

## Análise comparativa da distribuição granulométrica de grãos moídos em moinho de bolas e moinho de martelos.

Análisis comparativo de la distribución granulométrica de granos molidos en molino de bolas y molino de martillos.

Stefanie Bonilla Bermeo<sup>1\*</sup>; Fernando Noblecilla Arévalo<sup>2</sup>; Iván Torres Tapia<sup>3</sup>; Carlos Valdiviezo Rogel<sup>4</sup>

Recebido: 25/10/2025 – Aceite: 05/12/2025 – Publicado: 01/01/2026

Artigos de  
Investigação



Artigos de  
Revisão



Artigos de  
Ensaio



\* Autor  
correspondente.



Esta obra está licenciada sob uma licença internacional Creative Commons Atribuição-NãoComercial-Partilha Igual 4.0 (CC BY-NC-SA 4.0). Os autores mantêm os direitos sobre os seus artigos e podem partilhar, copiar, distribuir, executar e comunicar publicamente a obra, desde que a autoria seja reconhecida, não utilizada para fins comerciais e que a mesma licença seja mantida em obras derivadas.

### Resumo.

A moagem de grãos é fundamental em processos industriais, onde a distribuição granulométrica resultante afeta diretamente a qualidade do produto. O objetivo foi comparar a distribuição granulométrica do milho e da soja processados em moinho de martelo, moinho de bolas e sua combinação. Amostras de milho e soja foram moídas utilizando três configurações: moinho de martelo, moinho de bolas e a sequência de ambos. O material obtido foi peneirado, determinando-se as percentagens retidas por malha e calculando-se os diâmetros característicos (D10, D50, D90). Além disso, foi realizada uma análise microscópica das partículas e ANOVA para avaliar diferenças significativas. O moinho de martelo produziu distribuições grossas e heterogêneas, especialmente na soja (D50  $\approx$  2,9 mm). O moinho de bolas gerou uma maior percentagem de finos no milho (D50  $\approx$  1,38 mm), mas foi ineficaz para a soja (D50  $\approx$  3,53 mm). A combinação de moinhos alcançou a distribuição mais uniforme para ambos os grãos (D50  $\approx$  1,05-1,25 mm). A ANOVA não detectou diferenças globais significativas, embora tenham sido observadas disparidades morfológicas e de distribuição na análise por peneiras. A combinação de moinhos otimizou a distribuição granulométrica, superando as limitações de cada equipamento separadamente.

### Palavras-chave.

Distribuição do tamanho das partículas, moinho de martelo, moinho de bolas, moinho de milho, moinho de soja.

### Resumen.

La molienda de granos es fundamental en procesos industriales, donde la distribución granulométrica resultante incide directamente en la calidad del producto. El objetivo fue comparar la distribución granulométrica de maíz y soja procesados en molino de martillo, molino de bolas y su combinación. Se molieron muestras de maíz y soja utilizando tres configuraciones: molino de martillo, molino de bolas y la secuencia de ambos. El material obtenido se tamizó, determinándose los porcentajes retenidos por malla y calculándose los diámetros característicos (D10, D50, D90). Adicionalmente, se realizó análisis microscópico de partículas y ANOVA para evaluar diferencias significativas. El molino de martillo produjo distribuciones gruesas y heterogéneas, especialmente en soja (D50  $\approx$  2.9 mm). El molino de bolas generó un mayor porcentaje de finos en maíz (D50  $\approx$  1.38 mm), pero fue ineficaz para soja (D50  $\approx$  3.53 mm). La combinación de molinos logró la distribución más uniforme para ambos granos (D50  $\approx$  1.05-1.25 mm). El ANOVA no detectó diferencias significativas globales, aunque se observaron disparidades morfológicas y de distribución en el análisis por tamices. La combinación de molinos optimizó la distribución granulométrica, superando las limitaciones de cada equipo por separado.

### Palabras clave.

Distribución granulométrica, Molino de martillo, Molino de bolas, Molienda de maíz, Molienda de soja.

## 1. Introdução

A redução do tamanho das partículas é um processo implementado em várias indústrias, que consiste em reduzir a dimensão física dos materiais sólidos através da aplicação de forças mecânicas. Este processo é essencial em operações como mistura, secagem, sinterização e reações químicas, onde o tamanho das partículas pode influenciar a velocidade e uniformidade do processo. Equipamentos comuns para redução de tamanho incluem moinhos de bolas, moinhos de martelo, trituradores de mandíbulas e moinhos de roletes. A escolha do equipamento certo depende das propriedades do material e do tamanho desejado da partícula, sendo um fator crítico para a otimização dos processos industriais. [1]

Além disso, a distribuição de partículas desempenha um papel fundamental, pois afeta diretamente a qualidade e as

propriedades do produto final, como o fluxo, a compactação e a dissolução. A análise do tamanho das partículas é uma técnica essencial para avaliar a distribuição do tamanho das partículas num material pulverizado, e o crivo é um dos equipamentos mais amplamente utilizados para este fim. A precisão na classificação de partículas é vital para garantir a consistência do produto. [2]

A moagem e a redução de tamanho não só aumentam a área superficial específica dos materiais, como também melhoram a sua reatividade e facilitam processos a jusante como dissolução, extração de compostos de interesse e homogeneização em misturas. Na indústria alimentar, por exemplo, o controlo adequado do tamanho das partículas ajuda a otimizar a textura, solubilidade e biodisponibilidade dos nutrientes, enquanto na indústria

<sup>1</sup> Universidade de Guayaquil / [stefanie.bonillab@ug.edu.ec](mailto:stefanie.bonillab@ug.edu.ec); <https://orcid.org/0000-0002-9391-3698>, Guayaquil; Equador.

<sup>2</sup> Investigador Independente/ [fernandoanoblex18@gmail.com](mailto:fernandoanoblex18@gmail.com); <https://orcid.org/0009-0005-1898-8373>, Guayaquil; Equador.

<sup>3</sup> Investigador Independente/ [ivanalejo17@gmail.com](mailto:ivanalejo17@gmail.com); <https://orcid.org/0009-0008-9193-0524>, Guayaquil; Equador.

<sup>4</sup> Universidade de Guayaquil / [carlos.valdiviezor@ug.edu.ec](mailto:carlos.valdiviezor@ug.edu.ec); <https://orcid.org/0000-0002-6550-975>, Guayaquil, Equador.

farmacêutica a uniformidade do tamanho das partículas é fundamental para garantir a dosagem e a liberação controlada dos ingredientes ativos. [3]

No campo dos materiais de construção e mineração, a eficiência de equipamentos de cominuição, como moinhos de bolas e moinhos de martelo, tem um impacto direto no consumo de energia e nos custos operacionais. Estima-se que até 50% da energia total utilizada numa planta de processamento mineral corresponde a operações de moagem, o que torna a seleção de equipamentos e a otimização do tamanho das partículas fatores estratégicos para a sustentabilidade do processo. Além disso, a redução excessiva de partículas pode levar a perdas de material devido à formação de finos, afetando a eficiência global do sistema. [4]

O moinho de martelo é um dos equipamentos mais utilizados para redução do tamanho do grão devido à sua simplicidade de design, baixo custo e elevada capacidade de processamento. O seu princípio de funcionamento baseia-se no impacto repetido dos martelos rotativos sobre as partículas, o que gera fraturas rápidas e produz materiais com um tamanho de partícula relativamente heterogêneo. Este tipo de moinho é amplamente utilizado na indústria alimentar e para rações, pois permite processar cereais como milho, trigo e soja de forma eficiente, embora tenha a desvantagem de gerar um maior teor de finos e poeira. [5]

Por outro lado, o moinho de esferas funciona segundo o princípio do impacto e fricção, onde esferas de aço ou outro material de moagem rodam dentro de um tambor cilíndrico, causando a redução gradual do tamanho das partículas. Ao contrário do moinho de martelo, este equipamento permite uma distribuição mais controlada e fina das partículas, com menos variabilidade de tamanho. Os moinhos de bolas são amplamente utilizados nas indústrias mineira, cerâmica e farmacêutica, bem como na investigação de novos materiais, embora exijam um consumo de energia mais elevado e tempos de funcionamento mais longos em comparação com os moinhos de martelo. [6]

A análise do tamanho das partículas por peneira, difração a laser ou outros métodos modernos é utilizada como ferramenta de controlo de qualidade para estabelecer a distribuição de tamanho nos produtos processados. A técnica de peneiração, embora tradicional, continua a ser uma das mais amplamente utilizadas devido ao seu baixo custo, simplicidade e reprodutibilidade em comparação com métodos mais sofisticados. A informação obtida destas análises permite estabelecer correlações entre a distribuição das partículas e o comportamento do material nos processos subsequentes, garantindo a uniformidade do produto final e contribuindo para a otimização da cadeia de produção. [7]

A escolha entre um moinho de martelo e um moinho de bolas depende em grande parte do material a processar e das propriedades desejadas no produto final. Para grãos, o moinho de martelo é preferido pela sua rapidez e eficiência em grandes volumes, enquanto o moinho de esferas é mais adequado quando é necessária moagem fina e uniforme. Ambos os equipamentos desempenham um papel fundamental na otimização dos processos industriais, e a sua comparação do ponto de vista da distribuição do tamanho das partículas permite-nos identificar vantagens competitivas e áreas de melhoria na redução do tamanho das partículas. Neste contexto, é pertinente destacar a importância da moagem em cereais amplamente utilizados, como o milho e a soja, cujo processamento responde não só a fins industriais, mas também à otimização da qualidade nutricional e funcional dos produtos derivados. [8][9]

Apesar do uso generalizado de moinhos de martelo e bolas em diferentes indústrias, ainda existem lacunas na compreensão comparativa da sua eficiência na redução do tamanho e na distribuição final de partículas de cereais como o milho e a soja. Embora ambos os equipamentos desempenhem funções semelhantes, diferenças no seu princípio de funcionamento, consumo de energia e uniformidade do produto podem influenciar significativamente a qualidade e utilização dos cereais processados. Estudos recentes destacaram que parâmetros de moagem, como a velocidade de rotação, a carga da bola ou a abertura do ecrã, têm um impacto direto na distribuição das partículas e na qualidade nutricional do produto final. A investigação comparativa demonstrou que os moinhos de martelos tendem a gerar partículas mais irregulares e um maior teor de finos, enquanto os moinhos de esferas produzem distribuições mais homogêneas, embora com maior consumo de energia e tempo de operação. No entanto, a maioria destes estudos concentrou-se em grãos individuais ou em condições experimentais específicas, pelo que é necessária uma análise mais abrangente que relacione tanto o equipamento sob condições controladas como comparáveis. Desta forma, a presente investigação procura fornecer evidências quantitativas e atualizadas que permitam orientar decisões técnicas e económicas no processamento do milho e da soja, reforçando a base científica para a seleção do sistema de moagem mais eficiente. [10][11]

