



**VICTORIA CARVALHO THOMASI**

**CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE FLUIDODINÂMICA DE  
SEMENTES DE SORGO EM LEITO DE JORRO**

**LAVRAS – MG  
2023**

**VICTORIA CARVALHO THOMASI**

**CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE FLUIDODINÂMICA DE SEMENTES DE SORGO  
EM LEITO DE JORRO**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Iara Hernandez Rodriguez Ansoni

Orientadora

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Isabele Cristina Bicalho

Coorientadora

**LAVRAS – MG**

**2023**

**VICTORIA CARVALHO THOMASI**

**CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE FLUIDODINÂMICA DE SEMENTES DE SORGO  
EM LEITO DE JORRO**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 08 de Dezembro de 2023.

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Iara Hernandez Rodriguez Ansoni – DEG/EENG/UFLA

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Isabele Cristina Bicalho – DEG/EENG/UFLA

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Suellen Mendonça Nascimento – DEG/EENG/UFLA

Lucas Caiafa Cardoso Reis – PPGEAL/UFLA

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Iara Hernandez Rodriguez Ansoni

Orientadora

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Isabele Cristina Bicalho

Coorientadora

**LAVRAS – MG**

**2023**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, cuja divina orientação me permitiu alcançar este momento. Sua benevolência não só me concedeu forças, mas também iluminou cada passo do meu caminho. Com gratidão, reconheço Sua presença constante, guiando-me com amor e sabedoria.

Aos meus pais, Aloizio e Rita, quero expressar minha eterna gratidão por serem uma fonte inabalável de apoio, mesmo à distância, ao longo desses cinco anos. Suas palavras de encorajamento, amor e confiança foram minha força constante, moldando cada passo do meu percurso. Obrigado por serem a âncora que me sustentou durante essa jornada.

Ao meu irmão Victor Hugo, cujas orações desde a infância foram uma bênção constante para alcançar este momento além das ligações em dias difíceis que me trouxeram conforto e alegria. Ao meu querido cachorrinho JP, agradeço por ser minha fonte de amor incondicional.

Ao meu namorado, Vinicius, agradeço por ser meu parceiro dedicado ao longo dessa jornada e por sempre estar ao meu lado, ouvindo meus desabafos e enfrentando juntos os dias mais difíceis.

Aos meus primos, Sergio e Giovana. Muito obrigada pelo apoio desde o começo, vocês foram mais que primos, foram verdadeiros amigos. Lembrar dos momentos felizes, vendo filmes e tomando uma, vai ficar guardado com carinho e saudade. Saibam que esses cinco anos foram muito especiais e espero que nossa ligação continue forte para sempre.

Às minhas queridas tias Noemi, Norozete e Verônica, expresso minha profunda gratidão por todas as orações, mensagens de conforto e cuidado mesmo distante.

À família Siqueira, minha eterna gratidão por serem minha segunda família longe de casa.

Aos demais familiares, pelo carinho, apoio e incentivo.

À minha orientadora Iara pelo apoio constante, incentivo e confiança, expresso minha gratidão. Sua dedicação e sabedoria ao me orientar que me guiaram por cada etapa deste trabalho.

À minha coorientadora Isabele e ao seu mestrando Lucas por toda assistência prestada ao longo deste trabalho.

Aos meus amigos e em especial ao Rafael (Bruno), além das risadas animadas no centro de convivência, agradeço por estarem ao meu lado nos momentos de desespero e raiva. Vocês fizeram da faculdade uma experiência incrível.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Engenharia - ABI, que me proporcionaram uma formação de excelência, tanto profissional quanto pessoal. Agradeço também a todos os professores, colegas e funcionários que, de alguma forma, contribuíram para minha jornada acadêmica.

## RESUMO

O sorgo destaca-se como o quinto cereal mais plantado globalmente, com potencial para produção de bioetanol devido à sua composição rica em açúcares. Sua resistência à seca, cultivo na safrinha e baixa suscetibilidade a micotoxinas o tornam essencial para a segurança alimentar mundial. Diante disso, este estudo teve como objetivo caracterizar as propriedades físicas das sementes de sorgo e compreender o comportamento fluidodinâmico delas em leito de jorro, estudando-se o efeito de diferentes cargas de sementes sobre a dinâmica das partículas. Inicialmente, foi realizada a caracterização física das sementes de sorgo, incluindo a determinação do diâmetro médio, esfericidade, densidade aparente, peso de mil sementes e teor de umidade. Posteriormente, realizou-se a caracterização do meio poroso, obtendo os dados de densidade *bulk* e *bulk* compactada, porosidade *bulk* e ângulo de repouso dinâmico e estático. Em seguida, foi feita a análise da curva característica do leito de jorro que apresentou um comportamento consistente com o padrão esperado, possibilitando a identificação da velocidade mínima de jorro, e da queda de pressão máxima e queda de pressão de jorro estável para as cargas de 1000g, 1400g e 1800g de sementes. Com base nas análises realizadas, tem-se que as sementes de sorgo apresentam características esféricas, alta densidade aparente e baixa umidade, e são classificadas no grupo D do diagrama de Geldart o que indica um comportamento fluidodinâmico favorável ao leito de jorro. Além disso, os resultados indicam uma boa fluidez das sementes, isto é, uma excelente capacidade de movimentação mesmo sob condições de compactação. A partir da curva característica constatou-se um aumento nos valores de queda de pressão máxima e queda de pressão de jorro estável com o aumento da carga de sementes, enquanto verificou-se que não há influência da carga sobre a velocidade mínima de jorro na faixa analisada.

**Palavras-chave:** grãos de sorgo, fluidização, propriedades físicas, curva característica.

## ABSTRACT

Sorghum stands out as the fifth most planted cereal globally, with the potential for bioethanol production due to its sugar-rich composition. Its drought resistance, cultivation in the off-season, and low susceptibility to mycotoxins make it essential for global food security. Therefore, this study aimed to characterize the physical properties of sorghum seeds and comprehend their fluid dynamic behavior in spouted beds, exploring different seed masses to understand their impact on the process dynamics. Initially, the physical characterization of sorghum seeds was conducted, including the determination of average diameter, sphericity, true density, weight of a thousand seeds, and moisture content. Subsequently, the characterization of the porous medium was performed, obtaining data on loose and compacted bulk density, bulk porosity, and the dynamic and static angle of repose. Next, an analysis of the characteristic curve of the spouted bed was conducted, which exhibited a consistent behavior with the expected pattern. This allowed for the identification of the minimum fluidization velocity and stable pressure drop for the loads of 1000g, 1400g, and 1800g. Based on the conducted analyses, sorghum seeds exhibited spherical characteristics, high true density, and low moisture content, classifying them in Group D of the Geldart diagram. This indicates a dynamic behavior favorable to the spouted bed. Furthermore, the flowability of the seeds is highlighted, demonstrating excellent movement even under high compaction. In the fluid dynamic analysis, it was observed that both the maximum and stable pressure drop increased with the higher load, while the minimum fluidization velocity remained within the same range of values.

**Keywords:** Seeds, fluidization, physical properties, characteristic curve.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Planta, panícula e semente de sorgo.....	13
Figura 3.2 - Estrutura anatômica do grão de sorgo.....	15
Figura 3.3 - Diagrama esquemático de um leito de jorro. ....	17
Figura 3.4 - Regiões características do leito de jorro. ....	18
Figura 3.5 - Transição dos regimes de escoamento em leito em função do aumento da vazão de gás. ....	20
Figura 3.6 - Curva característica do leito de jorro.....	23
Figura 3.7 - Desenvolvimento do jorro. ....	24
Figura 3.8 - Diagrama de Geldart.....	26
Figura 4.1 - Sementes de sorgo. ....	28
Figura 4.2 - Dimensões características de uma partícula. ....	30
Figura 4.3 - Paquímetro utilizado para medição das dimensões da semente de sorgo.....	31
Figura 4.4 - Medição da densidade aparente. ....	32
Figura 4.5 - Instrumento utilizado para medição da densidade <i>bulk</i> compactada.....	35
Figura 4.6 - Diagrama esquemático do método de tambor rotativo para determinação do ângulo de repouso dinâmico. ....	37
Figura 4.7 - Aparato utilizado para medição do ângulo de repouso dinâmico.....	38
Figura 4.8 - Esquema do procedimento para medição do ângulo de repouso estático.....	39
Figura 4.9 - Unidade de leito de jorro. ....	40
Figura 5.1 - Imagem utilizada para obtenção do diâmetro médio das sementes utilizando o <i>software ImageJ</i> .....	43
Figura 5.2 - Classificação da semente de sorgo pelo diagrama de Geldart.....	45
Figura 5.3 - Curva característica das sementes de sorgo em leito de jorro. ....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Relação entre o ângulo de repouso e a escoabilidade do material granulado. ....	36
Tabela 5.1 - Diâmetro das sementes de sorgo. ....	42
Tabela 5.2 - Esfericidade das sementes de sorgo. ....	44
Tabela 5.3 - Densidade aparente, <i>bulk</i> e <i>bulk</i> compactada das sementes de sorgo. ....	44
Tabela 5.4 - Umidade das sementes de sorgo. ....	46
Tabela 5.5 - Ângulo de repouso para as sementes de sorgo. ....	47
Tabela 5.6 - Parâmetros fluidodinâmicos do leito de jorro para diferentes cargas de semente de sorgo. ....	49

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
2	OBJETIVOS.....	12
2.1	Objetivo geral.....	12
2.2	Objetivos específicos.....	12
3	REFERÊNCIAL BIBLIOGRÁFICO.....	13
3.1	Sorgo.....	13
3.2	Leito de jorro.....	16
3.2.1	Regiões características do leito de jorro.....	18
3.2.2	Regimes de escoamento.....	19
3.2.3	Tipos de leito de jorro.....	21
3.2.4	Fluidodinâmica do leito de jorro.....	22
3.2.5	Classificação das partículas.....	25
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
4.1	Matéria-prima.....	28
4.2	Caracterização das sementes de sorgo.....	29
4.2.1	Diâmetro médio.....	29
4.2.2	Esfericidade.....	30
4.2.3	Densidade aparente.....	31
4.2.4	Peso de 1000 sementes.....	33
4.2.5	Umidade.....	33
4.3	Caracterização do meio poroso.....	34
4.3.1	Densidade <i>bulk</i> .....	34
4.3.2	Densidade <i>bulk</i> compactada.....	34
4.3.3	Porosidade <i>bulk</i> .....	35
4.3.4	Ângulo de repouso.....	36
4.4	Unidade experimental.....	39
4.5	Caracterização fluidodinâmica do leito de jorro.....	40
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
5.1	Caracterização das sementes e do meio poroso.....	42
5.2	Curva característica.....	48
6	CONCLUSÕES.....	50
	REFERÊNCIAS.....	51

## 1 INTRODUÇÃO

O sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] é um cereal cultivado em regiões tropicais e subtropicais e é o quinto cereal mais plantado no mundo (INACIO, 2023). Com uma composição semelhante ao milho e à cana, o sorgo possui em seus colmos grandes quantidades de açúcares, como sacarose, frutose e glicose, tornando o caldo extraído facilmente fermentado para a produção de bioetanol (BARCELOS, 2021). A preocupação global com o meio ambiente e o aumento dos preços do petróleo têm impulsionado a busca por fontes de energia renováveis, fazendo com que o sorgo, um cereal com alto potencial para a produção de bioetanol, seja cada vez mais estudado (FERNANDES, *et al.*, 2014).

