentos de brunimento e germinação, por moagem e posterior aeroclassificação das farinhas, visando sua separação em duas frações de granulometrias selecionadas e características físicas diferenciadas para aplicação na formulação de alimentos. Os produtos foram analisados quanto ao seu tamanho de partícula e densidade, para avaliar os impactos do processamento e dos pré-tratamentos nas características físicas dos ingredientes alimentícios obtidos e sua potencial aplicação. As frações apresentaram distribuição de partícula mais uniforme comparadas as farinhas oriundas da moagem, reforçando o caráter seletivo da aeroclassificação. Grãos brunidos apresentaram farinhas de menores tamanhos de partícula comparados aos integrais e germinados. Ambos os pré-tratamentos resultaram em farinhas com maior capacidade de compactação frente à farinha não tratada. Tais resultados mostram que o processo de moagem seguida de aeroclassificação é capaz de produzir farinhas com características físicas que podem ser moduladas – em especial quando associadas aos pré-tratamentos de brunimento e germinação – favorecendo operações unitárias na produção de ingredientes alimentícios para fins específicos.

Palavras-chave: milho pérola; aeroclassificação; sustentabilidade; brunimento; germinação.

INTRODUÇÃO

Formular alimentos a partir de farinhas de cereais impõe desafios relacionados à seleção das matérias-primas e ao uso racional dos recursos durante o processamento, buscando alimentos nutritivos, sensorialmente agradáveis e não alergênicos. Fontes tradicionais como o trigo não atendem a um ou mais desses critérios, abrindo caminho para fontes alternativas como o milho pérola (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.), o qual segundo Taylor et al. (2016), é adaptado a condições climáticas adversas, não contém glúten e apresenta baixo índice glicêmico. A aplicação de pré-tratamentos nos grãos antes da moagem pode causar alterações favoráveis nas suas propriedades físicas. Entre os métodos amplamente utilizados para cereais, o brunimento ou decorticação é o processo mecânico que remove parcial ou totalmente o pericarpo e o gérmen do grão por abrasão, o que pode facilitar a moagem. Outro método relevante é a germinação, que envolve a hidratação e incubação dos grãos sob condições controladas de temperatura e umidade. Obadina et al. (2016) reportaram que, durante esse processo, enzimas provocam transformações bioquímicas que afetam positivamente as propriedades tecnológicas dos grãos. O grau de moagem define as características físicas da farinha, a qual pode ainda ser separada em frações com base no tamanho e densidade das partículas pelo processo de aeroclassificação, modulando a granulometria para favorecer as operações unitárias na formulação de produtos, como panificados e massas alimentícias. Portanto, no presente trabalho foi estudado o processo de moagem e de aeroclassificação do milho pérola integral, brunido

e germinado, como estratégia para modular as propriedades físicas como distribuição de tamanho de partículas e densidade das farinhas, avaliando-se seu uso potencial como ingrediente funcional e sustentável na indústria de alimentos.