No caso de cereais como o milho e a soja, amplamente utilizados na indústria alimentar e de rações, a moagem desempenha um papel fundamental na melhoria das suas propriedades funcionais e nutricionais. No milho, o controlo do tamanho das partículas influencia a digestibilidade do amido e a qualidade de produtos derivados, como farinha e cereais, enquanto na soja determina a disponibilidade de proteínas e lípidos, além de facilitar a sua incorporação em formulações equilibradas para alimentação animal. Estudos demonstraram que a redução adequada do tamanho das partículas nestes grãos

não só otimiza o desempenho dos processos de extração e a digestibilidade, como também impacta o [12]Eficiência energética da moagem e na qualidade final do produto. [13]

Estudos anteriores têm limitações específicas que exigem atenção. Por exemplo, a investigação mostrou que, na moagem de milho, a energia específica necessária varia consideravelmente consoante a fração do material (grão, resto, corda), o que sugere que os dados não podem ser extrapolados diretamente para cereais comerciais processados. Outro estudo mostrou que a combinação de moinhos (martelos + roletes) melhora a uniformidade da distribuição de partículas, mas não compara diretamente moinhos de martelo com moinhos de bolas em cereais como milho ou soja. No campo da moagem de bolas, um estudo analisou como o diâmetro do meio afeta a eficiência da moagem, mas na mineralização, não nos cereais agrícolas, o que deixa uma lacuna no conhecimento aplicável ao setor alimentar. Consequentemente, não existe uma comparação direta, sob condições controladas dos cereais alimentares (milho e soja), entre moinhos de martelo e moinhos de bolas, que quantifique simultaneamente a uniformidade do tamanho das partículas, o consumo de energia e a sua ligação com funcionalidades nutricionais ou procedimentais. Esta lacuna confere relevância e urgência à investigação atual, destinada a garantir uma seleção técnica sólida do sistema de moagem mais adequado para a sua aplicação industrial.[14][15][16]

Estudos recentes indicam que a fresagem por martelo pode representar até 50% do consumo total de eletricidade de uma central elétrica. Por outro lado, a investigação em biomassa mostra que a energia específica necessária para a redução de tamanho pode variar entre 35–65 kJ/kg, Depende do tipo de material e das condições de moagem. Além disso, análises com modelos empíricos indicam que a energia necessária nos moinhos de bolas pode variar entre [17]~3–12 kW·h·t<sup>-1</sup> Dependendo da dureza e do tamanho desejado do produto. Portanto, a seleção incorreta do tipo de moinho não só afeta a qualidade da moagem e a uniformidade do tamanho das partículas, como também pode aumentar consideravelmente o [18]Custos operacionais e o Consumo de energia, impactando a viabilidade e competitividade do processo industrial.

Portanto, o objetivo deste estudo é realizar uma análise comparativa da distribuição do tamanho das partículas dos cereais moídos em moinhos de bolas e moinhos de martelo, considerando a sua aplicação no processamento de matérias-primas como milho e soja. Esta análise procura estabelecer relações entre o tipo de equipamento, as condições de moagem e a uniformidade das partículas obtidas, de modo a fornecer critérios técnicos que orientem a seleção do sistema de redução de tamanho com base na eficiência e qualidade do produto final.

#### 1.1. Moagem

A moagem é uma operação unitária responsável por reduzir o tamanho das partículas para atingir o tamanho necessário para um processo específico, aumentando assim a superfície de contacto do material para maior eficiência no processo industrial. Esta redução é realizada dividindo ou fracionando a amostra por meios mecânicos até atingir o tamanho necessário.

Para a Engenharia Química é essencial compreender as leis que regem a desintegração em relação ao consumo de energia (tempo), as características da matéria e o tipo de máquinas a utilizar; isto demonstra o estudo baseado em deduções e observações empíricas. [1]

##### 1.1.1. Tipos de moagem

Diferentes tipos de moinhos, como o moinho de bolas e o moinho de martelos, têm mecanismos de ação e eficiência distintos; os moinhos de bolas são eficientes para moagem fixa e o moinho de martelo é mais para materiais frágeis. [19]

##### 1.2. Peneirado

O método de peneiramento envolve a utilização de uma série de peneiras com diferentes aberturas para separar as partículas do solo de acordo com o seu tamanho [20]

##### 1.3. Análise granulométrica por peneiramento

É a separação em tamanho de um conjunto de partículas sólidas de acordo com uma escala de tamanho de partícula. Esta separação é feita com peneiras colocadas em série, de modo que a peneiração da primeira peneira é a alimentação da segunda, e assim sucessivamente. [21]

Alimentação para a peneira (F): É a massa total que chega à peneira para ser separada ou classificada.

Retido (R): É a massa que permanece na superfície do crivo.

Peneiramento (C): É a massa que passa pelas aberturas da peneira, ou seja, que atravessa a sua superfície.

##### 1.4. Distribuição do Tamanho das Partículas

A distribuição do tamanho das partículas descreve a proporção de diferentes tamanhos de partículas presentes numa amostra. É essencial caracterizar o comportamento dos materiais em vários processos industriais. [22]

##### 1.5. Curvas granulométricas

As curvas de tamanho de partícula são representações gráficas que mostram a distribuição do tamanho das partículas numa amostra. Estas curvas são essenciais para compreender a distribuição e previsibilidade do comportamento dos materiais. [23]

#### 2. Materiais e métodos.

Foram realizados testes de moagem com dois tipos de cereais (milho e soja) para avaliar a granulometria que podia ser obtida através da moagem nos moinhos de

esferas e de martelo. Trabalhámos com uma rosa RBN modelo de moinho de martelos, com 20 martelos com barra fundida e 4 eixos, bem como com um laminador tubular de esferas de aço descontínuo, de câmara única, com descarga por grelha. A calibração do equipamento de moagem e peneira foi realizada antes dos testes, verificando que todos os componentes: câmara, corpos de moagem, crivos e malha estavam dentro das suas especificações dimensionais e mecânicas, garantindo condições reprodutíveis entre as réplicas. Um conjunto de crivos certificados segundo normas equivalentes à ASTM E11 / ISO 3310 foi utilizado para peneiramento, e a uniformidade das aberturas foi verificada com métodos de calibração em malha de acordo com os procedimentos recomendados na literatura para garantir a precisão e minimizar erros de classificação. Seguem-se os estudos de caso avaliados:

**Caso 1.** Moinho de martelo e peneiração, fig. 1.

**Caso 2.** Moagem e peneiração por moinho de bolas, fig. 2.

**Caso 3.** Moagem num moinho de martelo, seguida pelo moinho de bolas e peneiração, fig. 3.

Depois de realizados os três casos, foi utilizado um microscópio (Digital Microscope USB) para examinar a geometria obtida em cada tipo de moagem.

O protocolo de amostragem foi estabelecido seguindo critérios de representatividade e homogeneidade recomendados para estudos de granulometria em matrizes agrícolas. Para cada tratamento de moagem, as amostras eram recolhidas imediatamente após a descarga do equipamento, utilizando o método manual de quarteamento para reduzir o volume e garantir que a fração analisada mantinha a distribuição original do lote. Este procedimento é amplamente utilizado em estudos de moagem devido à sua eficácia em minimizar os vieses de segregação de tamanho e densidade, especialmente em cereais como o milho e a soja. Pesquisas recentes enfatizam que a homogeneização correta e a redução do tamanho do lote são essenciais para garantir a reprodutibilidade da distribuição do tamanho das partículas, uma vez que variações no protocolo de amostragem podem gerar diferenças até 15% na percentagem retida pelo crivo em sistemas de moagem por impacto ou compressão. Além disso, estudos comparativos em moagem agrícola recomendam a utilização entre 200 e 500 g como massa analítica mínima para evitar perdas de frações finas e garantir uma representatividade suficiente, considerada no presente trabalho.[24]

Para a representação e análise dos dados recolhidos, foram usados grafos de distribuição granulométrica da distribuição do tamanho das partículas. Estes gráficos permitem visualizar a relação entre o tamanho das partículas e a percentagem cumulativa do material peneirado, proporcionando uma compreensão quantitativa e comparativa da distribuição do tamanho das partículas.

Por fim, foi aplicada a análise da variância (ANOVA) de um único fator utilizando o complemento do Kit de Ferramentas de Análise, que permitiu avaliar diferenças significativas entre tratamentos.

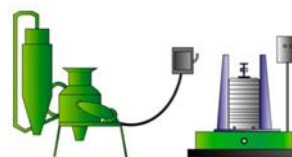


Fig. 1. Caso 1. Moinho de martelo e peneiração.

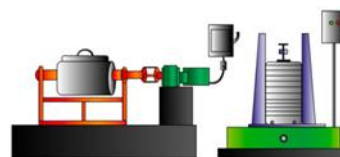


Fig. 2. Caso 2. Moagem e peneiração por moinho de bolas

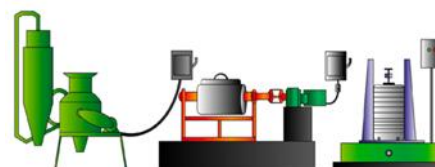


Fig. 3. Caso 3. Moagem de martelos, seguida de moagem de esferas e peneira

## 2.1. Matéria-prima

Foram usados 4540 g de milho e soja, 2270 g de cada grão. Milho com diâmetro médio de 0,78 mm e densidade de grãos de 0,75 g/cm<sup>3</sup>, soja com diâmetro médio de 0,57 mm e densidade de grãos de 0,85 g/cm<sup>3</sup>.

A humidade do grão é uma variável determinante na eficiência da moagem, pois modifica a sua dureza, a sua resposta mecânica e a granulometria resultante. Para manter a estabilidade experimental, os grãos foram mantidos no mesmo lote e armazenados num ambiente seco a uma temperatura controlada de 22–24 °C, condições que minimizam a variação higroscópica e preservam as propriedades físicas do material. Esta abordagem coincide com as recomendações da literatura, que destacam que o controlo simultâneo da temperatura e das condições ambientais evita flutuações na humidade interna do grão e, portanto, no seu comportamento durante o processo de cominuição. Isto garante que as diferenças observadas no tamanho dos grãos refletem principalmente o desempenho do equipamento de moagem.[25]

## 2.2. Moinho de bolas

Foi utilizado um moinho de bolas, com uma carga de esferas configurada conforme indicado na tabela 1:

Tabela 1. Configuração dos corpos de moagem.