Ademais, o sorgo se destaca por sua resistência à seca superior em comparação com outras culturas. Do ponto de vista econômico, o cultivo de sorgo granífero em safras secundárias (safrinha) após culturas de verão como a soja, tem desempenhado um papel crucial na oferta sustentável de grãos de baixo custo para a indústria de rações (FERNANDES, *et al.*, 2020).

Além disso, a capacidade de se cultivar o grão em períodos mais tardios, quando as chuvas são menos frequentes, o posiciona como uma alternativa viável ao milho em regiões semiáridas, além de possuir uma baixa suscetibilidade à micotoxinas quando comparado a este cereal (SILVA *et al.*, 2015). Tais características conferem ao sorgo um papel fundamental na segurança alimentar global, pois o grão pode ser considerado como uma fonte confiável de alimentos e ração animal em áreas propensas a secas, além de apresentar um alto valor nutricional sendo rico em proteínas, carboidratos, fibras e vitaminas (RIBAS, 2003).

Alguns trabalhos da literatura apresentam dados de caracterização de sementes de sorgo tais como: dimensões dos grãos, massa de mil grãos, densidades aparente, *bulk* e *bulk* compactada, porosidade, ângulo de repouso e umidade (GEISEN *et al.*, 2021; MWITHIGA e SIFUNA, 2005; ADINOYI *et al.*, 2017; MI *et al.*, 2022; ESTECA *et al.*, 2017; DA SILVA, 2020). A obtenção dessas propriedades é essencial para o projeto de equipamentos agrícolas, a otimização de processos de manuseio e armazenamento de grãos, controle de qualidade industrial, eficiência energética de processos tais como a secagem, aeração, e a avaliação agrônômica para se determinar o momento ideal de colheita, além de atribuir qualidade, segurança e eficiência ao processo.

Um equipamento bastante utilizado em diversas áreas industriais é o leito de jorro, que se destaca pelas suas altas taxas de transferência de calor e massa. Devido à sua aplicabilidade em diversas operações e processos, tais como a secagem de sólidos, é essencial compreender o comportamento fluidodinâmico das fases sólido-gás no interior do equipamento visando a otimização dos processos. Uma série de parâmetros fluidodinâmicos influencia diretamente na eficiência dos mecanismos de transporte no leito, e com isso, seu conhecimento se torna crucial para a concepção e aprimoramento de sistemas que envolvem a fluidização de partículas, como operações de granulação, reações químicas e secagem (OLAZAR *et al.*, 2003).

Diante do exposto, no presente trabalho realizou-se a caracterização física de sementes de sorgo e do meio poroso e foi investigado o seu comportamento fluidodinâmico em leito de jorro através da obtenção da curva característica de queda de pressão em função da velocidade do ar. A curva característica foi obtida para diferentes cargas de sementes a fim de se avaliar o efeito da quantidade de partículas no comportamento fluidodinâmico do leito.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo geral

Caracterizar sementes de sorgo e o meio poroso formado por elas e realizar a análise fluidodinâmica do seu comportamento em leito de jorro.

### 2.2 Objetivos específicos

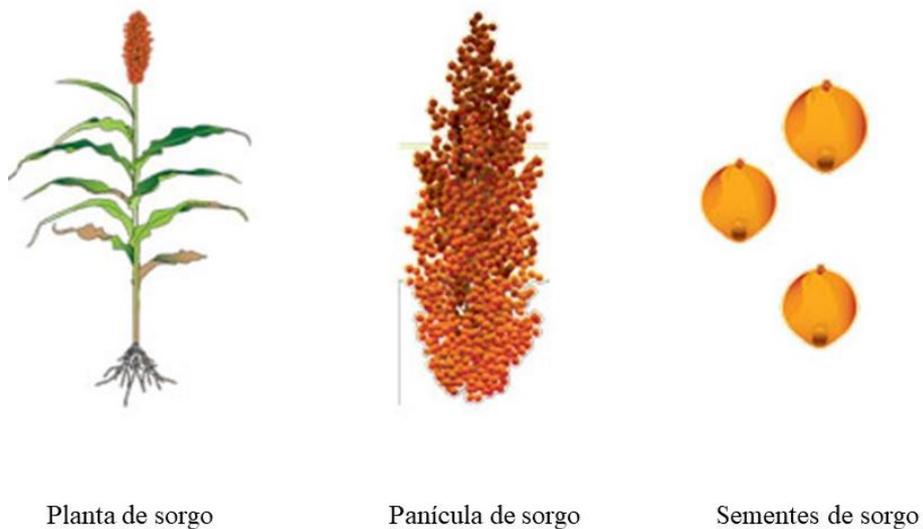
- Realizar a caracterização das sementes de sorgo a partir da medição das seguintes propriedades: esfericidade, densidade aparente e diâmetro médio.
- Caracterizar o meio poroso através da obtenção dos dados de densidades *bulk* e *bulk* compactada, porosidade *bulk* e ângulo de repouso dinâmico e estático.
- Realizar a caracterização fluidodinâmica do leito de jorro através do levantamento das curvas características de queda de pressão em função da velocidade do ar de alimentação utilizando diferentes cargas de sementes de sorgo para obtenção dos seguintes parâmetros fluidodinâmicos: velocidade mínima de jorro, queda de pressão estável do jorro e queda de pressão máxima.

### 3 REFERÊNCIAL BIBLIOGRÁFICO

#### 3.1 Sorgo

O sorgo é um cereal originário do Noroeste da África, da família *Poaceae* e gênero *Sorghum* e é dividido em cinco espécies básicas, sendo a *Sorghum bicolor* L. Moench a mais cultivada mundialmente (ANDRADE NETO, 2018). Adicionalmente, as inflorescências do sorgo são caracterizadas como panículas, onde seus ramos florais se ramificam a partir de um ponto central e podem variar em cores, como branco, vermelho, amarelo ou marrom, e abrigam as sementes, representando os grãos de sorgo, conforme ilustrado na Figura 3.1 (MAGALHÃES, DURÃES e RODRIGUES, 2003).

Figura 3.1 – Planta, panícula e semente de sorgo.



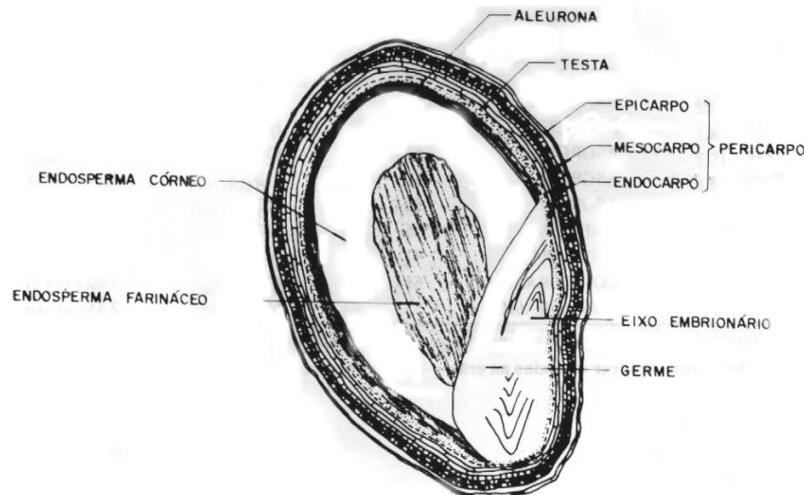
Fonte: Ciampitti e Carcedo (2022).

O cereal é classificado em quatro grupos: granífero, sacarino, vassoura e forrageiro. O granífero é o tipo mais comum e é empregado na alimentação de animais na forma de farelo ou, em algumas regiões globais, na alimentação humana em farinhas, amidos, ceras, cerveja e óleo, apresentando porte baixo com densa panícula de grãos, adaptadas à colheita mecânica.

O sacarino é cultivado primariamente para a produção de açúcar e etanol e na confecção de silagem, além de possuir um ciclo de produção rápido, comparável ao da cana-de-açúcar, se destacando não apenas como matéria-prima para açúcar e biocombustíveis, mas também desempenhando um papel relevante na produção de glicose, frutose e sacarose. O sorgo vassoura é utilizado como matéria prima para a produção de vassouras, escovas e ornamentação e o forrageiro é usado no setor agropecuário, no pastejo, corte verde, fenação e cobertura morta (TABOSA, 2019). Além disso, a semente vem se destacando no meio agropecuário brasileiro devido a sua versatilidade, alta produtividade e fácil adaptação em diversos ambientes (SILVA, *et al.*, 2021).

O grão de sorgo é uma cariopse nua, não possuindo uma casca e, além disso, é indeiscente, não abrindo para liberar a sua semente. Ele é composto por três componentes anatômicos principais: pericarpo, endosperma e gérmen conforme apresentados na Figura 3.2. O pericarpo é a camada externa do grão que é dividida em epicarpo, camada mais externa que protege o grão; mesocarpo, parte intermediária fornecendo energia; e endocarpo, camada interna responsável pela fertilização da planta (MOCELLIN e MARQUEZI, 2021). O endosperma é a parte intermediária do grão e atua como tecido reserva, armazenando nutrientes essenciais como proteína e amido. Ele é composto pelo endosperma farináceo, o mais interno e o endosperma córneo, mais externo e a camada de aleurona ou periférico (BATISTA, 2023). O gérmen é a camada interna que contém o embrião da planta sendo constituído pelo eixo embrionário, responsável pelo crescimento da planta e pelo escutelo, encarregado de armazenar os nutrientes para o embrião (GARCIA, 2020).

Figura 3.2 - Estrutura anatômica do grão de sorgo.



Fonte: Silva (2018).

O sorgo é um cereal nutritivo que se caracteriza pelo alto teor de energia e lipídios, com um conteúdo que supera os encontrados no trigo e no arroz, além de sua composição de ácidos graxos ser semelhante à do óleo de milho. O cereal também é uma boa fonte de vitaminas tais como, cálcio, cobre, fósforo, ferro, zinco, magnésio e enxofre, no entanto, esses nutrientes estão concentrados na aleurona e no gérmen, que são removidos por exemplo, na produção de farinha (QUEIROZ, *et al.*, 2015). Além disso, o sorgo também é considerado uma boa fonte de fitoesteróis, que são compostos vegetais que podem ajudar a reduzir o colesterol LDL, encontrados principalmente nas partes externas do grão (AWIKA e ROONEY, 2004).

No Brasil, o cultivo do sorgo está em expansão devido a diversos fatores, como o aumento da demanda por alimentos para animais, e à resistência do grão às condições adversas o que possibilita o seu cultivo em áreas marginais. Em um estudo recente divulgado pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) em 2022, constatou-se que o Brasil desempenha um papel significativo na produção global de sorgo, contribuindo com aproximadamente 5% do total, sendo posicionado em 8º lugar no ranking mundial de produção. A liderança desse ranking é ocupada pela Nigéria, representando 12% da produção global, seguida pelo Sudão, que contribui com 10%.