MATERIAL E MÉTODOS

Grãos de milho pérola (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.), híbrido ADRg 9070 doados pela empresa Atto Sementes (Rondonópolis, Brasil), foram previamente limpos em separador de sementes a ar Cipper Office Tester (AT Ferrell Company Inc., Bluffton, EUA). Parte dos grãos integrais foi reservado e outra parte seguiu para os pré-tratamentos de brunimento e germinação. O brunimento foi realizado em um equipamento industrial de beneficiamento de arroz MT-97, nº 3788-5, (Suzuki, Santa Cruz do Rio Pardo, Brasil), utilizando somente a seção de rolos abrasivos, com taxa de alimentação de 150 g por 10 min. Para o processo de germinação, os grãos foram imersos previamente em água (1:3 p/v) por 30 min, drenados e dispostos em bandejas de aço inoxidável em uma câmara de fermentação (National Mfg. Co., Lincoln, EUA) com temperatura controlada ($30 \pm 2^\circ\text{C}$) e umidade relativa (90%) por 8 h. Posteriormente foram secos a 55°C em estufa de circulação de ar. A moagem foi conduzida no equipamento modular Lab Compact Plus (NETZSCH, Pomerode, Brasil), equipado com uma unidade de moagem e classificação integrada CSM 50. Os parâmetros operacionais foram: taxa de alimentação de 6,7 kg/h, velocidade do disco de moagem de 8000 rpm, velocidade do classificador de 5000 rpm e fluxo de ar de 200 m³/h. Parte das farinhas foi reservada e outra parte seguiu para a aeroclassificação, realizada no mesmo equipamento, configurado com a unidade de classificação a ar CFS 5-HD/S (NETZSCH, Pomerode, Brasil), com taxa de alimentação de 3,4 kg/h, velocidade do classificador de 7000 rpm e fluxo de ar de 200 m³/h, gerando duas frações, uma grosseira e outra fina, para cada farinha alimentada. A distribuição de tamanho de partículas (PSD) foi determinada por difração a laser no equipamento 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 (2000). A partir dos valores obtidos, foram calculadas a razão percentual de quebra da parede celular (Φ) e a amplitude de distribuição, conforme equações (1) e (2) abaixo, respectivamente:

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

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

Onde os valores de D_{10} , D_{50} e D_{95} representam o tamanho de partícula sob o qual estão 10%, 50% e 95% da distribuição. A densidade absoluta foi feita em duplicata por picnometria a gás hélio no equipamento AccuPyc II 1340 (Micromeritics, Norcross, EUA), conforme metodologia descrita por Bernardo et al. (2018). As densidades aparente e volumétrica foram obtidas por métodos volumétricos padrão, utilizando proveta graduada e balança, em triplicata. 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 ($p < 0,05$), utilizando o software STATISTICA, versão 7.0 (StatSoft, Inc., Tulsa, USA).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas de distribuição (PSD) são exibidas na Figura 1 e os dados numéricos, na Tabela 1.

Figura 1: Distribuição de tamanho partícula das farinhas e frações de milho pérola.

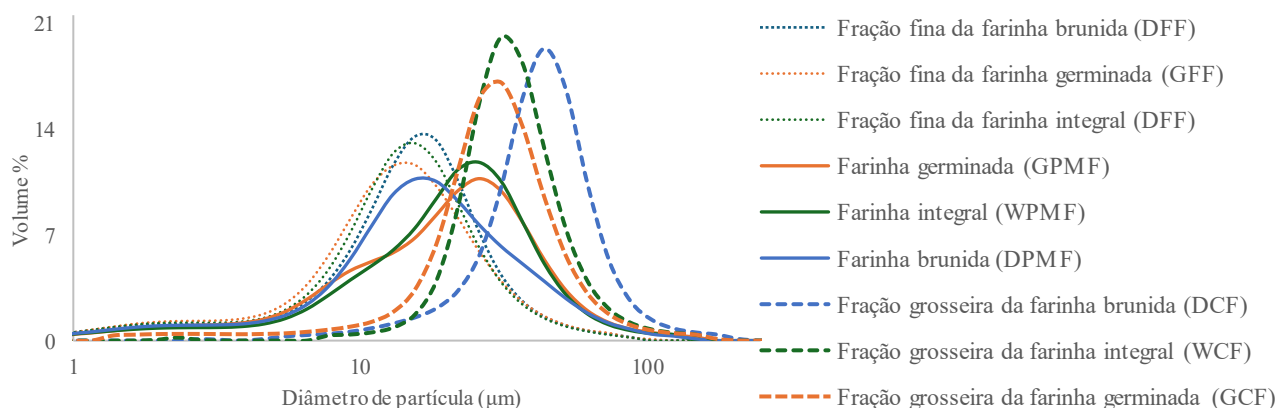


Tabela 1: Distribuição de tamanho partícula (PSD), amplitude de distribuição, razão de quebra da parede celular Φ (%) e área superficial específica (m^2/g) das farinhas e das frações.