Carroçarias de moagem	Diâmetro médio (cm)	Peso Total (g)	% Peso
Pequeno	2.46	5447	18.43
Média	2.97	9286	31.43
Grande	3.89	14815	50.14
Pequeno	2.46	5447	18.43

Fonte: Bonilla, et al, 2024



O peso total dos corpos de moagem era de 29.548 g.  
O peso médio e o diâmetro equivalente dos corpos de moagem foram determinados com as seguintes equações:

$$\text{Peso promedio} = \frac{\text{peso total de cuerpos moedores}}{\text{número de cuerpos moedores}} \quad [1]$$

Peso médio= 126,27 g

$$\text{Diámetro equivalente} = \left[ \left( \frac{\text{peso promedio}}{\text{densidad}} \right) \frac{6}{\pi} \right]^{1/3} \quad [2]$$

Diâmetro equivalente= 3,12 cm

### 2.2.1. Cálculos de parâmetros para moinho de bolas

O moinho de esferas era alimentado com 2270 g de cada grão (milho e soja) e os parâmetros de trabalho eram determinados pelas seguintes equações de projeto:

Grau de preenchimento (f):

$$f = \frac{\text{Volumen de la carga}}{\text{Volumen del molino}} \times 100 \quad [3]$$

Peso da Carga Corporal de Desgaste (Q):

$$Q = \frac{\pi}{4} D^2 L i f Y q \quad [4]$$

Onde:

D: Diâmetro interior do moinho de bolas, m.

Li: comprimento do moinho, m.

Yq: Peso equivalente a corpos de moagem, t/m<sup>3</sup>

Velocidade crítica de fresagem (nc):

$$nc = \frac{42.3}{\sqrt{D}} \quad [5]$$

Onde:

D: Diâmetro interior do moinho de bolas, m

$$n = k nc \quad [6]$$

Onde:

K: Percentagem da velocidade crítica (75%)

NC: Velocidade Crítica, RPM

Potência do motor do moinho de bolas (N):

$$N = c D Q n \quad [7]$$

Onde:

c: fator de consumo de energia, adimensional

D: diâmetro interior do moinho, m

P: Peso de carga do moinho de bolas, t

N: Velocidade de Funcionamento da Fresadora, RPM

Consumo específico de energia (CEE):

$$CEE = \frac{N}{P} \quad [8]$$

Onde:

N: potência do moinho, kW

P: Produção do moinho de bolas, t

### 2.3. Moinho de Martelos

Os grãos eram colocados na boca de ração, passados pelos martelos num período de 4 minutos e recebidos no descarregamento, para pesar e peneirar.

### 2.4. Peneirado

As peneiras foram colocadas em coluna de forma crescente de acordo com o número de peneiras, o que significa que a peneira com o maior número receberá o material mais fino. A coluna de peneiras era colocada na máquina vibratória durante um minuto e depois cada peneira era pesada, recolhendo o peso do crivo retido.

O fluxograma do processo de estudo é mostrado abaixo na Figura 4.

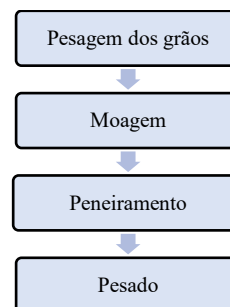


Fig.4. Diagrama geral de fluxo do processo.

### 2.5. Peneiras

A coluna de peneiras utilizada neste estudo é apresentada na tabela 2, com as respectivas características da seguinte forma:

Tabela 2. Classificação por peneiras

Número de Malha	Abertura da malha (mm)	Peso do crivo (g)
5	4,00	387
6	3,35	383
8	2,36	372
12	1,70	358
16	1,18	309
18	1,00	303
20	0,85	294
30	0,60	289
50	0,30	255
70	0,212	250
Base	-	270

Fonte: Bonilla, et al, 2024

## 3. Análise e Interpretação dos Resultados.

### 3.1. Condições de Funcionamento da Moagem

A tabela 3 seguinte apresenta as condições de trabalho nos casos 2 e 3, tanto com grãos de milho como de soja.

Tabela 3. Condições de funcionamento na moagem

Parâmetro	Caso 2		Caso 3	
Granos	Maíz	Soja	Maíz	Soja
Temperatura (°C)	27	27	27	27

f(%)	14,13	14,8	14,1	16,51
P (t)	0,0280	0,0293	0,0279	0,0327
NC (RPM)	68,61	68,61	68,61	68,61
N (RPM) @ 75%	51	51	51	51
N (HP)	0,194	0,203	0,194	0,203
CEE (kW h / t)	80,61	83,17	80,17	92,70

Fonte: Bonilla, et al, 2024

A Tabela 3 indica as condições usadas no moinho de esferas nos casos 2 e 3, para ambos os grãos trabalhados à temperatura ambiente. O grau de preenchimento (f) do caso 2 com milho apresenta 14,13% e a soja 14,8%, respectivamente. Quanto mais denso o grão, maior o grau de preenchimento. No caso 3, com milho, apresenta 14,1% e soja 16,51%, estes resultados dependem de fatores como o volume de carga dos corpos de moagem, o volume da matéria-prima e o volume do moinho. Assim, a farinha de milho, por ser mais densa, ocupa menos volume no moinho em comparação com a farinha de soja, que ocupa um volume maior, por isso era necessária uma maior carga de corpos de moagem.

Foi necessário determinar a velocidade crítica (nc) a que o moinho opera para não ultrapassar, pois isso fará com que a força centrífuga seja igual à força da gravidade e os corpos de moagem não descerão até à moagem.

O consumo específico de energia (CEE) calculado no caso 2 com milho teve um consumo de 80,61 kW hr/t por cada tonelada processada; em contraste, a soja aumentou para 83,7 kW hr/t consumida por cada tonelada processada, devido ao facto de trabalharem com uma maior carga de corpos de moagem para este grão, pelo que o moinho teve de consumir mais energia do que com milho. finalmente, o caso 3, com milho, apresentou um consumo de 80,17 kW hr/t por cada tonelada produzida e a soja consumiu 92,70 kW hr/t por cada tonelada produzida; a diferença no consumo específico de energia (CEE) entre os grãos no caso 3 deve-se à densidade do grão de soja. Ou seja, quanto maior o grau de preenchimento, maior será o consumo específico de energia. [26]

### 3.2. Rendimentos do moinho

A Tabela 4 compara a percentagem de rendimento dos moinhos nos três estudos de caso com milho e soja.

#### Caso 1. Moinho de martelo.

O moinho de martelo apresentava um rendimento mais elevado no processamento de cereais de milho em comparação com a soja, com uma diferença de 3,5%. Esta variação é principalmente atribuída à diferença de densidade entre os dois

grãos. O milho, por ser menos denso, facilita a moagem em comparação com a soja.

#### Caso 2. Moinho de bolas.

No moinho de bolas, obteve-se o maior rendimento ao moer ambos os grãos em comparação com os três casos

analizados, devido à capacidade do moinho de esferas de processar quase todo o grão alimentado com perdas atribuíveis a incrustações no blindagem e na tampa do moinho.

#### Caso 3. Moinho de martelo + moinho de bolas.

A combinação dos moinhos apresenta uma diferença de 5,47% entre milho e soja, resultando numa percentagem de prejuízo maior em comparação com os casos 1 e 2, deve-se ao facto de o grão passar por dois processos de moagem. O moinho de martelo tinha um rendimento superior com grão de milho em comparação com a soja, devido às suas diferenças de densidade. O moinho de bolas oferece um desempenho semelhante em ambos os casos, porque não apresenta uma perda significativa no momento do processamento.

Tabela 4. O moinho produz.

Fonte: Bonilla, et al, 2024

Matéria-prima	Rendimento (%)		
	Caso #1	Caso #2	Caso #2
	Moinho de Martelos	Moinho de bolas	Moinho de martelo + Moinho de esferas
Milho	77,05	96,34	74,89
Soja	73,57	96,17	69,47

### 3.3. Análise comparativa do tamanho das partículas

#### 3.3.1. Caso 1. Moinho de martelo com milho

A Figura 5, que mostra a distribuição das partículas, que cobre um intervalo de 2,33 a 3,7 milímetros, indica uma falta de uniformidade na redução do tamanho. Enquanto o diâmetro mediano (D50) é aproximadamente 2,8-2,9 milímetros.

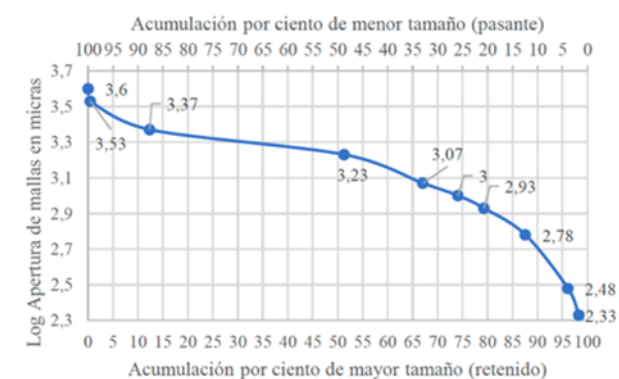


Fig.5. Curva de tamanho de partícula Caso 1 (milho)

Os dados na Tabela 5 indicam uma distribuição heterogênea com uma concentração massiva na faixa média. A peneira número 12 (2,03 mm/2030 micrômetros) retém 38,94% do material total, representando o ponto máximo de distribuição. Isto indica que o processo de moagem gera predominantemente partículas de tamanho médio. Embora a fração grosseira seja adequadamente minimizada (apenas 0,47% acima de 3,68 mm), a baixa proporção de finos (10,71% abaixo de 0,45 mm) sugere

ineficiências no mecanismo de fratura, possivelmente relacionadas com a velocidade do rotor, tempo de residência ou humidade do grão.