O cereal é versátil e desempenha um papel crucial na alimentação animal devido aos seus grãos, ricos em amido, proteína, fibras e minerais, serem uma fonte energética essencial

para aves, suínos, bovinos e ovinos, podendo ser moídos para produção de rações ou fornecidos inteiros. O cultivo de sorgo para forragem, rica em fibras vitais para a saúde digestiva de animais ruminantes, oferece opções de pastejo ou colheita para silagem, fonte valiosa de energia e fibras, especialmente em períodos de escassez de pasto (BUSO, et al., 2011).

O consumo humano do grão também vem registrando um aumento nos últimos anos, especialmente na forma de biscoitos, pães, massas, e outros produtos obtidos a partir da farinha do grão. Entretanto, sua utilização para esses fins não é muito usual sendo uma prática tradicional concentrada na África central e no sul asiático, regiões onde o cereal foi originado. Nessas áreas, o sorgo é comumente empregado na confecção de pães, cuscuz, bebidas alcoólicas e não alcoólicas, e outras preparações utilizando o grão inteiro e alimentos destinados ao desmame de bebês (BORGES, 2013).

Durante o processamento do grão de sorgo, algumas etapas são fundamentais para assegurar a sua qualidade. Desde a colheita até a preparação para consumo, procedimentos como limpeza, moagem e torrefação desempenham papéis cruciais, destacando-se a etapa de secagem, a qual desempenha um papel vital na preservação da integridade do grão e na prevenção de sua rápida deterioração. Entre as diversas técnicas de secagem existentes, o leito de jorro surge como uma alternativa promissora devido à sua capacidade de facilitar um contato eficaz entre as fases gás e sólido, sendo especialmente aplicável às partículas de maior granulometria que podem ocasionar complicações em processos de fluidização (BATISTA, 2021). Portanto, a análise da fluidodinâmica de sementes de sorgo em leito de jorro, é essencial para auxiliar o desenvolvimento de pesquisas sobre secagem e outras operações industriais que envolvam o processamento do grão de sorgo.

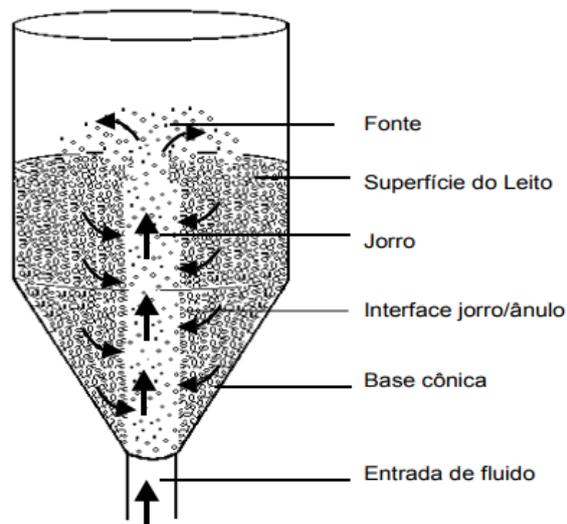
### **3.2 Leito de jorro**

O leito de jorro é um equipamento que foi desenvolvido por Mathur e Gisher em 1954, durante a realização de um experimento de secagem de grãos de trigo em leito fluidizado. Durante o experimento, ocorreu um rompimento acidental na placa de distribuição de ar, causando um aumento repentino do fluxo de ar. Os pesquisadores observaram que as partículas sujeitas a esse fluxo mais intenso exibiam movimentos cíclicos, diferente do

movimento aleatório das partículas em leitos fluidizados, levando então ao desenvolvimento do conceito de leito de jorro.

O equipamento consiste em uma câmara cilíndrica conectada a uma base cônica por onde o fluido é introduzido através de um orifício, conforme apresentado na Figura 3.3.

Figura 3.3 - Diagrama esquemático de um leito de jorro.



Fonte: Fernandes (2005).

Ao injetar o fluido, são formados caminhos preferenciais para o fluxo de ar principalmente no meio do leito. Com o aumento do fluxo de ar, as partículas são suspensas até a criação do jorro, ou seja, uma cavidade é formada no centro do leito de sólidos. Nessa área, a quantidade de partículas é menor, e o fluido transporta essas partículas até o topo do leito onde a velocidade do fluido diminui, fazendo com que as partículas caiam de volta para a parte inferior do leito, estabelecendo um padrão de movimento cíclico no sistema (SANTOS, 2022).

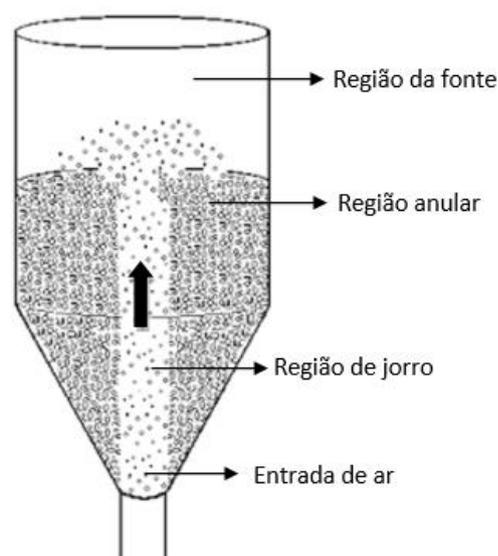
De maneira geral, o leito de jorro é um equipamento amplamente empregado em diversas indústrias e operações, incluindo secagem de grãos, cereais e polpas, processos como recobrimento de partículas, granulação, reações químicas gás-partícula, combustão, aquecimento e resfriamento de sólidos (CREMASCO, 2018).

Mathur e Epstein (1974) constataram que o emprego do leito de jorro apresenta benefícios significativos na secagem de produtos sensíveis ao calor devido à possibilidade da aplicação de uma alta taxa de fluxo de ar quente de forma controlada sem prejudicar a integridade dos grãos. Isso se deve à dinâmica do leito de jorro, onde as partículas são fluidizadas pelo fluxo de ar ascendente, criando uma mistura homogênea que permite uma transferência eficiente de calor. A alta taxa de fluxo de ar quente possibilita uma rápida remoção da umidade da superfície do material, contribuindo para a secagem eficaz, além da natureza suave e controlada do processo fazendo que evite danos aos grãos e garantindo a preservação da qualidade do produto final (FREIRE e ALBINI, 2019).

### 3.2.1 Regiões características do leito de jorro

A injeção de fluido na parte inferior do leito de jorro determina a formação de diferentes regiões de contato entre o fluido e as partículas. Essas regiões são caracterizadas por padrões distintos, sendo as principais denominadas jorro, anular e fonte conforme mostrado na Figura 3.4 (SANTOS, 2022).

Figura 3.4 - Regiões características do leito de jorro.



Fonte: Adaptado de Fernandes (2005).

A região de jorro ou central é a parte do leito de jorro onde as partículas sólidas são impulsionadas para cima pelo ar em um movimento ascendente. O fluido flui predominantemente no centro do leito, e as partículas são carregadas nesse fluxo ascendente. Essa região é caracterizada por um alto fluxo de gás e um movimento rápido das partículas, que formam um núcleo ascendente (LONDE, 2021; KACHINSKI e STAHLSCHMIDT, 2018).

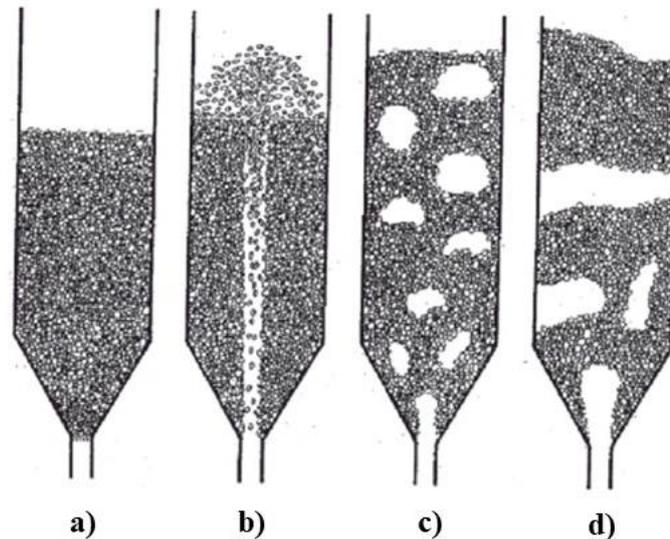
Já a região anular é a área ao redor da região central onde as partículas sólidas são deslocadas do centro em direção à parede do leito, escoando de forma contracorrente em relação ao fluido. Nessa região a velocidade do fluido é menor do que na região central, e as partículas tendem a se mover mais lentamente (LONDE, 2021; KACHINSKI e STAHLSCHMIDT, 2018).

Por fim, a região de fonte é aquela situada acima do leito, onde as partículas começam a diminuir sua velocidade e, ao alcançarem uma altura específica, se dispersam radialmente em direção à região anular (LONDE, 2021; KACHINSKI e STAHLSCHMIDT, 2018).

### **3.2.2 Regimes de escoamento**

A velocidade de entrada do ar na base do leito define a formação de diferentes regimes de escoamento no leito. A formação do regime de jorro pode ser observada visualmente e ocorre em uma faixa definida de velocidade do gás para uma determinada quantidade de sólidos e configuração do leito. A Figura 3.5 ilustra a transição de um leito estático para um leito jorrante, depois para um leito borbulhante e, muitas vezes, para um leito *slugging*, à medida que a velocidade do gás é aumentada (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

Figura 3.5 - Transição dos regimes de escoamento em leito em função do aumento da vazão de gás.



Legenda: (a) Leito fixo ou estático; (b) Leito de jorro; (c) Leito borbulhante; (d) Leito *slugging* (Pistão).

Fonte: Adaptado de Epstein e Grace (2011).

Mathur e Epstein (1974) estabeleceram as categorias de regimes de escoamento, as quais podem apresentar variações devido a fatores como a velocidade do ar, a classificação das partículas desenvolvido por Geldart (1973), as propriedades do gás, as características geométricas do equipamento e a altura do leito.

No estágio inicial, que caracteriza o regime de leito fixo, as partículas sólidas permanecem em repouso, sem exibir movimentos significativos (Figura 3.5 (a)). Já no regime de jorro observa-se o fenômeno de *spouting*, que é desencadeado pela injeção de gás a uma velocidade específica do gás, resultando na formação de um jorro vertical ascendente de partículas e fazendo com que o leito assumo um comportamento similar ao de um jato, com partículas ascendendo junto com o fluxo de gás (Figura 3.5 (b)) (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

À medida que a velocidade do gás é aumentada além da região de jorro, o leito pode entrar em uma fase de borbulhamento. Nessa fase, pequenas bolhas de gás começam a subir

através do leito de partículas, criando um movimento mais turbulento (Figura 3.5 (c)) (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

Com velocidades ainda maiores, o leito pode entrar em uma fase de leito pulsante ou *slugging*, onde grandes bolsas de gás são formadas e sobem intermitentemente. Isso cria um comportamento pulsante do leito, o que pode ser visualmente observado (Figura 3.5 (d)) (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

### 3.2.3 Tipos de leito de jorro

O leito de jorro pode apresentar uma variedade de tipos, de acordo com sua geometria e características específicas. O leito de jorro cônico é um tipo de leito de jorro caracterizado por possuir apenas uma base cônica. Devido à forma cônica do leito, que permite que o fluido flua mais uniformemente por toda sua superfície, evitando a formação de zonas de alta e baixa concentração de sólidos, essa configuração apresenta como principal vantagem uma maior capacidade de carga, ou seja, para uma mesma altura do leito, é possível alimentar uma carga inicial maior do que aquela comparada com um leito convencional, onde o ângulo da base tronco-cônica é igual ao ângulo do leito cônico (LOURENÇO, 2006; VIEIRA NETO, 2007).