	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
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

A amplitude da distribuição é maior nas farinhas em relação as frações. O tamanho de partícula diminui na ordem: frações grosseiras, farinhas e frações finas. O brunimento resultou em uma farinha comparativamente mais fina, devido à remoção parcial do pericarpo, que reduz a resistência ao cisalhamento durante a moagem. As frações germinadas têm menor D50, o que pode ser devido à hidrólise enzimática sobre os grânulos de amido. A razão de quebra (Φ) e a área superficial específica (SSA) aumentam com a redução do D50, devido a moagens mais intensas, influenciando propriedades de superfície. A densidade das amostras é mostrada na Tabela 2.

Tabela 2: Densidade absoluta, aparente e volumétrica das farinhas e frações de milho pérola. Diferentes letras (a, b, c) indicam diferenças significativas entre os valores em uma mesma linha.

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

WCF: fração grosseira integral, WPMF: farinha integral, GCF: fração grosseira germinada, DPMF: farinha brunida, DCF: fração grosseira brunida, WFF: fração fina integral, GPMF: farinha germinada, DFF: fração fina brunida e GFF: fração fina germinada. A densidade absoluta é a massa por unidade de volume sólido, excluindo espaços porosos. Já a densidade aparente considera os

espaços entre partículas, sendo relevante para o armazenamento, empacotamento e comportamento de escoamento. A densidade volumétrica representa condições de empacotamento padrão, sendo relevante para dimensionamento de silos, misturadores e sistemas de dosagem. Os três tipos de densidade aumentaram conforme o aumento do tamanho de partícula, pois as frações grosseiras possuem maior densidade, seguidas das farinhas e frações finas. Tais resultados são esperados, pois o processo de separação por aeroclassificação se baseia na densidade e no tamanho das partículas. O pré-tratamento influenciou, uma vez que a densidade absoluta foi maior nos produtos integrais, seguido dos brunidos e dos germinados. Porém as farinhas não classificadas dos grãos brunidos e germinados apresentam densidades aparente e volumétrica maiores do que dos integrais. Uma vez que as densidades aparente e volumétrica consideram espaços vazios entre as partículas e sua capacidade de empacotamento nesses espaços, respectivamente, seu aumento sugere maior porosidade e capacidade de compactação. A porosidade pode ser atribuída à hidrólise enzimática do pré-tratamento de germinação e pelo maior índice de quebra da parede celular das amostras brunidas na moagem. Logo, é possível melhorar a capacidade de compactação das farinhas aplicando os pré-tratamentos associados à moagem.

CONCLUSÃO

Conclui-se que a associação do processamento por moagem seguida de aeroclassificação é uma estratégia eficaz para o controle das propriedades físicas das farinhas e frações produzidas a partir de milho pérola, especialmente quando associadas aos pré-tratamentos de brunimento e germinação, os quais influenciam a distribuição de tamanho das partículas obtidas (PSD), o percentual de quebra, a área superficial específica e a densidade. Dessas propriedades decorrem o comportamento desses ingredientes durante as etapas de formulação de produtos alimentícios, como sua solubilidade, propriedades de mistura, características de fluxo e armazenamento. Portanto, ingredientes alimentícios modulados para finalidades específicas podem ser produzidos pelas metodologias propostas.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio financeiro da FAPERJ E-26/204.070/2024. e os autores são gratos pelas bolsas recebidas da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e do CNPq.

REFERÊNCIAS

- OBADINA, A. et al. Nutritional and physico-chemical properties of flour from native and roasted whole grain pearl millet (*Pennisetum glaucum* [L.]R. Br.). **Journal of Cereal Science**, [s.l.], v. 70, p. 247–252, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.06.005>
- TAYLOR, J.R.N.. Millet Pearl: Overview. **Encyclopedia of Food Grains**. [s.l.]: Elsevier, 2016 p. 190–198. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394437-5.00011-5>
- 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, 1700185, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/star.201700185>