Tabela 5. Percentagem de dados experimentais retidos (milho)

Número de Malha	Tamanho médio das partículas (mm)	Tamanho médio das partículas (micrómetros)	% Retidos
5	4,00	4000	0,06
6	3,35	3680	0,41
8	2,36	2860	11,87
12	1,70	2030	38,94
16	1,18	1440	15,77
18	1,00	1090	7,04
20	0,85	930	5,18
30	0,60	730	8,32
50	0,30	450	8,50
70	0,212	260	2,21

Fonte: Bonilla, et al, 2024

### 3.3.2. Caso 1. Moinho de martelo (soja)

A Figura 6 mostra a distribuição das partículas numa ampla gama de tamanhos, desde aproximadamente 2,3 mm até 3,7 mm, o que indica uma moagem heterogênea com presença simultânea de partículas finas e grosseiras. O D50 (tamanho médio) localiza-se cerca de 2,9 mm, o ponto em que 50% do material é mais fino e 50% mais espesso, um valor que representa o tamanho característico do produto final. A inclinação suave da curva de acumulação sugere uma distribuição alargada com dispersão significativa nos tamanhos das partículas. Observa-se que aproximadamente 30-35% do material tem tamanhos superiores a 3,1 mm (fração grosseira), enquanto apenas cerca de 15-20% está abaixo de 2,5 mm (fração fina), evidenciando um desequilíbrio em relação a partículas maiores. A acumulação de material retido indica que existe uma proporção de partículas na gama média (2,7-3,1 mm), representando entre 40-50% do total. Esta distribuição sugere que o processo de moagem gera um excesso de partículas de tamanho intermédio, possivelmente devido a parâmetros operacionais como velocidade do rotor inadequada, tempo de residência insuficiente, desgaste do martelo ou abertura excessiva da peneira.

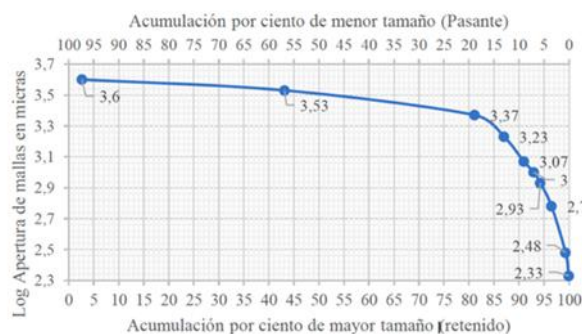


Fig.6. Curva de tamanho de partícula Caso 1 (soja)

Os dados na Tabela 6 indicam que as novas peneiras têm uma percentagem maior de retenção de partículas na ordem dos 3680 a 2860 micrómetros, o que está associado à presença de partículas maiores de soja. presença de

partículas maiores de soja. Além disso, observa-se uma diminuição na percentagem de retenção para tamanhos intermédios e pequenos. Esta tendência indica que o

Tabela 6. Percentagem de dados experimentais retidos (soja)

Número de Malha	Tamanho médio das partículas (mm)	Tamanho médio das partículas (micrómetros)	% Retidos
5	4,00	4000	2,66
6	3,35	3680	40,49
8	2,36	2860	37,97
12	1,70	2030	5,87
16	1,18	1440	3,99
18	1,00	1090	1,96
20	0,85	930	1,33
30	0,60	730	2,24
50	0,30	450	2,80
70	0,212	260	0,63

Fonte: Bonilla, et al, 2024

### 3.3.3. Caso 2. Moinho de Bola (Milho)

A distribuição do tamanho das partículas obtida do moinho de milho no moinho de esferas indica uma ampla dispersão dos tamanhos das partículas. Os resultados na Figura 7 mostram que o D10 tem cerca de 0,48 mm, o que significa que apenas 10% do material é menor do que este valor, enquanto o D50 tem 1,38 mm, indicando que metade do material está abaixo deste tamanho. O D90 de 1,96 mm revela que 90% do material é menor do que este valor. Estes indicadores permitem-nos inferir que a moagem produz partículas numa gama considerável, maioritariamente concentradas entre 0,5 mm e 2 mm.

A distribuição cumulativa mostra que o material moído tem uma proporção significativa de partículas grosseiras (>2 mm), aproximadamente 8% do total, o que indica que o moinho de esferas não alcança uma moagem completamente fina para todo o material processado. A dispersão do tamanho das partículas é relativamente elevada, como confirmado pelo índice de uniformidade ( $D_{90}/D_{10} \approx 4,08$ ), indicando uma mistura considerável de partículas finas e grosseiras. Esta característica é comum na moagem feita em moinhos de bolas.

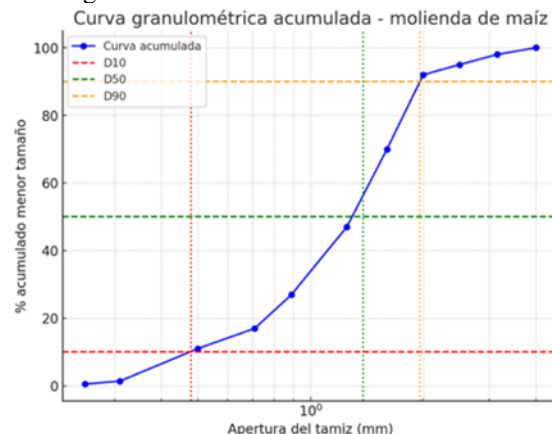


Fig.7. Curva cumulativa do tamanho das partículas Caso 2 (milho)

### 3.3.4. Caso 2. Moinho de bolas (soja)

A distribuição do tamanho das partículas da soja moída na Figura 8 mostra que o material é maioritariamente grosseiro: os parâmetros representativos são  $D_{10} \approx 1,59$  mm,  $D_{50} \approx 3,53$  mm e  $D_{90} \approx 3,94$  mm. Isto indica que 10% das partículas são menores que 1,59 mm, a mediana é de 3,53 mm (metade do material é mais fina do que este valor) e que 90% é mais fina do que 3,94 mm. Estes valores colocam a maior parte da massa na faixa de  $\sim 1,6$ – $4,0$  mm, com a mediana próxima de 3,5 mm. A curva de inclinação (o through-% nas malhas) tem uma inclinação acentuada no vão entre aproximadamente 2,86 mm (18,9% through) e 4,00 mm (97,34% through-screen), o que significa que uma fração significativa do material passa por grandes malhas e que a "zona de corte" da distribuição está centrada em torno de 3–4 mm. A fração de multas ( $<1$  mm) é muito pequena (valores through-% em 0,45 mm e 0,26 mm são 0,70% e 0,07%, respetivamente), pelo que as multas são praticamente insignificantes no produto final. A dispersão da distribuição pode ser quantificada com o índice de uniformidade  $D_{90}/D_{10} \approx 3,94 / 1,59 \approx 2,48$ , indicando uma distribuição relativamente estreita e bastante uniforme em tamanhos grosseiros (menos dispersão do que uma distribuição muito ampla). Ou seja, a maior parte do material está agrupada numa gama relativamente compacta (maioritariamente entre  $\sim 1,6$  e  $\sim 4$  mm), sem grandes caudas de partículas muito finas ou uma mistura muito heterogênea de tamanhos. Do ponto de vista operacional e da qualidade do produto, esta granulometria sugere que o processo de moagem está a produzir um produto adequado quando se procura farinha/partículas grossas ou intermédias (por exemplo, para determinados usos industriais ou alimentação animal). Se o objetivo fosse obter frações mais finas ou aumentar a proporção de partículas  $<1$  mm, seria necessário intervir no processo (mais tempo de moagem, maior energia de impacto, ajustar a carga e o tamanho do meio, ou usar triagem e recirculação).

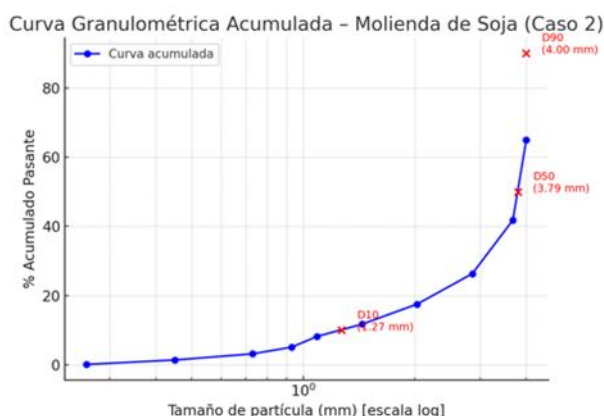


Fig.8. Curva cumulativa de tamanho de partícula Caso 2 (soja)

### 3.3.5. Caso 3. Moinho de Martelo de Moagem + Moinho de Bolas (Milho)

A moagem combinada (martelo + bolas) gera um produto de tamanho intermédio, com um  $D_{50} \approx 1,08$  mm, o que significa que metade do material está na gama de partículas

próxima de 1 mm. A  $D_{10} \approx 0,60$  mm indica a fração mais fina do material, enquanto a  $D_{90} \approx 2,60$  mm mostra que 90% do material está abaixo deste tamanho, com uma ampla distribuição de dados.

A curva acumulada na Figura 9 mostra que a maior parte do material está concentrada entre 0,6 e 2,6 mm, com uma fração muito baixa de finos ( $<0,5$  mm) ( $<1\%$ ). Isto indica que a moagem é eficiente para produzir granulometria de meio, sem pós em excesso, uma característica favorável para usos em ração animal e processos que requerem um fluxo adequado sem encaixe.

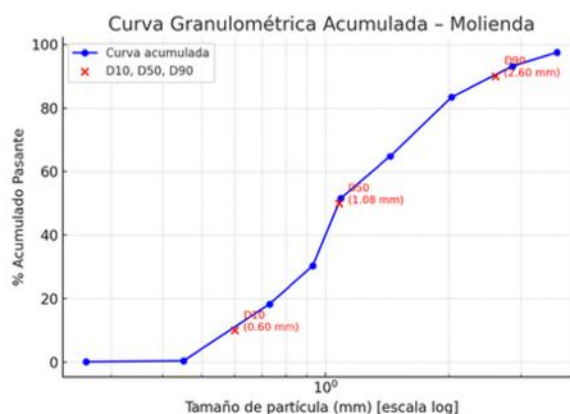


Fig.9. Curva cumulativa de tamanho de partícula Caso 3 (milho)

O índice de uniformidade, calculado como  $D_{90}/D_{10} \approx 4,3$ , indica uma distribuição ampla, com coexistência de partículas finas e grosseiras. Esta amplitude pode estar associada à combinação de tecnologias de moagem: o moinho de martelo parte de forma mais irregular e o moinho de esferas refina, mas mantém alguma dispersão.