Há também o leito de jorro com tubo interno ou *draft*, sendo este uma variação que apresenta melhorias no comportamento fluidodinâmico devido ao tubo que direciona o ar para a região central do jorro, reduzindo a queda de pressão. A principal vantagem desse tipo de leito é a diminuição da distribuição do tempo de residência das partículas, fazendo com que elas fiquem mais tempo no leito. No entanto, essa configuração possui como desvantagem a diminuição das taxas de transferência de calor e massa nessa região, o que pode acarretar prejuízo às operações de secagem, por exemplo (LOURENÇO, 2006; VIEIRA NETO, 2007).

A configuração de leito de jorro tipo aerado é caracterizado pela introdução de uma vazão de ar auxiliar na porção cônica do leito, resultando em um aumento significativo da porosidade nessa região, proporcionando melhorias nas taxas de transferência de calor e massa no processo (LOURENÇO, 2006; VIEIRA NETO, 2007).

O leito de sessão retangular é constituído por um prisma retangular com uma base em forma de tronco de pirâmide, sendo amplamente empregado para investigações sobre a

influência do ângulo da base como uma das variáveis no processo de recobrimento (LOURENÇO, 2006; VIEIRA NETO, 2007).

Por fim, o leito vibro-jorrado se destaca pela intensificação do movimento das partículas, resultante da agitação promovida por um sistema mecânico de vibração posicionado na base do leito. Esse mecanismo proporciona uma abordagem eficaz para aprimorar a distribuição e a interação das partículas no processo (LOURENÇO, 2006; VIEIRA NETO, 2007).

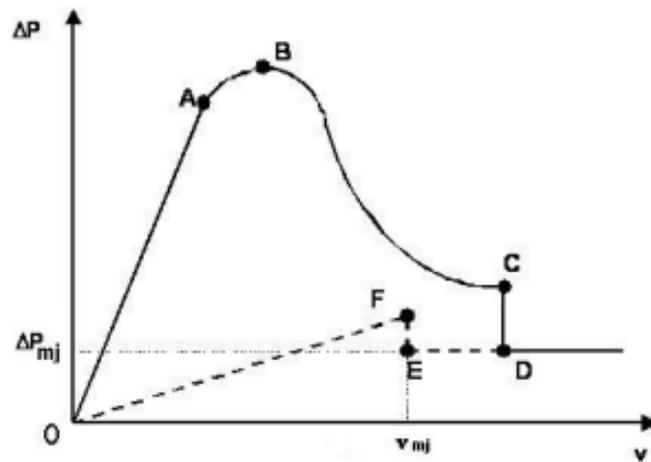
### **3.2.4 Fluidodinâmica do leito de jorro**

A fluidodinâmica de um leito de jorro é um campo de estudo complexo que investiga a interação entre o fluido e as partículas, sendo importante para a análise do desempenho de diversos processos industriais, tais como secagem, calcinação, combustão, reações químicas, entre outros. Alguns parâmetros importantes relacionados à fluidodinâmica do leito de jorro são: a velocidade de jorro mínimo, a queda de pressão de jorro mínimo e a queda de pressão máxima.

#### **3.2.4.1 Curva característica**

A curva característica de um leito de jorro é um gráfico (Figura 3.6) que relaciona a queda de pressão no leito com a velocidade do fluido, representando o comportamento fluidodinâmico do leito. Através dessa curva é possível determinar parâmetros fluidodinâmicos tais como a velocidade de jorro mínimo, a queda de pressão de jorro mínimo e a queda de pressão máxima (BACELOS, 2006).

Figura 3.6 - Curva característica do leito de jorro.



Fonte: Barcelos (2006)

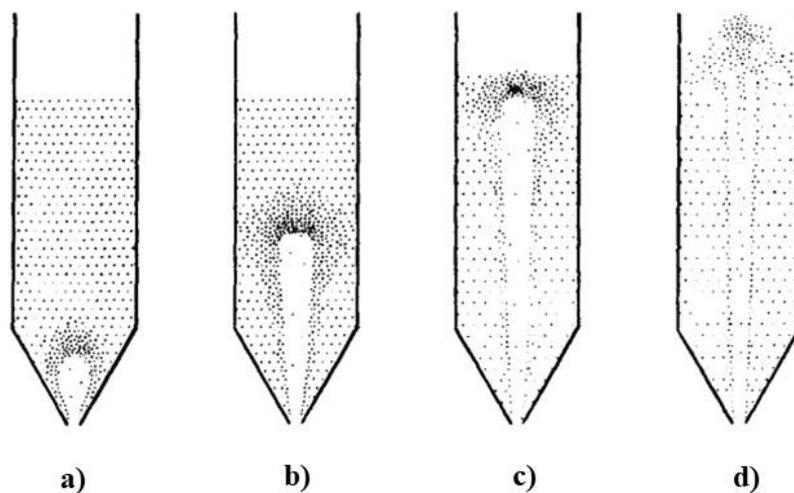
Conforme descrito por Mathur e Epstein (1974), inicialmente, o aumento da queda de pressão em relação ao aumento de velocidade do fluido é linear, ou seja, à medida que a velocidade do fluido aumenta, a queda de pressão também aumenta, o que pode ser observado da origem até o ponto A. Isso ocorre pois o ar flui pelo leito atravessando os espaços vazios sem provocar modificações perceptíveis (Figura 3.7.a).

Dos pontos A até B há uma mudança de comportamento das partículas onde elas começam a apresentar um comportamento não linear devido à alta velocidade do ar que cria uma cavidade acima da entrada de ar no leito, comprimindo as partículas ao redor e formando um arco compacto que diminui a porosidade e aumenta a resistência ao fluxo de fluido. Este aumento de velocidade do ar estende essa cavidade para um jorro interno, resultando no aumento da queda de pressão até atingir o valor máximo no ponto B (Figura 3.7.b) (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

A partir desse ponto, o aumento da velocidade ar começa a resultar na quebra do aglomerado de partículas e, como resultado, é ocasionada uma queda de pressão até o ponto C, conhecido como jorro incipiente, onde as partículas começam a se mover como um jorro, marcando a transição entre a fluidização e o escoamento das partículas (Figura 3.7.c). A queda de pressão de jorro estável é alcançada em D, a partir da qual a queda de pressão permanece constante com o aumento da velocidade do ar (Figura 3.7.d) (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

Ao realizar o processo inverso através da diminuição da velocidade do gás, o ponto E é atingido. Nesse ponto, a velocidade do ar e a queda de pressão são as mínimas necessárias para manter o jorro e uma pequena redução na velocidade nesta fase faz com que o jorro colapse e a perda de carga aumente repentinamente para o ponto F (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

Figura 3.7 - Desenvolvimento do jorro.



Legenda: (a) cavidade é formada; (b) cavidade se alonga (jorramento interno); (c) leito se expande (jorro incipiente); (d) jorramento estável.

Fonte: Adaptado de Mathur e Epstein (1974)

### 3.2.4.2 Parâmetros fluidodinâmicos

Para entender o comportamento da fluidodinâmica do leito de jorro é essencial determinar o valor de parâmetros, como a queda de pressão máxima, queda de pressão de jorro estável e velocidade de jorro mínimo. A queda de pressão máxima representa o pico de queda de pressão atingido antes do início do jorro, enquanto a queda de pressão de jorro estável é a queda de pressão constante que ocorre quando o jorro já está estabelecido (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

A queda de pressão máxima é a energia necessária para que o fluxo de gás rompa a estrutura do leito compactado e se estabeleça um jorro interno, sendo um parâmetro importante para análise e dimensionamento de sistemas industriais (CUNHA, 2008). Já a queda de pressão de jorro estável, juntamente com a velocidade mínima de jorro, é responsável pela determinação da potência de operação do leito (SILVA, 1998).

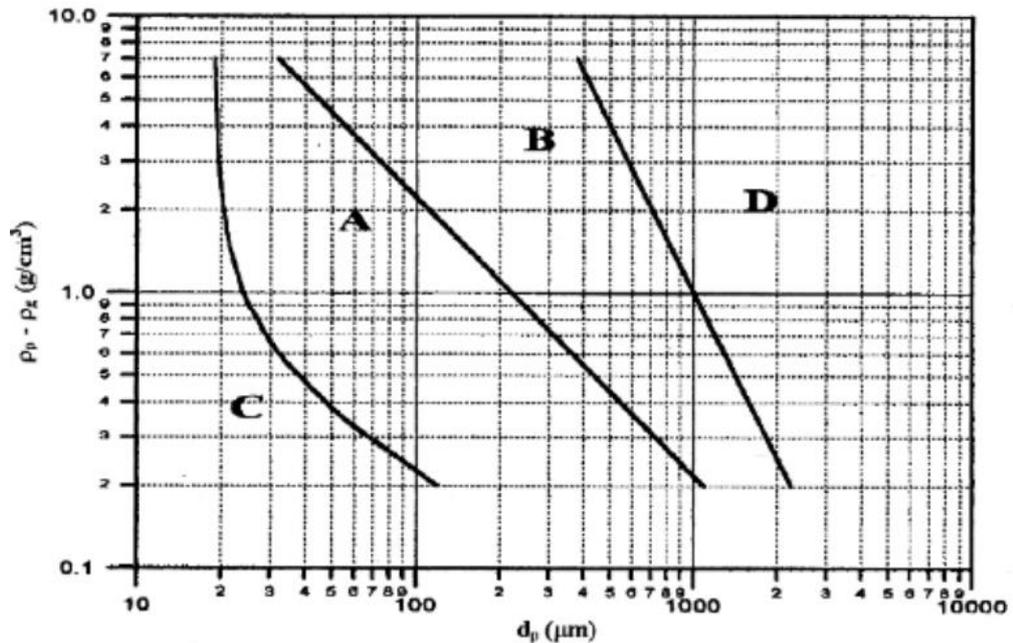
A velocidade de jorro mínimo é a velocidade mínima do fluido na qual o leito permaneceria no estado de jorro (MATHUR e EPSTEIN, 1974). Esse parâmetro é obtido através da diminuição gradual da velocidade do fluido até o ponto de colapso do jorro, quando as partículas se sedimentam e o leito se torna estável.

De acordo com Cunha (2008), a velocidade mínima de jorro é influenciada pelas propriedades do sólido e do fluido, bem como pela geometria do leito. Em um leito de jorro convencional, para um dado material, a velocidade mínima de jorro aumenta com o aumento da altura do leito de sólidos e com a diminuição do diâmetro da coluna.

### **3.2.5 Classificação das partículas**

Geldart (1973) classificou as partículas em quatro categorias (A, B, C e D), conforme seu comportamento de fluidização. O diagrama apresentado na Figura 3.6 ilustra essa classificação das partículas em função do seu diâmetro e da diferença entre as densidades da partícula sólida e do fluido.

Figura 3.8 - Diagrama de Geldart.



Fonte: Geldart (1973).