### 3.3.6. Caso 3. Moinho de martelo de moagem + Moinho de esferas (soja)

A distribuição resultante do tamanho das partículas mostra, na Figura 10, uma concentração clara na gama  $\approx 0,9$ – $1,5$  mm, com  $D_{50} \approx 1,35$  mm, o que significa que metade da massa está abaixo desse tamanho. Os dados de peneiramento indicam que as maiores quantidades foram retidas em malhas de 1,25 mm e 1,00 mm (498 g e 588 g, respetivamente), sublinhando que a "massa crítica" do material está próxima destes tamanhos e que o processo produziu um produto de tamanho intermédio de partículas. A fração de finos é muito pequena: apenas 0,94% passa pela malha de 0,315 mm e a malha acumulada através dessa malha é de 0,94%, por isso partículas menores que  $\approx 0,5$  mm são praticamente insignificantes. Isto significa baixa geração de pó e maiores facilidades de manuseamento e transporte (menos dispersão aérea e menos problemas de acumulação por multas), um aspeto positivo para a logística e para os processos subsequentes que beneficiam de menos material poeirento. A dispersão da distribuição pode ser quantificada com o índice de uniformidade  $D_{90}/D_{10} \approx 2,05 / 0,77 \approx 2,66$ , um valor que indica uma distribuição relativamente estreita e homogênea em torno do tamanho mediano. Na prática,



isto significa que a maior parte do material está agrupada numa gama limitada (cauda fina baixa e cauda moderadamente grossa), o que é desejável quando se procura reprodutibilidade nas propriedades reológicas, tamanho das partículas e processos (mistura, extrusão, pelletização).

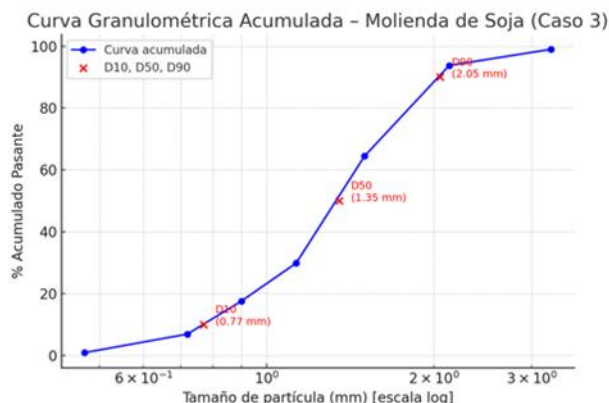


Fig.10. Curva cumulativa de tamanho de partícula Caso 3 (soja)

Do ponto de vista operacional, estes resultados sugerem que a combinação martelo + moinho de bolas produziu uma redução suficiente para aplicações que requerem partículas intermédias.

### 3.3.7. Comparação da percentagem de retenção em cada caso nas peneiras com a maior e menor abertura.

A Tabela 7 mostra uma comparação entre os três estudos de caso relativamente à percentagem de retenção obtida nas malhas com maior abertura (4 mm) e menor abertura (0,121 mm), bem como a retenção na base (<0,212 mm).

Tabela 7. Comparação da percentagem de detidos.

Não. Malha	Abertura (mm)	Caso 1 (%)		Caso 2 (%)		Caso 3 (%)	
		milho	Soja	milho	Soja	milho	Soja
5	4	0,06	2,66	2,47	35,01	0,23	0,77
70	0,212	2,21	0,63	1,12	1,28	1,93	0,28
Base	< 0,212	1,69	0,07	0,04	0,09	0,12	0,14

Fonte: Bonilla, et al, 2024

A maior percentagem de retenção na moagem de soja foi obtida no caso 2, com 35,01%, devido à densidade do grão em comparação com o milho. No caso 3, observa-se uma diminuição da retenção, pois, após uma moagem anterior no moinho de martelos, podiam ser obtidas partículas mais pequenas. Nos três estudos de caso, foi possível obter partículas menores, no entanto, as percentagens de retenção não excedem os 3%. A maior acumulação de retenção foi obtida na moagem de milho em todos os três casos, devido à menor densidade do grão. A moagem da soja nos três estudos de caso não atingiu 1% nas partículas retidas nas partículas inferiores a 0,212 mm. No entanto,

na moagem de milho, apenas no caso 1 poderia ser obtido 1,69% do retido com tamanho de partículas inferior a 0,212 mm.

### 3.3.8. Análise microscópica de farinha de milho e soja

A análise microscópica da farinha de milho mostra, na tabela 8, diferenças na forma das partículas produzidas pelos diferentes estudos de caso.

Caso 1 (Hammer Mill): As partículas têm uma forma retangular, o que sugere que o mecanismo de impacto do hammer mill tende a fragmentar as partículas em formas angulares. Caso 2 (Moinho de Bolas). As partículas têm uma forma oval, indicando que o processo de abrasão no moinho de bolas tende a arredondar as partículas. Caso 3 (Hammer Mill + Ball Mill): Observa-se uma forma intermédia entre o retangular e o oval. Isto pode dever-se à combinação de ambos os processos de moagem, que produzem uma mistura de formas de partículas. [27]

Tabela 8. Análise microscópica da farinha de milho

Caso 1	Caso 2	Caso 3
Tamanho das partículas: < 0,212 mm Forma das partículas: Retangular.	Tamanho da partícula: < 0,212 mm Forma da partícula: oval.	Tamanho da partícula: < 0,212 mm Forma da partícula: Entre retangular e oval.

Fonte: Bonilla, et al, 2024

### 3.3.9. Análise microscópica da farinha de soja

A análise microscópica da farinha de soja mostra as seguintes observações na Tabela 9.

Caso 1 (Moinho de Martelo): As partículas têm uma forma retangular, o impacto direto do moinho de martelo produz partículas angulares semelhantes às observadas no milho. Caso 2 (Moinho de Bolas). As partículas têm uma forma elipsoide. O processo de abrasão do moinho de bolas contorna as partículas, gerando esta forma pelo método de impacto do moinho e pelas características do grão. Caso 3 (Hammer Mill + Ball Mill): Observa-se uma mistura de formas retangulares e elipsoidais. Isto pode resultar de combinações de processos, onde a pré-moagem no moinho de martelos seguida de abrasão no moinho de esferas produz uma variedade de formas.

Tabela 9. Análise microscópica da farinha de soja

Caso 1	Caso 2	Caso 3

Tamanho das partículas: < 0,212 mm Forma das partículas: Retangular.	Tamanho da partícula: < 0,212 mm Forma da partícula: Elipsoide	Tamanho da partícula: < 0,212 mm Forma da partícula: Entre retangular e elipsoide.
---	---	---

Fonte: Bonilla, et al, 2024

### 3.3.10. Análise estatística

Foi realizada uma análise da variância para um fator que permitiu, em cada caso, determinar se existem diferenças significativas entre os resultados.

#### 3.3.10.1. Caso 1. Moinho de Martelos

A Tabela 10 mostra os dados analisados sobre o peso dos retidos nas peneiras de grãos de milho e soja.

Hipótese nula: A análise granulométrica não mostra diferenças significativas entre as peneiras utilizadas. ( $p > 0.05$ )

Hipótese alternativa: A análise granulométrica mostra diferenças significativas entre as peneiras utilizadas. ( $p < 0.05$ )

Mesa 10. Pesos de Retidos em Peneiras Caso 1

Malha (mm)	4	2,36	1,70	1,18	1,00	0,85	0,60	0,30	0,212
Milho (g)	2	55	472	701	296	80	96	37	2.21
Soja (g)	38	543	84	57	28	19	32	40	2.93
Valor Crítico F	4,39								
Probabilidade	0,33								

Fonte: Bonilla, et al, 2024

A análise de um fator da variância (ANOVA) aplicada às distribuições do tamanho das partículas do milho e da soja mostra que não existe diferença estatisticamente significativa entre ambos os produtos moídos, evidenciada por um p-valor de 0,33, muito superior ao nível usual de significância de 0,05, o que indica que as variações observadas nos pesos retidos em cada malha podem ser atribuídas à aleatoriedade do processo e não a um efeito real do tipo de material. No entanto, pode mascarar diferenças práticas relevantes nos padrões de moagem, como a concentração marcada de soja na malha de 2,36 mm (543 g) em comparação com uma distribuição mais uniforme do milho, sugerindo que, embora globalmente semelhantes, os mecanismos de fratura e as características de degradação de cada material podem ser influenciados por fatores não capturados por esta análise univariada.

#### 3.3.10.2. Caso 2. Moinho de bolas

A Tabela 11 mostra os dados analisados sobre o peso do retido nas peneiras de milho e soja.

Hipótese nula: A análise granulométrica não mostra diferenças significativas entre as peneiras utilizadas. ( $p > 0.05$ )

Hipótese alternativa: A análise granulométrica mostra diferenças significativas entre as peneiras utilizadas. ( $p < 0.05$ )

Tabela 11. Pesos de Retidos em Peneiras Caso 2

Malha (mm)	4	2,36	1,70	1,18	1,00	0,85	0,60	0,30	0,212
Milho (g)	55	62	482	511	447	202	153	217	1.63
Soja (g)	762	338	192	127	77	68	42	39	1.28
Valor Crítico F	4,49								
Probabilidade	0,61								

Fonte: Bonilla, et al, 2024

A análise da variância (ANOVA) de um fator aplicada aos dados de distribuição do tamanho das partículas de milho e soja moídos num moinho de bolas indica que não existe diferença estatisticamente significativa entre as distribuições de ambos os cereais, evidenciada por um p-valor de 0,612, muito superior ao nível de significância de 0,05, e um valor F (0,267) que não ultrapassa o valor crítico (4.494). Embora as médias dos pesos retidos difiram numericamente (milho: 236,74 g, soja: 183,25 g), a elevada variância dentro de cada grupo (38.378,68 para milho e 58.008,20 para soja) sugere que a dispersão dos dados em cada malha é considerável, mascarando possíveis diferenças específicas pelo tamanho das partículas. Isto pode dever-se à natureza heterogênea da moagem em moinhos de bolas, onde fatores como dureza, humidade ou tempo de residência geram variabilidade que a ANOVA global não consegue detetar, recomendando uma análise por frações específicas do tamanho das partículas para identificar diferenças práticas no processo.

#### 3.3.10.3. Caso 3. Moinho de martelo + Moinho de esferas

A Tabela 12 mostra os dados analisados sobre o peso dos retidos nas peneiras de milho e soja.

Hipótese nula: A análise granulométrica não mostra diferenças significativas entre as peneiras utilizadas. ( $p > 0.05$ )

Hipótese alternativa: A análise granulométrica mostra diferenças significativas entre as peneiras utilizadas. ( $p < 0.05$ )

Tabela 12. Pesos de retidos em peneiras caso 3.

Malha (mm)	4	2,36	1,70	1,18	1,00	0,85	0,60	0,30	0,212
Milho (g)	4	23	12	25	28	41	34	21	1.9
Soja (g)	1	5	7	8	9	3	2	3	2

Soja (g)	11	65	13	26	18	30	17	25	0.2
		9	4	9	4	0	4	8	
Valor Crítico F	4,49								
Probabilidade	0,63								

Fonte: Bonilla, et al, 2024

A análise da variância (ANOVA) de um fator aplicada aos dados do tamanho das partículas do caso 3, onde milho e soja foram processados por um moinho de martelo seguido por um moinho de bolas, indica que não existe diferença estatisticamente significativa entre as distribuições do tamanho das partículas de ambos os grãos. Isto é suportado por um valor p de 0,637, muito superior ao nível de significância de 0,05, e um valor F de 0,231 que não ultrapassa o valor crítico de 4,494. Embora o peso retido médio difera (milho: 185,77 g, soja: 155,14 g), a elevada variabilidade dentro de cada grupo (variâncias de 24.235,87 para milho e 12.286,76 para soja) sugere que as diferenças observadas podem dever-se à dispersão natural do processo de moagem e não ao tipo de grão. Este resultado reflete que a sequência de moagem (martelo + bolas) homogeneiza as distribuições ao ponto de eliminar diferenças significativas, possivelmente devido à combinação de mecanismos de fratura (impacto e abrasão) que compensam as propriedades individuais de cada material. No entanto, uma análise por frações específicas pode revelar comportamentos diferenciais em determinados intervalos de tamanho, não captados pela ANOVA global.

#### 3.3.10.4. Comparações de Diâmetros no Milho

A Tabela 13 mostra os dados analisados para os diâmetros D10, 50 e 90 para milho nos seus três estudos de caso.

Hipótese nula: Não existem diferenças significativas entre os valores de D10, D50 e D90 na distribuição do tamanho das partículas do milho. ( $p > 0.05$ )

Hipótese alternativa: Pelo menos um dos percentis (D10, D50 ou D90) difere significativamente dos restantes na distribuição do tamanho das partículas do milho. ( $p < 0.05$ )

Tabela 13. Acumulação ao longo da colheita em D10, 50 e 90 para milho

Parâmetro	Caso 1	Caso 2	Caso 3
D10 (mm)	3,39	0,48	0,60
D50 (mm)	2,80	1,38	1,08
D90 (mm)	0,30	1,96	2,60
Valor Crítico F	0,03		
Probabilidade	0,97		

Fonte: Bonilla, et al, 2024

A análise da variância mostra que não existem diferenças significativas entre os valores de D10, D50 e D90 para cereais de milho ( $p > 0,05$ ). Isto indica que, considerando os três tratamentos de moagem, a variação entre as distribuições características do tamanho das partículas (percentis de tamanho) é estatisticamente semelhante. Por outras palavras, a moagem gera tamanhos de partículas que, embora diferentes em valor numérico, não apresentam variabilidade suficiente para que as diferenças entre percentis sejam estatisticamente detetáveis no milho.

#### 3.3.10.5. Comparações de Diâmetros de Soja

A Tabela 14 mostra os dados analisados para diâmetros D10, 50 e 90 para milho nos seus três estudos de caso.

Hipótese nula: Não existem diferenças significativas entre os valores de D10, D50 e D90 na distribuição do tamanho das partículas da soja. ( $p > 0.05$ )

Hipótese alternativa: Pelo menos um dos percentis (D10, D50 ou D90) difere significativamente dos restantes na distribuição do tamanho das partículas da soja. ( $p < 0.05$ )

Tabela 14 Acumulação do cesta através de um cesto em D10, 50 e 90 para soja

Parâmetro	Caso 1	Caso 2	Caso 3
D10 (mm)	1,8	1,9	0,70
D50 (mm)	2,90	3,53	1,35
D90 (mm)	3,98	3,94	2,05
Valor Crítico F	4,04		
Probabilidade	0,07		

Fonte: Bonilla, et al, 2024

No caso da soja, existe uma tendência para diferenças entre percentis ( $p = 0,773$ ), mas estas não atingem a significância estatística ao nível convencional de  $\alpha = 0,05$ . Isto sugere que a soja apresenta maior variação no tamanho das partículas do que o milho entre D10, D50 e D90, provavelmente devido à sua estrutura interna mais frágil e maior heterogeneidade na fratura. No entanto, a evidência estatística não é suficiente para afirmar diferenças significativas, embora seja possível que, com uma amostra maior, os resultados sejam conclusivos.

## 4.- Discussão

### 4.1.- Caso 1. Moinho de Martelos

Os dados sobre o tamanho das partículas revelam diferenças significativas no comportamento de moagem entre a soja e o milho usando novas peneiras. A soja tem um Distribuição extremamente grosseira, com 81,12% do material retido nas três primeiras malhas ( $\geq 2,36$  mm) e apenas 18,88% como material atravessado na malha 8. Em contraste, o milho apresenta um Distribuição mais equilibrada, com 87,66% do material atravessador na malha 8 e uma acumulação progressiva em malhas intermédias, atingindo o seu ponto de inflexão (D50) em torno da malha 12 (1,7 mm). Esta diferença é evidente nos valores de Menor percentagem de acumulação, onde o milho mantém percentagens significativamente mais elevadas em todas as malhas, indicando moagem mais eficiente e uniforme. Estas conclusões são consistentes com a teoria da moagem que afirma que as Propriedades físicas do material determinar a sua resposta à fratura. A soja, com maior teor de óleo e estrutura celular mais flexível, tem maior resistência à fratura por impacto, resultando em partículas mais grossas. O milho, com endosperma vítreo e maior teor de amido, fractura-se mais facilmente, gerando uma distribuição mais fina e uniforme. A literatura relata que materiais com dureza superior a 45 kg/cm<sup>2</sup> (como a soja) requerem mais energia de moagem e

produzem distribuições mais grosseiras, enquanto cereais como o milho (dureza 25-35 kg/cm<sup>2</sup>) respondem melhor à moagem por impacto. O comportamento observado na soja, com 81,12% do acumulado acumulado na malha 8, coincide com estudos anteriores que relatam baixa eficiência de moagem em leguminosas oleaginosas devido à sua capacidade de absorver energia sem se fraturarem completamente. Por outro lado, a distribuição do milho segue o modelo de Gates-Gaudin-Schuhman típico dos materiais frágeis. Noutros estudos, reporta 72-88% do material abaixo de 2 mm para milho, coincidindo com a nossa malha atravessadora de 87,66%. [28] natureza vítrea do endosperma. Assim como confirma que o [29] Presença de petróleo Na soja (18-22%) atua como amortecedor, reduzindo a geração de finos em 30-40% em comparação com materiais secos. Em contraste, noutras investigações obtém distribuições mais finas (D50  $\approx$  1,2 mm) usando azoto líquido, sugerindo que as nossas condições convencionais limitam a eficiência. Isto mostra que ajustes adaptativos em tempo real podem melhorar a uniformidade da soja até 60%, indicando potencial de otimização não explorado no nosso estudo. Alguns estudos afirmam que moinhos de última geração com controlo de velocidade variável podem alcançar distribuições mais estreitas do que os equipamentos convencionais, além da incorporação dos protocolos atuais que recomendam o controlo de humidade implementado nos estúdios. Estas descobertas coincidem com trabalhos recentes sobre comportamento de rações e PSD na moagem por martelo, que mostram como a soja e o milho respondem de forma diferente à mesma triagem/triagem e como a humidade e a composição afetam a geração de finos e a distribuição de nutrientes por fração. Em particular, estudos observaram que, após a moagem por martelo, a soja tendem a reter frações relativamente grosseiras e que a adição de humidade modifica significativamente tanto a PSD como o consumo de energia, o que apoia a interpretação de que as propriedades dos grãos (óleo, estrutura) condicionam a eficiência do martelo e a orientação da curva do tamanho das partículas.[30][31] [32] [33] [34]

#### 4.2.- Caso 2. Moinho de bolas

O milho tem um Distribuição significativamente mais fina além da soja, com 91,6% do material passante na malha 8 (2,36 mm) comparado com apenas 26,32% na soja. O ponto de inflexão (D50) está localizado aproximadamente em 1,3-1,4 mm para milho Versus 3,0-3,2 mm para soja, evidenciando uma diferença significativa na eficiência da moagem. Exposição de Soja Resistência à fratura, com 73,68% do acumulado retido na malha 8, consistente com estudos de *Chen et al. (2021)* sobre a capacidade dos materiais oleaginosos de absorver energia de impacto. O milho, com o seu endosperma vítreo, responde melhor à moagem por impacto, gerando uma maior proporção de partículas médias e finas. Os resultados coincidem com a maior eficiência de moagem dos cereais em comparação com as oleaginosas em condições semelhantes, mas destacam a necessidade de otimizar parâmetros

operacionais específicos para cada material. A interpretação dos resultados baseia-se em referências científicas recentes, como o estudo que explica a resistência à fratura da soja devido ao seu elevado teor de óleo e estrutura celular flexível, o que coincide com as nossas conclusões sobre distribuições de tamanho de partículas mais grosseiras em comparação com o milho. Igualmente [28] [35], Outros estudos elas destacam a influência do módulo elástico na retificação, reforçando a diferença marcada em D50 entre os dois materiais. Ao comparar os nossos resultados com a literatura, há coincidências que relatam distribuições mais finas para o milho em condições semelhantes de moagem, enquanto as discrepâncias surgem quando comparadas com aqueles que usaram moagem criogénica em soja e obtiveram distribuições significativamente mais finas, sugerindo que as nossas condições convencionais de funcionamento limitam a eficiência do processo. Revisões e trabalhos experimentais confirmam que o moinho de esferas é muito eficaz a fracionar e reduzir partículas quando o material é essencialmente friável ou rico em polissacarídeos, mas o seu desempenho em sementes oleaginosas densas pode ser limitado sem ajustes de parâmetros (tempo, meio, atmosfera). Isto é consistente com os nossos resultados: o milho (endosperma) é efetivamente reduzido, a soja não, exceto por alterações cirúrgicas ou tratamentos combinados.[36][28] [30] [37]