As partículas categorizadas como pertencentes ao grupo A demonstram uma facilidade à fluidização. Em geral, essas partículas apresentam um diâmetro que varia entre 20 e 1000  $\mu\text{m}$  e/ou uma densidade de partículas relativamente baixa, geralmente inferior a aproximadamente 1,4  $\text{g/cm}^3$  como, por exemplo, catalisadores (KACHINSKI e STAHLSCMIDT, 2018).

O Grupo B é denominado “fluidização do tipo areia” ou “borbulhante” devido à sua característica, na qual as partículas desse grupo têm a tendência de formar bolhas em ou ligeiramente acima da velocidade mínima de fluidização. Nesse contexto, o leito apresenta uma expansão mínima, e a descompressão do leito ocorre de forma rápida quando o fornecimento de gás é interrompido. Este grupo inclui materiais com tamanhos médios de partículas situados entre 40  $\mu\text{m}$  e 500  $\mu\text{m}$ , apresentando uma densidade de partículas que varia de 1,4 a 4  $\text{g/cm}^3$ , sendo a areia o pó mais representativo dentro desses parâmetros (GELDART, 1973).

As menores partículas do diagrama fazem parte do grupo C, possuindo uma densidade de partículas de 1,2  $\text{g/cm}^3$  e um tamanho de partícula menor ou igual à de 45  $\mu\text{m}$ . Elas são coesas, ou seja, possuem um tamanho tão pequeno que acabam grudando umas nas outras

como imãs fracos devido a diferentes tipos de forças presentes. Como resultado disso, na maior parte do tempo, o ar que deveria entrar nas partículas e fazer com que elas flutuassem acaba passando ao redor delas, tornando o processo de fluidização ineficaz (COCO e CHEW, 2023).

Por fim, o grupo D possui partículas caracterizadas por seu tamanho grande, excedendo 650  $\mu\text{m}$ , e/ou alta densidade, e, por conta disso, apresentam uma natureza que não favorece uma fluidização eficiente. Essas características específicas tornam essas partículas propensas a uma baixa capacidade de fluidização, o que significa que elas não se comportam de maneira eficiente quando submetidas a fluxos de gás e, por conta disso, são frequentemente empregadas em aplicações em leitos de jorro (GELDART, 1973).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Matéria-prima

Para a realização dos experimentos, foram utilizadas sementes de sorgo adquiridas na Fazenda Palmital da Universidade Federal de Lavras, que já se encontravam em condições adequadas para o uso (Figura 4.1).

Figura 4.1 - Sementes de sorgo.



Fonte: Da autora (2023).

A fim de caracterizar as sementes e o meio poroso, foram avaliadas diversas propriedades, incluindo diâmetro médio das partículas, esfericidade, densidade aparente, *bulk* e *bulk* compactada, porosidade *bulk*, peso de mil sementes, umidade e ângulo de repouso. Os métodos experimentais utilizados para essas determinações são descritos a seguir.

## 4.2 Caracterização das sementes de sorgo

### 4.2.1 Diâmetro médio

O diâmetro é a distância entre os dois pontos mais distantes da semente, medido em uma linha reta. O diâmetro médio das sementes foi obtido utilizando-se o *software ImageJ*. Foi analisada no *software* a fotografia de uma amostra de 100 sementes espalhadas sobre um fundo preto juntamente com uma régua. Através do *software* foi calculada a área de cada semente e através da Equação 4.1, foi possível encontrar o diâmetro médio das sementes.

$$D_{sementes} = \sqrt{\frac{A_{semente} \times 4}{\pi}} \quad (4.1)$$

Em que:  $D_{sementes}$  é o diâmetro das sementes e  $A_{semente}$  é a área da semente obtida pelo *software*. A análise foi realizada em triplicata.

O diâmetro médio também foi obtido através das medidas de comprimento, largura e espessura das sementes e utilizando-se a Equação 4.2. As dimensões da semente foram obtidas por meio de um paquímetro da marca *Worker*, cujas leituras variam de 0 a 150 mm, com uma precisão de 0,01 mm. As medições foram feitas em triplicata, utilizando amostras compostas por 30 sementes cada.

$$D_{sementes} = \sqrt[3]{C \times L \times E} \quad (4.2)$$

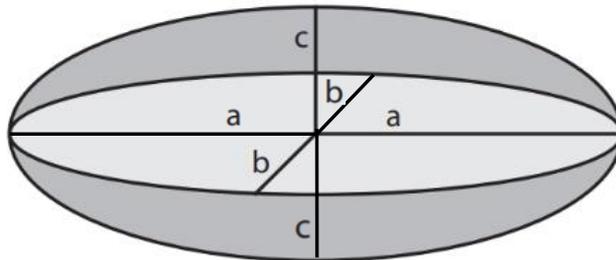
Onde  $C$ ,  $L$  e  $E$  são o comprimento, a largura e a espessura da semente, respectivamente.

#### 4.2.2 Esfericidade

De acordo com Mohsenin (1986), o fundamento geométrico do conceito de esfericidade é baseado na propriedade isoperimétrica de uma esfera, estabelecendo que, dentre objetos do mesmo volume, o mais esférico será aquele que tiver uma menor superfície. O autor afirma que, supondo que o volume do sólido em questão seja igual ao volume de um elipsóide triaxial com interceptos  $a, b$  e  $c$ , conforme mostrado na Figura 4.2, o grau de esfericidade pode ser expresso através da Equação 4.3.

$$\phi = \frac{(a.b.c)^{1/3}}{a} \quad (4.3)$$

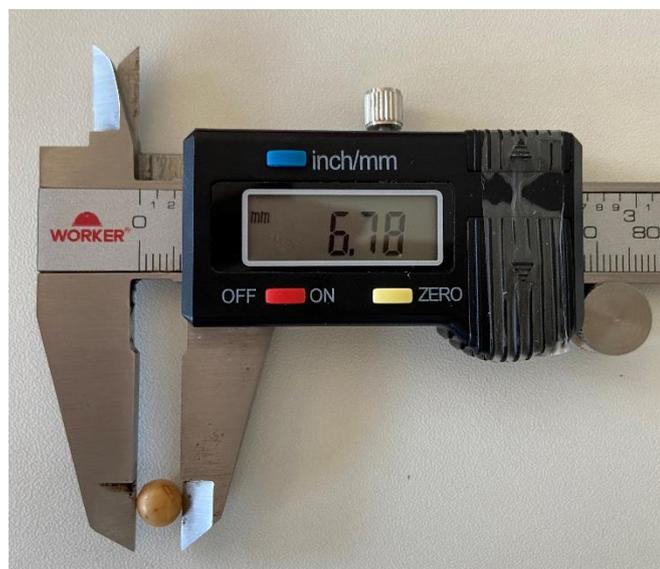
Figura 4.2 - Dimensões características de uma partícula.



Fonte: Adaptado de Cremasco (2018).

As medidas foram obtidas com o auxílio de um paquímetro da marca *Worker* que possui medições na faixa de 0 a 150 mm e uma precisão de 0,01 mm (Figura 4.3). As medições foram realizadas em triplicata, utilizando-se amostras contendo 30 sementes cada.

Figura 4.3 - Paquímetro utilizado para medição das dimensões da semente de sorgo.



Fonte: Da autora (2023).

A medida de esfericidade também foi realizada através do *software ImageJ*, utilizando uma amostra de 100 sementes. As medições foram realizadas em triplicata.

#### 4.2.3 Densidade aparente

A densidade aparente é uma medida da massa de um material por unidade de volume, onde são considerados os espaços vazios entre as partículas (HAYNES, 2014). Essa propriedade foi determinada por meio da picnometria líquida, utilizando-se um picnômetro de 25 mL, água deionizada e as sementes de sorgo. Para realizar as pesagens da massa do picnômetro, picnômetro com as sementes, picnômetro com as sementes e água, e picnômetro com água, foi utilizada uma balança analítica da marca *Shimadzu* que possui uma precisão de 0,0001g. O sistema utilizado para realizar a medição pode ser observado na Figura 4.4.

Figura 4.4 - Medição da densidade aparente.



Fonte: Da autora (2023).

Seguindo essa ordem de pesagem e utilizando-se as Equações 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7, foi encontrado o valor da densidade aparente das sementes de sorgo.

$$\rho_{\text{água}} = \frac{(m_{\text{pic+água}} - m_{\text{pic}})}{V_{\text{pic}}} \quad (4.4)$$

$$V_{\text{água}} = \frac{(m_{\text{pic+semente+água}} - m_{\text{pic+sem}})}{\rho_{\text{água}}} \quad (4.5)$$

$$V_{\text{semente}} = V_{\text{pic}} - V_{\text{água}} \quad (4.6)$$

$$\rho_{\text{semente}} = \frac{(m_{\text{pic+semente}} - m_{\text{pic}})}{V_{\text{semente}}} \quad (4.7)$$

Onde:  $\rho_{\text{água}}$  e  $\rho_{\text{semente}}$  são as densidades aparentes da água e semente de sorgo,  $V_{\text{pic}}$ ,  $V_{\text{água}}$  e  $V_{\text{semente}}$  são os volumes no picnômetro, água e semente de sorgo e  $m_{\text{pic}}$ ,  $m_{\text{pic+água}}$ ,  $m_{\text{pic+semente+água}}$  e  $m_{\text{pic+sem}}$  são, respectivamente, as massas do picnômetro, picnômetro com água, picnômetro com as sementes e água e picnômetro com as sementes.

#### 4.2.4 Peso de 1000 sementes

O peso de mil sementes (PMS) é definido como a massa de 1000 sementes da mesma espécie, variedade, maturidade e forma de colheita, obtidas a partir de um lote representativo de sementes, sendo uma medida amplamente utilizada na agricultura para a estimativa da produtividade de uma cultura (ARAÚJO, 2016). O parâmetro foi obtido seguindo as regras para análise de sementes (BRASIL, 2009) utilizando três amostras de 100 sementes cada além e uma balança da marca *Marte* com precisão de 0,001 g, a partir da Equação 4.8.

$$PMS = \frac{m_{sementes}}{n_{sementes}} \times 1000 \quad (4.8)$$

Onde:  $m_{sementes}$  e  $n_{sementes}$  equivalem à massa e ao número de sementes, respectivamente.

#### 4.2.5 Umidade

A umidade é a quantidade de água presente em um sólido, podendo ser expressa em base úmida (Equação 4.9), sendo esta a porcentagem de água presente na semente considerando sua massa total ou, na forma mais comum, em base seca (4.10), que é a porcentagem de água presente na semente, considerando apenas a massa da matéria seca.

$$X_{bu} = \frac{m_{\acute{a}gua}}{m_{\acute{a}gua} + m_{ss}} \times 100 \quad (4.9)$$

$$X_{bs} = \frac{m_{\acute{a}gua}}{m_{ss}} \times 100 \quad (4.10)$$

Em que:  $X_{bu}$  e  $X_{bs}$  são, respectivamente, a umidade em base úmida e em base seca,  $m_{\acute{a}gua}$  a massa de água e  $m_{ss}$  a massa de sólido seco.

O teor de água das sementes foi determinado utilizando-se o método convencional de estufa. As amostras foram pesadas em placas de Petri previamente secas e ajustadas, sendo manuseadas com papel para prevenir a transferência de umidade das mãos para as placas. A massa da amostra foi registrada antes e após o processo de secagem realizado em estufa a  $105 \pm 3$  °C ao longo de 24 horas.

### 4.3 Caracterização do meio poroso

#### 4.3.1 Densidade *bulk*

A densidade *bulk* é a relação entre a massa de partículas e o volume preenchido por elas em um determinado recipiente. Para a determinação da densidade *bulk*, foi utilizada uma balança analítica da marca *Shimadzu* que possui uma precisão de 0,0001g e uma proveta de vidro de 50 ml de volume com 1 ml de precisão. Primeiramente, foi realizada a tara da balança com a proveta vazia e depois, a proveta foi preenchida com as sementes de sorgo até atingir a marca de 50 ml. Logo em seguida, pesou-se a massa dessa amostra. Com os dados da massa das sementes e o volume preenchido por elas foi calculada a sua densidade através da Equação 4.11.

$$\rho_{bulk} = \frac{m_{sementes}}{V_{sementes}} \quad (4.11)$$

Onde:  $\rho_{bulk}$  é a densidade *bulk*,  $m_{sementes}$  é a massa das sementes e  $V_{sementes}$  é o volume ocupado pelas sementes.

#### 4.3.2 Densidade *bulk* compactada

Para medição da densidade *bulk* compactada foi utilizado o mesmo procedimento adotado para obtenção da densidade *bulk*, com a única diferença de que o volume ocupado

pelas sementes é o volume medido após sua compactação. O procedimento seguido foi o seguinte: após a adição das sementes em uma proveta até a marca de 50 ml, foi realizada uma compactação do material por meio de uma série de movimentações mecânicas onde a proveta era elevada até o topo e solta, caindo na base de madeira, utilizando-se o dispositivo mostrado na Figura 4.5. Em seguida, o volume compactado era medido e realizava-se o cálculo da densidade a partir da Equação 4.7. Os procedimentos para obtenção da densidade *bulk* e *bulk* compactada foram realizados em triplicata.

Figura 4.5 - Instrumento utilizado para medição da densidade *bulk* compactada.



Fonte: Da autora (2023).

### 4.3.3 Porosidade *bulk*

A porosidade do leito é a proporção de espaços vazios no leito em relação ao seu volume total (CARVALHO, 2019). A porosidade foi calculada a partir dos dados de densidade *bulk* compactada e a densidade aparente das sementes utilizando-se a Equação 4.12.

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{bc}}{\rho_{sementes}} \quad (4.12)$$

Em que  $\varepsilon$  é a porosidade do leito,  $\rho_{bc}$  é a densidade *bulk* compactada e  $\rho_{sementes}$  é a densidade aparente das sementes.

#### 4.3.4 Ângulo de repouso

Segundo Bortolotti *et al* (2013), o ângulo de repouso é definido como o ângulo de inclinação máximo formado por um material em relação ao plano horizontal sem que haja deslizamento e está relacionado à densidade de partículas, área superficial, forma e coeficiente de atrito do material, sendo este parâmetro importante no estudo do comportamento fluidodinâmico de materiais em leito de jorro.

O ângulo de repouso geralmente aumenta com o aumento do teor de umidade e com a diminuição da esfericidade das partículas, e tende a diminuir com o aumento da quantidade de material utilizado na medição, do diâmetro das partículas e da densidade (AL-HASHEMI e AL-AMOUDI, 2018).

Müller, Fimbinger e Brand (2021) classificaram o grau de escoabilidade das sementes a partir do ângulo de repouso, como mostrado na Tabela 4.1, onde é possível afirmar que o ângulo é inversamente proporcional à escoabilidade da semente.

Tabela 4.1 - Relação entre o ângulo de repouso e a escoabilidade do material granulado.

<b>Escoabilidade</b>	<b>Ângulo de repouso estático (°)</b>
Excelente fluidez	25 - 30
Boa fluidez	30 - 38
Fluidez regular	38 - 45
Coesivo	45 - 55
Muito coesivo	> 55

Fonte: Adaptado de Müller, Fimbinger e Brand (2021).

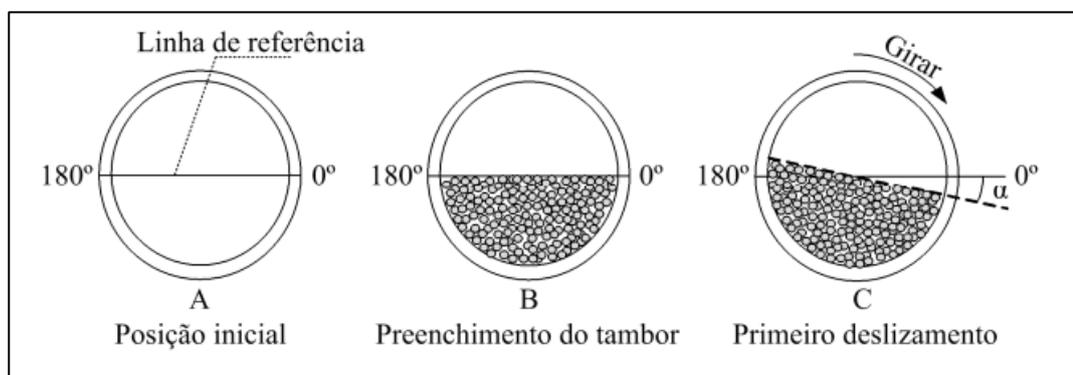
Na análise da inclinação de uma pilha de material particulado, são considerados dois tipos de ângulos: o ângulo de repouso estático, que corresponde ao ângulo formado entre a superfície livre do monte e o plano horizontal onde inicia o fluxo de grãos, e o ângulo de

repouso dinâmico, que é determinado quando o fluxo de grãos cessa, e a pilha retorna ao repouso (MÜLLER, FIMBINGER E BRAND, 2021).

#### 4.3.4.1 Ângulo de repouso dinâmico

Conforme descrito por Almeida e Santos (2018), o ângulo de repouso dinâmico é um parâmetro que mede a resistência de um material granular ao deslizamento, podendo ser determinado experimentalmente despejando-se uma quantidade conhecida de material granular em um tambor cilíndrico que é girado a uma velocidade constante. O material é então observado até que ele se assente em um ângulo constante, representado por  $\alpha$  na Figura 4.6.

Figura 4.6 - Diagrama esquemático do método de tambor rotativo para determinação do ângulo de repouso dinâmico.



Fonte: Pozitano e Rocha, 2011.

O experimento para obtenção do ângulo de repouso dinâmico foi conduzido utilizando-se um módulo de moinho de bolas da marca *Eco Educacional*, configurado para simular um tambor rotativo através de um aparato cilíndrico feito de tubo de PVC. O dispositivo era preenchido até a metade com as sementes de sorgo e uma tela de acetato transparente foi fixada no topo, com uma linha de referência marcada conforme a posição inicial e, em seguida, o aparato foi colocado sobre os rolos giratórios, conforme ilustrado na Figura 4.7. Após a montagem, o equipamento era ligado a uma frequência constante de 25 Hz,

realizando sempre quatro rotações completas. Posteriormente, o ângulo ( $\alpha$ ) formado pelas sementes em relação à linha de referência era medido.

Figura 4.7 - Aparato utilizado para medição do ângulo de repouso dinâmico.

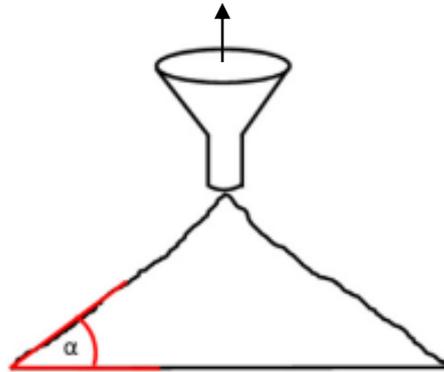


Fonte: Da autora (2023).

#### 4.3.4.2 Ângulo de repouso estático

Para determinação de ângulo de repouso estático foi utilizado o método proposto por Müller, Fimbinger e Brand (2021). O procedimento foi o seguinte: utilizou-se um funil com um orifício de descarga de 2,9 cm de diâmetro e um diâmetro superior de 11,6 cm. Foi despejado cerca de 500g sementes de sorgo dentro do funil e, após a estabilização, o equipamento foi levantado manualmente a uma velocidade muito baixa. As sementes de sorgo caíram naturalmente devido à gravidade e acumularam-se formando um ângulo. Uma vez que as sementes se estabilizaram, a vista frontal das sementes empilhadas foi fotografada e através do *software ImageJ* foi possível determinar o ângulo (Figura 4.8).

Figura 4.8 - Esquema do procedimento para medição do ângulo de repouso estático.



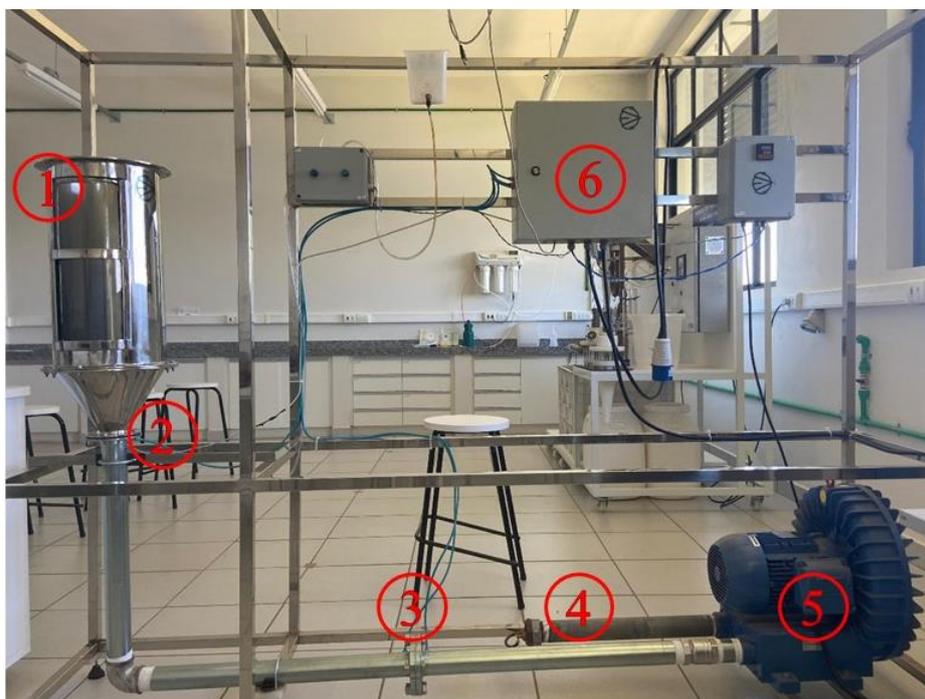
Fonte: Adaptado de Müller, Fimbinger e Brand (2021).

#### 4.4 Unidade experimental

Os ensaios foram conduzidos em uma unidade de leito de jorro, localizada no Laboratório de Processos de Separação Mecânica (LPSM) no prédio das Engenharias ABI da Universidade Federal de Lavras, cuja configuração é apresentada na Figura 4.9.