#### 4.3.- Caso 3. Moinho de martelo + Moinho de esferas

A análise granulométrica do Caso 3 apresenta uma distribuição visivelmente mais fina e uniforme em comparação com casos anteriores, onde o milho apresenta um D50  $\approx$  1,05 mm (perto da malha 18) e o Soja um D50  $\approx$  1,25 mm (entre 16-18 malhas), evidenciando uma moagem mais eficiente. Esta melhoria é atribuída ao possível uso de Moinho de martelo seguido de moinho de esferas, uma combinação que segundo Alguns estudos neste caso Otimiza a fratura de materiais heterogêneos ao integrar mecanismos de impacto e abrasão. Os resultados coincidem com aqueles que relatam distribuições com D50 entre 0,9-1,2 mm para milho sob moagem sequencial, enquanto persistem discrepâncias relativamente à soja, cujos estudos indicam D50  $>$ 1,5 mm na moagem convencional, sugerindo que o nosso processo sequencial mitiga parcialmente a sua resistência à fratura. Entre as limitações, a ausência de controlo de humidade e o desgaste não monitorizado das peneiras podem ter afetado a reprodutibilidade, enquanto o viés do equipamento subestima o potencial de moagem criogénica. Estes fatores destacam a necessidade de incorporar métricas específicas de energia (em pesquisas futuras para validar a eficiência do processo sequencial). Por isso, é evidente que os métodos de fragmentação impactam diretamente o tamanho das partículas, bem como a forma obtida na sua farinha. Na literatura recente, foi demonstrado que o uso de etapas sequenciais ou moagem multi-etapas pode diminuir o consumo de energia por unidade de redução (dependendo da humidade e do tamanho do alvo) e



estabilizar a produção de partículas intermédias/finas; Além disso, a fase de pré-fragmentação facilita a ação da moagem fina subsequente e reduz o tempo de contacto necessário para atingir o tamanho alvo. [30] [28] [35] [33] [38][39] [40]

Embora os resultados obtidos mostrem diferenças claras entre grãos e tratamentos, existem limitações inerentes ao desenho experimental e aos fatores biofísicos do grão que podem modular a eficiência da moagem. No Composição interna (conteúdo lipídico, proteínas, estrutura celular) e o Humidade dos grãos influenciar a sua suscetibilidade à fratura. Por exemplo, um estudo recente mostra que, quando a humidade aumenta, os cereais (milho, arroz e soja) modificam o seu comportamento mecânico: passam de frágeis a viscoelásticos, alterando a força de fratura e a energia necessária. Estas variações podem alterar a fragmentação durante a moagem, sugerindo que fatores intrínsecos do grão para além do tipo de moinho podem condicionar a distribuição final do tamanho das partículas.[41]

Outra hipótese para explicar a menor eficiência de moagem da soja, em comparação com o milho, é o efeito tampão do teor de óleo. Na moagem da soja, foi reportado que teores mais elevados de lípidos limitam a redução do tamanho: o óleo reduz a fragilidade e favorece aglomerados ou partículas grosseiras após a moagem por impacto. Além disso, estudos de moagem por fricção ou moagem fina mostram que os métodos mecânicos afetam os grãos com matriz rica em amido de forma diferente daqueles com elevado teor de lípidos, modificando a eficiência, a forma das partículas e a dispersibilidade. Assim, os resultados atuais podem refletir uma interação entre a técnica de moagem e as propriedades bioquímicas do grão; Esta hipótese alternativa merece ser explorada em trabalhos futuros através da caracterização do óleo, proteína e estrutura celular, e controlo rigoroso da humidade.[42][28]

## 5.- Conclusões

O moinho de martelos (Caso 1) apresentou uma distribuição heterogênea, com um D50  $\approx$  2,8-2,9 mm para o milho e  $\approx$  2,9 mm para a soja, evidenciando uma moagem ineficiente na soja, onde 81,12% do material foi retido em malhas de  $\geq$  2,36 mm. Em contraste, o moinho de esferas (Caso 2) gerou distribuições mais finas para o milho (D50  $\approx$  1,38 mm), mas foi ineficaz para a soja (D50  $\approx$  3,53 mm), confirmando que a soja, devido ao seu maior teor de óleo e estrutura flexível, resiste à fratura por impacto e abrasão convencional.

A combinação de moinhos (Caso 3) alcançou a distribuição mais equilibrada, com D50  $\approx$  1,05 mm para o milho e  **$\approx$  1,25 mm para a soja**, reduzindo a heterogeneidade observada nos casos individuais. Isto sugere que a sinergia entre os mecanismos de impacto (martelo) e abrasão (bolas) mitiga as limitações de cada

método separadamente, embora uma maior dispersão persista no milho (índice de uniformidade D90/D10  $\approx$  4,3) em comparação com a soja ( $\approx$  2,66)

O moinho de bolas (Caso 2) teve o maior consumo específico de energia (CEE): 92,70 kW·h/t para soja contra 80,17 kW·h/t para milho no Caso 3, associado à maior densidade e resistência da soja. No entanto, este elevado consumo não se traduziu numa moagem fina da soja, o que indica ineficiência energética no processamento das oleaginosas em condições padrão.

A ANOVA aplicada mostrou  $p > 0,05$  nos três casos, indicando "nenhuma diferença significativa" entre milho e soja. No entanto, os dados sobre o tamanho das partículas revelam disparidades operacionais críticas, como a concentração de 40,49% da soja na malha de 3,35 mm (Caso 1) em comparação com uma distribuição mais uniforme no milho. Isto expõe a insensibilidade da ANOVA univariada para captar diferenças em distribuições complexas, sublinhando a necessidade de uma análise específica por frações.

Os resultados da ANOVA para milho ( $F = 0,0314$ ;  $p = 0,9692$ ) mostram uma total ausência de diferenças significativas entre os parâmetros de tamanho das partículas D10, D50 e D90 segundo o método de moagem, evidenciando um comportamento uniforme. Na soja, embora a ANOVA mostre  $F = 4,0430$  e  $p = 0,0773$ , a diferença não atinge significância estatística, mas sugere uma tendência para a variação, possivelmente influenciada pelo seu maior teor de óleo e pela resposta mecânica diferente à fratura.

A análise microscópica revelou que o moinho de martelo gera partículas angulares (retangulares), enquanto o moinho de esferas produz formas arredondadas (oval ou elipsoidal). No Caso 3, foi observada uma combinação de morfologias, que afeta propriedades funcionais como fluxo, compactação e reatividade. Isto destaca a importância de selecionar a tecnologia de moagem de acordo com as características desejadas no produto final.

Os resultados deste estudo podem ser aplicados na otimização dos processos de moagem na indústria de rações, farinha e óleo vegetal, onde o controlo do tamanho das partículas influencia diretamente a digestibilidade, homogeneidade da mistura e eficiência da extrusão. A configuração de moagem sequencial (martelo + bolas) está a emergir como uma alternativa viável para reduzir o consumo de energia e melhorar a consistência do tamanho das partículas em linhas de produção contínuas. Recomenda-se aprofundar a análise da energia específica de moagem e da sua relação com a humidade e composição do grão, bem como avaliar o efeito do tamanho das partículas na qualidade nutricional e funcional do produto final. Além disso, seria valioso explorar a implementação de tecnologias híbridas (como a moagem criogénica ou

assistida por ultrassom) para aumentar a eficiência e reprodutibilidade do processo, especialmente em sementes oleaginosas de difícil fratura.

## 6.- Contribuições dos Autores (Taxonomia dos Papéis dos Colaboradores (CRediT))

1. Conceptualização: Iván Torres
2. Curadoria de dados: Alejandro Noblecilla
3. Análise formal: Alejandro Noblecilla
4. Aquisição de fundos: Não aplicável
5. Investigação: Iván Torres, Alejandro Noblecilla
6. Metodologia: Iván Torres, Alejandro Noblecilla, Stefanie Bonilla, Carlos Valdiviezo.
7. Gestão de projetos: Stefanie Bonilla
8. Recursos: Iván Torres, Alejandro Noblecilla
9. Software: Não aplicável.
10. Supervisão: Stefanie Bonilla
11. Validação: Stefanie Bonilla, Carlos Valdiviezo
12. Visualização: Alejandro Noblecilla
13. Argumento - rascunho original: Iván Torres, Alejandro Noblecilla
14. Escrita - revisão e edição: Stefanie Bonilla, Carlos Valdiviezo