A estrutura compreende uma bancada de suporte em aço destinada ao sistema de jorro. O leito de jorro (1) é construído em aço inoxidável, e consiste em uma coluna cilíndrica com base cônica de  $60^\circ$ , com um diâmetro de 0,256 m e uma altura 0,508 m. Além disso, possui uma porção com geometria de tronco de cone, com diâmetro da base menor e altura de 0,050 m e 0,176 m, respectivamente. A coluna possui um visor transparente para a observação contínua do experimento ao longo do tempo. O ar é fornecido por um soprador (5) com potência de 7,5 CV. A unidade conta com uma placa de orifício (4) para a medição da velocidade do ar, sensores para aferição da pressão (3 e 2), uma válvula do tipo gaveta (4), inversor de frequência e *software* com interface para aquisição de dados (6).

Figura 4.9 - Unidade de leito de jorro.



Fonte: Da autora (2023).

#### 4.5 Caracterização fluidodinâmica do leito de jorro

Foi investigado o comportamento fluidodinâmico das sementes de sorgo no leito de jorro por meio da obtenção da curva característica de queda de pressão em função da velocidade do ar para três cargas diferentes de sementes: 1000g, 1400g e 1800g. A partir dessa curva, foi possível obter os dados de velocidade mínima do jorro, queda de pressão estável do jorro e queda de pressão máxima para cada carga de sementes.

Para obtenção da curva, inicialmente, 1000 g de sementes foram adicionadas ao leito de jorro e, em seguida, ar foi injetado através do orifício de entrada do leito, iniciando-se com a menor velocidade de ar, que foi medida com uma placa de orifício. A queda de pressão no leito foi registrada com a ajuda de um *software* de aquisição de dados.

A velocidade do ar na entrada do leito foi progressivamente aumentada até atingir aproximadamente 12 m/s. Logo após, o processo foi revertido, diminuindo-se gradualmente a velocidade de ar e registrando-se os valores da queda de pressão. Este processo se repetiu para

as cargas de sementes de 1400 g e 1800 g. Ao longo dos experimentos, as mudanças visuais no comportamento do leito de jorro foram anotadas.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Caracterização das sementes e do meio poroso

A Tabela 5.1 apresenta o diâmetro médio das sementes de sorgo obtido através do *software ImageJ* (Figura 5.1) e utilizando o paquímetro.

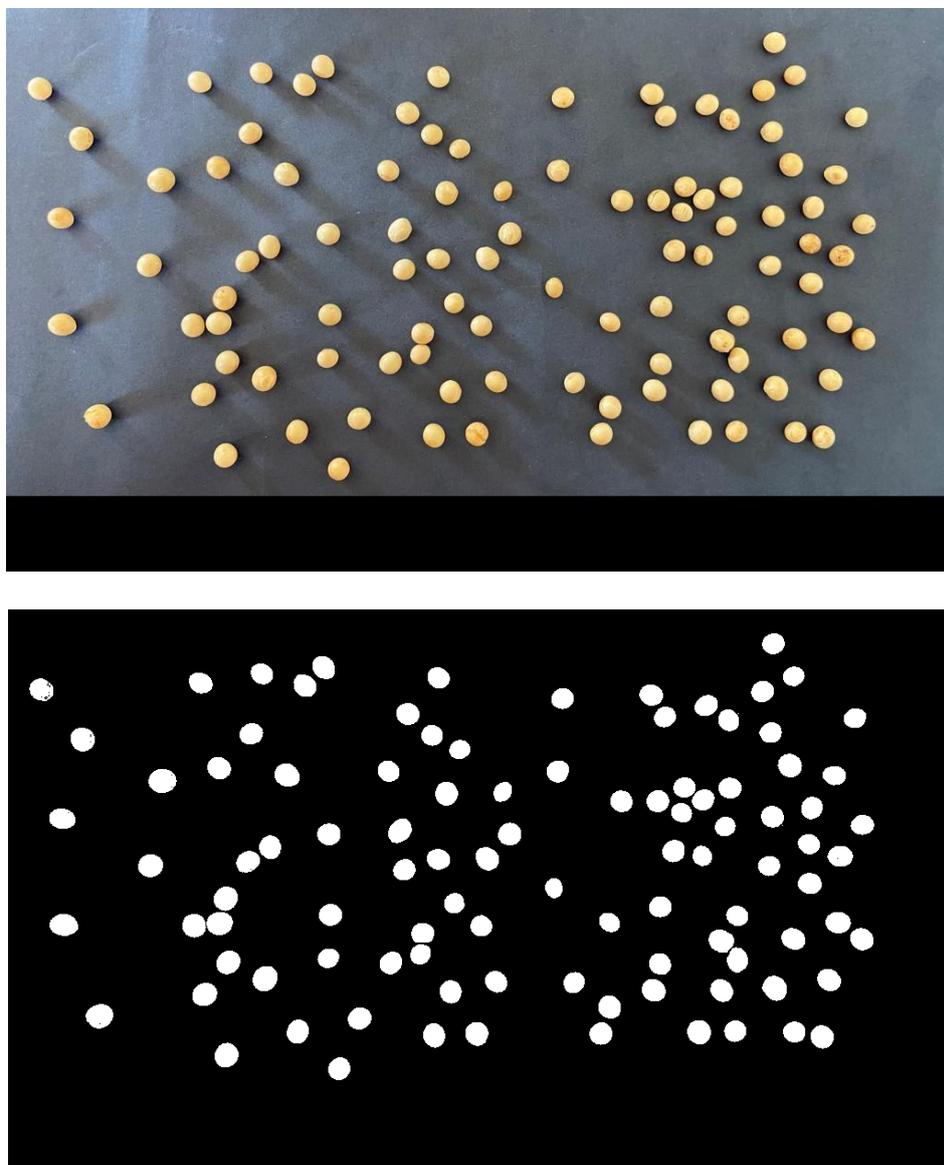
Tabela 5.1 - Diâmetro das sementes de sorgo.

<b>Diâmetro (cm)</b>	
<b>Paquímetro (cm)</b>	<b><i>ImageJ</i> (cm)</b>
0,66 ( $\pm 0,01$ )	0,708 ( $\pm 0,006$ )

Fonte: Da autora (2023).

Os diâmetros médios das sementes apresentaram resultados com uma diferença de aproximadamente 7% entre os dois métodos, porém, tem-se uma discrepância ao se comparar com o valor de 0,394 cm determinado por Mwithiga e Sifuna (2005) e de 0,11 ( $\pm 0,79$ ) cm medido por Geisen *et al.* (2021). Essa disparidade poderia ser atribuída a fatores como seleção de diferentes cultivares ou variedades de sementes, condições específicas de crescimento, métodos de cultivo variados, além das particularidades dos procedimentos experimentais adotados para a medição.

Figura 5.1 - Imagem utilizada para obtenção do diâmetro médio das sementes utilizando o *software ImageJ*.



Fonte: Da autora (2023).

As medidas de esfericidade obtidas utilizando-se o paquímetro e o *software ImageJ* são apresentadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Esfericidade das sementes de sorgo.

<b>Esfericidade</b>	
<b>Paquímetro</b> 0,95 ( $\pm 0,01$ )	<b>ImageJ</b> 0,899 ( $\pm 0,006$ )

Fonte: Da autora (2023).

Os valores de esfericidade obtidos pelos dois métodos apresentaram valores que exibiram uma diferença de aproximadamente 5% entre eles. O valor da esfericidade de uma partícula pode variar de 0 a 1, sendo valores mais próximos de 1 indicativos de uma forma mais esférica. Sendo assim, podemos inferir que a semente de sorgo possui um formato bastante próximo ao de uma esfera. Adinoyi *et al* (2017) mediram a esfericidade de sementes de sorgo que variou entre 0,89 e 0,96, enquanto Mi *et al* (2022) obtiveram um resultado de 0,827, ambos valores similares aos obtidos neste trabalho.

A Tabela 5.3 apresenta os valores das densidades aparente, *bulk* e *bulk* compactada do grão de sorgo.

Tabela 5.3 - Densidade aparente, *bulk* e *bulk* compactada das sementes de sorgo.

<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>		
<b>Aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b> 1,1688 ( $\pm 0,009$ )	<b>Bulk (g/cm<sup>3</sup>)</b> 0,599 ( $\pm 0,006$ )	<b>bulk compactada (g/cm<sup>3</sup>)</b> 0,6304 ( $\pm 0,002$ )

Fonte: Da autora (2023).

As sementes de sorgo exibiram uma densidade aparente superior à da água em temperatura ambiente, que é aproximadamente 1 g/cm<sup>3</sup>, indicando que as sementes têm a propensão de afundar quando submersas em água. Esteca *et al* (2017) mediram um valor de densidade aparente de 1,1197 g/cm<sup>3</sup> para sementes de sorgo, enquanto Mi *et al* (2022) encontraram o valor de 1,150 g/cm<sup>3</sup>, ambos valores próximos aos encontrados no presente trabalho.

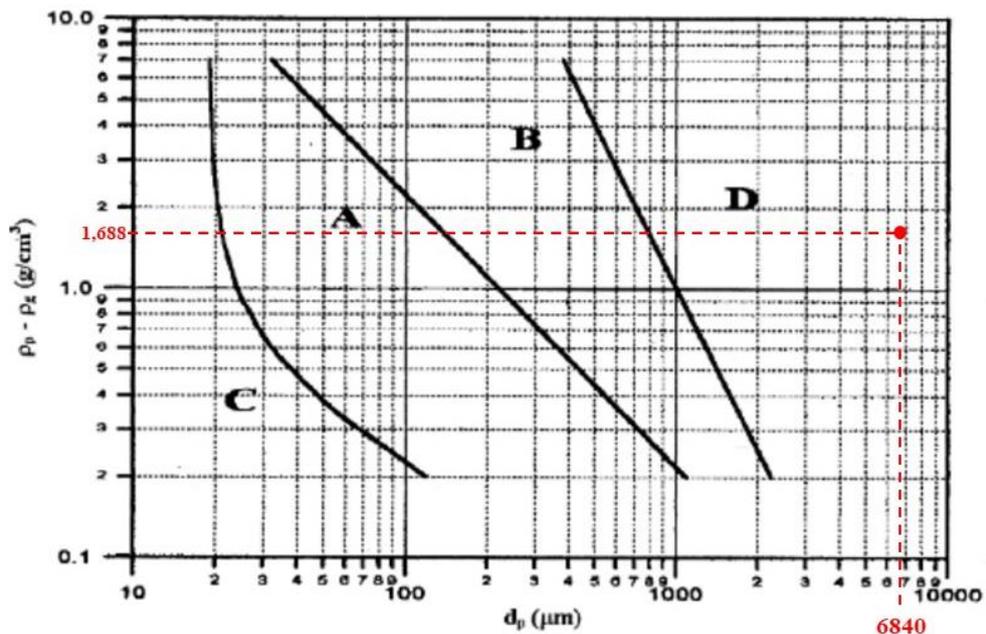
A partir dos valores obtidos de densidades *bulk* e *bulk* compactada, tem-se que com a compactação houve um ligeiro aumento no valor da densidade, mas essa influência não ocorreu de forma expressiva. O valor de densidade *bulk* encontrado neste trabalho é

comparativamente próximo aos valores de  $0,85 \text{ g/cm}^3$  medido por Esteca *et al.* (2017) e de  $0,7282 (\pm 0,0254) \text{ g/cm}^3$  obtido por Geisen *et al.* (2021) para sementes de sorgo.