## 7.- Referências.

- [1] L. McCabe e J. Smith, Operações Unitárias em Engenharia Química, sétimo, 2007. <https://iestpcabana.edu.pe/wp-content/uploads/2021/11/OPERACIONES-UNITARIAS-EN-LA-INGENIERIA-QUIMICA.pdf>
- [2] M. Roostaie, M. Soroush, V. Arian e A. Ghalambor, "Comparação de Vários Métodos de Distribuição-Medção do Tamanho de Partículas," SPE Reservoir evaluation & engineering, vol. 23, n.º 04, 2020. <https://doi.org/10.2118/199335-PA>
- [3] G. Barbosa-Cánovas, E. Ortega-Rivas e P. Juliano, Pós Alimentares: Propriedades Físicas, Processamento e Funcionalidade, Boston, MA: Springer, 2005. [https://doi.org/10.1007/0-387-27613-0\\_12](https://doi.org/10.1007/0-387-27613-0_12)
- [4] A. Gupta e D. Yan, Design e Operação de Processamento Mineral, Austrália Ocidental: Elsevier., 2016. [https://toc.library.ethz.ch/objects/pdf03/e01\\_978-0-444-63589-1\\_01.pdf](https://toc.library.ethz.ch/objects/pdf03/e01_978-0-444-63589-1_01.pdf)
- [5] V. B. L.G. Austin, "Métodos experimentais para estudos de moagem em moinhos laboratoriais," Powder Technology, vol. 5, n.º 5, pp. 261-266, 2020. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(72\)80029-9](https://doi.org/10.1016/0032-5910(72)80029-9)
- [6] B. Wills e J. Finch, Tecnologia de Processamento Mineral de Wills: Uma Introdução aos Aspectos Práticos do Tratamento de Minérios e Recuperação de Minerais, Butterworth-Heinemann, 2016. <https://shop.elsevier.com/books/wills-mineral-processing-technology/wills/978-0-08-097053-0>
- [7] A. International, ASTM E11-17: Especificação Padrão para Tecido de Teste de Fio Tecido e Peneiras de Teste, 2017. <https://standards.globalspec.com/std/3863958/astm-e11-17>
- [8] F. Etzler e R. Deanne, "Análise do tamanho das partículas: uma comparação de vários métodos ii," Caracterização de sistemas de partículas e partículas, vol. 14, n.º 6, pp. 278-282, 2004. <https://doi.org/10.1002/ppsc.19970140604>
- [9] A. Freire e M. A. Lalbay Fuentes, "Implementação de um moinho de martelo para o processo de farinha de trigo," Universidade Técnica de Cotopaxi, La Maná, 2022. <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/8473>
- [10] F. Lyu, A. van del Poel, W. Hendriks e M. Thomas, "Distribuição do tamanho das partículas do milho e farinha de soja moída em martelo, a sua composição nutricional e características de digestão in vitro," Animal Feed Science and Technology, vol. 281, p. 115095, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.115095>
- [11] R. Mugabi, Y. B. Byaruhanga, K. Eskridge e C. Welle, "Avaliação de desempenho de um moinho de martelo durante a moagem de cereais de milho," AgricEngInt: CIGR, vol. 21, n.º 2, p. 170, 2019. [https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/download/5257/3011/23827?utm\\_source=chatgpt.com](https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/download/5257/3011/23827?utm_source=chatgpt.com)
- [12] P. Pagán, R. Mollehuara-Canales, M. Sinche e J. Martínez, Operações Mecânicas de Separação Sólido-Líquido, Espanha: Mc Graw Hill Interamericana, 2023. [https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=UYftEAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA2&dq=P.+Mart%C3%ADnez-Pag%C3%A1n,+Tecnolog%C3%ADa+Mineral%C3%Argica,+Cartagena:+Universidad+T%C3%A9cnica+de+Cartagena,+2011.+&ots=XT4vyqxq\\_5&sig=apv8WuHNxMtMiepuo-IAccQsUU&red](https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=UYftEAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA2&dq=P.+Mart%C3%ADnez-Pag%C3%A1n,+Tecnolog%C3%ADa+Mineral%C3%Argica,+Cartagena:+Universidad+T%C3%A9cnica+de+Cartagena,+2011.+&ots=XT4vyqxq_5&sig=apv8WuHNxMtMiepuo-IAccQsUU&red)
- [13] H. G. Merkus, Produção, Manuseamento e Caracterização de Materiais Particulados, Países Baixos: Springer Cham, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-20949-4>
- [14] J. Fu, Z. Xue, Z. Chen e L. Ren, "Estudo experimental sobre a distribuição específica da energia de moagem e do tamanho das partículas do grão de milho, espiga e espiga," International Journal of Agricultural and Biological Engineering, vol. 13, n.º 4, p. 135–142, 2020. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20201304.5327>
- [15] G. Niu, T. Zhang, S. Cao, X. Zhang e L. Tao, "Efeito dos Métodos de Moagem do Milho e do Tamanho das Partículas na Digestão Nutricional das Galinhas Chahua," Animals, vol. 13, n.º 14, p. 2364, 2023. <https://doi.org/10.3390/ani13142364>
- [16] P. Tomach, "A Influência do Diâmetro do Meio de Moagem na Eficiência de Moagem num Moinho de Esferas Vibratórias," MDPI, vol. 17, n.º 12, p. 2924, 2024. <https://doi.org/10.3390/ma17122924>
- [17] Y. Catillo Álvarez, R. Jiménez, J. Monteagudo, B. Rodríguez e C. Patiño, "Modelo Matemático para Melhorar a Eficiência Energética em Fábricas de Martelos e a Sua Utilização na Indústria de Alimentação: Análise e Validação num Estudo de Caso em Cuba," Processes, vol. 13, n.º 5, p. 1523., 2025. <https://doi.org/10.3390/pr13051523>
- [18] T. Son, H. B. Trinh, S. Kim, B. Dugarjav e J. Lee, "Estimativa do Consumo de Energia para o Processo de Concentrado de Minério de Tungstênio para a Integração de Fontes de Energia Renovável na Mongólia," Minerals, vol. 13, n.º 8, p. 1059, 2023. <https://doi.org/10.3390/min13081059>
- [19] P. Martínez-Pagán, M. Sinche González e J. Martínez, Operações Mecânicas de Separação Sólido-Líquido, Cartagena: Mc Graw Hill, 2023. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=990926>
- [20] W. Gutiérrez, "Ensaio granulométrico de solo usando o método de peneiração," Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, vol. 7, n.º 2, pp. 6923-69-25, 2023. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v7i2.5834](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i2.5834)
- [21] A. Roca, "Padronização do método de peneiramento para estabelecer critérios de aceitação e/ou rejeição em matérias-primas para uma linha extrudida na indústria alimentar," Universidad de Antioquia, Medellín, Colômbia, 2021. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/server/api/core/bitstreams/beaed1f9-a1d0-49d2-a007-1993bc2de107/content>
- [22] A. Terence, Amostragem de Pó e Determinação do Tamanho das Partículas, Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena, 2023. <https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=5NgqTf9L63kC&oi=fnd&pg=PP1&dq=+Terence,+Powder+Sampling+and+Particle+Size+Determination,+Cartagena:+Universidad+Pol%C3%A9cnica+de+Cartagena,+2023.&ots=1B0GeyOWcy&sig=QkuduBccOmwyOrSmeJxjTPD1>
- [23] P. Mort, "Análise e representação gráfica das distribuições de tamanho de partículas," Powder Technology, vol. 420, p. 118100, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.118100>
- [24] G. Lyman, "Uma Teoria Estatística para Amostragem de Materiais Particulados," Minerals, vol. 13, n.º 7, p. 905, 2023. <https://doi.org/10.3390/min13070905>
- [25] H. Jung, Y. Ju Lee e W. B. Yoon, "Efeito do Conteúdo de Umidade no Processo de Moagem e Propriedades do Pó nos Alimentos: Uma Revisão," Processes, vol. 6, n.º 6, p. 69, 2018. <https://doi.org/10.3390/pr6060069>
- [26] M. Warechowska, "Algumas propriedades físicas dos cereais e consumo energético da moagem," Agricultural Engineering, vol. 1,

- nº 149, pp. 239-2049, 2014.  
<http://dx.medra.org/10.14654/ir.2014.149.025>
- [27] H. V. . J. Dodds, "Caracterização da forma de partículas usando descritores morfológicos," *Caracterização de sistemas de partículas e partículas*, vol. 14, n.º 6, pp. 272-277, 2004.  
<https://doi.org/10.1002/ppsc.19970140603>.
- [28] X. Tian, X. Wang e Z. Wang, "Controlo da distribuição do tamanho das partículas durante a moagem do trigo: qualidade nutricional e base funcional dos produtos de farinha — uma revisão abrangente," *International Journal of Food Science + Technology*, vol. 57, n.º 12, p. 7556–7572, dezembro de 2022.  
<https://doi.org/10.1111/ijfs.16120>
- [29] N. Mohamad, I. Rodriguez-Donis, A. Cavaco-Soares e P. Evon, "Bio-Refinaria de Oleaginosas: Extração de Óleo, Separação de Metabólicos Secundários para a Valorização da Farinha de Proteína — Uma Revisão," *Processes*, vol. 10, n.º 5, p. 841, 2022.  
<https://doi.org/10.3390/pr10050841>
- [30] S. Li, S. Ge, Z. Huang, Q. Wang e H. Zhao, , "Tecnologia de moagem criogénica para medicina tradicional chinesa à base de plantas," *Cryogenics*, vol. 31, n.º 2, pp. 136-137, 1991.  
[https://doi.org/10.1016/0011-2275\(91\)90260-4](https://doi.org/10.1016/0011-2275(91)90260-4)
- [31] N. Yancey, C. T. Wright e T. L. Westover, "Otimização do desempenho do moinho de martelos através da seleção de peneiras e design do martelo," *Biofuels*, vol. 4, n.º 1, pp. 85-94, 2014.  
<https://doi.org/10.4155/bfs.12.77>
- [32] W. B. Rowe, "Rumo à Alta Produtividade na Rectificação de Precisão," *MPDI*, vol. 3, n.º 2, p. 24, 2018.  
<https://doi.org/10.3390/inventions3020024>
- [33] D. Wang, C. He, H. Tian, F. Liu e T. Zhang, "Otimização de parâmetros e investigação experimental no moinho de martelos," *Imateh-Agricultural Engineering*, vol. 62, n.º 3, pp. 342-349, 2020.  
<https://doi.org/10.35633/inmateh-62-36>
- [34] F. Lyu, M. Thomas e W. H. Hendriks, "Distribuição do tamanho das partículas do milho e farinha de soja moída a martelo, a sua composição nutricional e características de digestão in vitro," *Animal Feed Science and Technology*, vol. 281, 2021.  
<https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.115095>
- [35] R. K. Gupta e S. K. Das, "Resistência à fratura de sementes e grãos de girassol à carga compressiva," *Journal of Food Engineering*, vol. 46, n.º 1, pp. 1-8, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00061-3](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00061-3)
- [36] Y. Haddad, F. Mabilille, J. Abecassis e J. Benet, "Propriedades reológicas do endosperma de trigo com uma visão sobre o comportamento de moagem," *Powder Technology*, vol. 105, n.º 1-3, pp. 89-94, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(99\)00122-9](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00122-9)
- [37] J. Ke, X. Wang, X. Gao e Y. Zhou, "Moagem por bolas melhora as características físico-químicas, funcionais e de emulsificação da fibra alimentar insolúvel de *Polygonatum sibiricum*," *MDPI*, vol. 13, n.º 15, p. 2323, 2024. <https://doi.org/10.3390/foods13152323>
- [38] Y. Xie, C. Zhang e S. Mei, "Decisão de otimização dos parâmetros do processo de usinagem considerando o consumo de energia de fresagem e a energia específica de corte," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 128, pp. 786-795, 2025.  
<https://doi.org/10.1016/j.aej.2025.07.034>
- [39] L. Feltner, E. Korte, D. F. Bahr e P. Mort, "Análises de tamanho e forma de partículas para fabrico aditivo em leito de pólvora," *Particuology*, vol. 101, pp. 33-42, 2025.  
<https://doi.org/10.1016/j.aej.2025.07.034>
- [40] Y. Liu, J. Wang, J. C. Barth, K. R. Welsch, V. McIntyre e M. P. Wolcott, "Efeitos do método de moagem em múltiplas etapas no consumo energético dos resíduos florestais cominutivos," *Industrial Crops and Products*, vol. 145, 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111955>
- [41] W. Kruszelnicka, Z. Chen e K. Ambrose, "Propriedades Físico-Mecânicas Dependentes da Humidade do Milho, Arroz e Soja Relacionadas com o Manuseamento e Processamento," *Materials*, vol. 15, n.º 24, p. 8724, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15248729>
- [42] R. Politiek, M. Bruins, J. Keppler e M. Schutyser, "Efeito do teor de óleo na moagem de pinos da soja," *Journal of Food Engineering*, vol. 334, p. 111149, 2022.  
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111149>