Ao se comparar com outros tipos de sementes, os valores das densidades *bulk* e *bulk* compactada encontrados para o sorgo são superiores aos medidos para semente de mamão *in natura* sem exotesta, que possui uma densidade *bulk* de  $0,387 (\pm 0,017) \text{ g/cm}^3$  (SANTOS, 2022), o que indica que a semente de sorgo apresentaria uma resistência maior ao fluido em relação à semente de mamão, porém, apresentaria uma resistência menor quando comparado à semente de fedegoso, com uma densidade *bulk* de  $0,884 \text{ g/cm}^3$  (POZITANO e ROCHA, 2011).

Conforme indicado pelo diagrama de Geldart, as sementes de sorgo podem ser classificadas como pertencentes ao grupo D, que engloba partículas grandes e/ou muito densas que apresentam um comportamento de fluidização instável e desafiador possivelmente devido ao tamanho das partículas, como ilustrado na Figura 5.2.

Figura 5.2 - Classificação da semente de sorgo pelo diagrama de Geldart.



Fonte: Adaptado de Geldart (1986).

O valor da porosidade, determinado a partir das densidades *bulk* compactada e aparente, foi de 46,06% ( $\pm 0,005$ ), revelando que quase metade do volume do leito de sementes consiste em espaços vazios. Esse resultado sugere que a semente possui uma estrutura interna que permite certa permeabilidade ao fluido, mas não de forma tão eficiente quanto uma estrutura mais porosa, além de possuir uma quantidade de espaços vazios que não permite que o fluido escoe tão facilmente através do leito. Também há uma compressibilidade moderada do leito para as sementes de sorgo, ou seja, ao aplicar pressão ou força ao leito de sementes, ele terá uma capacidade moderada de se comprimir e se acomodar, sem apresentar uma resistência excessiva. Além disso, o resultado encontrado é próximo ao apresentado por Geisen *et al* (2021), que mediu uma porosidade de 48,1% para sementes de sorgo.

O valor do peso de 1000 sementes (PMS) encontrado foi de 179,657 ( $\pm 1,338$ ) g, indicando que as sementes são pequenas pois seu PMS é menor do que 200 g (BRASIL, 2009).

No estudo realizado por Da Silva (2020), foi obtido um PMS de 198,25 g para sementes de sorgo, valor que se aproxima do resultado encontrado neste trabalho. Porém, ao comparar as sementes de sorgo com as de mamão *in natura* sem exotesta que possuem um PMS de 43,988 ( $\pm 3,249$ ) g (SANTOS, 2022), torna-se evidente que o mamão apresenta um peso significativamente menor, o que contribui para uma maior facilidade de fluidização resultando em uma menor resistência ao ar quando comparado às sementes de sorgo.

Outro resultado encontrado foi o valor da umidade das sementes de sorgo, em base úmida e seca, conforme apresentado na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Umidade das sementes de sorgo.

<b>Umidade (%)</b>	
<b>Base úmida</b>	<b>Base seca</b>
7,7790 ( $\pm 0,1086$ )	8,4355 ( $\pm 0,1275$ )

Fonte: Da autora (2023).

Os resultados obtidos de umidade, tanto em base úmida quanto seca, mostram que o teor de água na semente de sorgo é baixo. Vale ressaltar que a durabilidade das sementes está diretamente relacionada ao seu conteúdo de água, pois um alto teor de umidade pode afetar negativamente na vitalidade e capacidade germinativa, além de favorecer o processo de

degradação, tais como proliferação de microrganismos, levando à rápida deterioração do material genético das sementes e, conseqüentemente, à redução de sua viabilidade e vigor ao longo do tempo (MARCOS FILHO, 2015).

Por fim, foram determinados os ângulos de repouso dinâmico e estático das sementes, cujos resultados são apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Ângulo de repouso para as sementes de sorgo.

<b>Ângulo de repouso (°)</b>	
<b>Dinâmico</b>	<b>Estático</b>
32,998 ( $\pm$ 2,723)	19,470 ( $\pm$ 0,941)

Fonte: Da autora (2023).

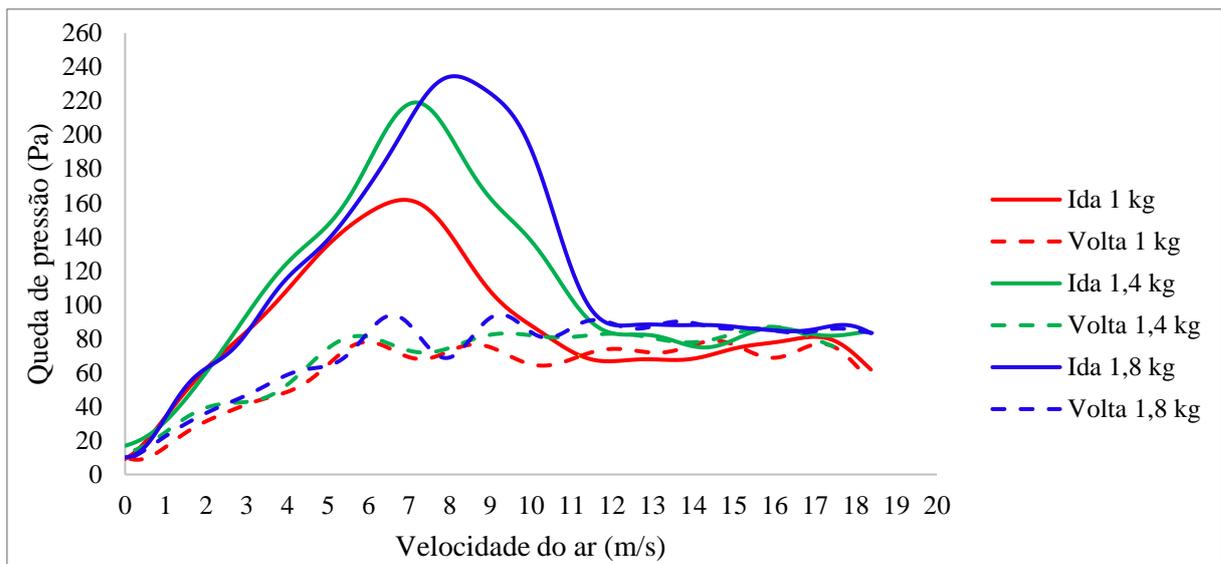
De acordo com a Tabela 5.7, nota-se que a diferença entre os ângulos de repouso estático dinâmico e estático é expressiva, indicando que o material possui comportamentos bem diferentes ao se comparar a inclinação necessária para iniciar o movimento e a inclinação necessária para manter o movimento constante. Conforme destacado por Massaro (2019), os ângulos de repouso dinâmicos tendem a ser superiores aos estáticos devido à diferença nas magnitudes das forças de atrito estático e dinâmico.

De acordo com o valor do ângulo de repouso estático encontrado e conforme a Tabela 4.1, é possível dizer que as sementes de sorgo possuem excelente fluidez, o que indica que elas conseguiriam se movimentar facilmente dentro do leito e que possuem forma e tamanho adequados, além de uma superfície que minimizaria o atrito entre as partículas. Geisen *et al* (2021) determinaram um ângulo de repouso estático de 20,3 ( $\pm$  3,26) °, resultado similar ao encontrado no presente trabalho, enquanto Mi *et al* (2022) mediram um ângulo de repouso estático de 33,82°, valor que difere do determinado neste trabalho, o que poderia ser explicado pela heterogeneidade dos grãos além da forma de condução dos experimentos.

## 5.2 Curva característica

A Figura 5.3 apresenta a curva característica do leito de jorro para três cargas diferentes de sementes de sorgo.

Figura 5.3 - Curva característica das sementes de sorgo em leito de jorro.



Fonte: Da autora (2023).

Os padrões exibidos na Figura 5.3 apresentam um perfil coerente com o padrão típico de um leito de jorro, para as três cargas de semente. Observa-se que, inicialmente, na porção crescente da curva de velocidade, ou curva de ida, a queda de pressão aumenta proporcionalmente ao acréscimo da velocidade do ar, alcançando o ponto de queda de pressão máxima, e indicando que o ar está percolando o leito das partículas. A partir desse ponto, a tendência se inverte, resultando em uma diminuição da queda de pressão à medida que a velocidade de ar aumenta, até atingir a estabilização do regime e alcançar um valor constante, que corresponde à velocidade mínima de jorro e queda de pressão de jorro estável e representando onde já foi iniciado o movimento das partículas.

Através da análise da curva fluidodinâmica, foi possível determinar os parâmetros mínimos necessários para a manutenção da condição operacional em que o jorro ainda existe. Esses parâmetros incluem a velocidade de jorro mínimo ( $V_{mj}$ ), a queda de pressão máxima

( $\Delta P_{\text{máx}}$ ) e a queda de pressão de jorro estável ( $\Delta P_s$ ), para as três cargas de semente, conforme apresentado na Tabela 5.6. A partir dos dados obtidos, é possível perceber um padrão em que tanto a queda de pressão máxima quanto a de jorro estável aumentaram com o aumento da carga de sementes. No entanto, é interessante notar que a velocidade mínima de jorro não demonstrou uma variação expressiva, permanecendo praticamente estável com relação às três cargas, sugerindo que o aumento na carga está mais diretamente associado à resistência ao fluxo do que à velocidade mínima de jorro.

Tabela 5.6 - Parâmetros fluidodinâmicos do leito de jorro para diferentes cargas de semente de sorgo.

<b>Carga (kg)</b>	<b><math>V_{mj}</math> (m/s)</b>	<b><math>\Delta P_{\text{máx}}</math> (Pa)</b>	<b><math>\Delta P_s</math> (Pa)</b>
1	11	162	70
1,4	11,5	219	83
1,8	12	234	90

Fonte: Da autora (2023).

Brito *et al.* (2017) observaram um comportamento fluidodinâmico semelhante em leito de jorro para cargas de sementes de sorgo de 2, 3 e 4 kg. Os autores observaram um aumento da queda de pressão máxima no leito conforme o aumento de carga de sementes e na curva de volta, encontraram valores de velocidade mínima de jorro similares, para diferentes cargas de sementes.

No experimento conduzido por Santana *et al.* (2017), empregando diversas cargas de sementes de linhaça (1,59; 2,44 e 2,95 kg), foi encontrado um padrão de comportamento semelhante ao observado no presente estudo. Da mesma forma, Almeida e Rocha (2002) analisaram o efeito de diferentes cargas sementes de brócolos (0,5 a 1,3 kg, em incrementos de 300 g), sobre os parâmetros fluidodinâmicos de um leito de jorro. Os resultados revelaram uma tendência em que a velocidade mínima de jorro apresentou um aumento mínimo e gradual. Essa similaridade nos resultados encontrados na literatura sugere uma consistência no comportamento observado dos parâmetros fluidodinâmicos do leito diante de variações de carga, fortalecendo a compreensão do impacto desse parâmetro de projeto nas condições operacionais do equipamento.

## 6 CONCLUSÕES

A caracterização das sementes de sorgo revelou que elas possuem um formato próximo ao de uma esfera, densidade aparente elevada, umidade baixa e, a partir do seu peso de 1000 sementes, são consideradas pequenas. De acordo com o diagrama de Geldart, as sementes foram classificadas como pertencentes ao grupo D, composto por partículas grandes e/ou muito densas e apresentando um comportamento favorável ao leito de jorro.

Quanto ao meio poroso, a caracterização revelou uma porosidade média e indicou que a compactação do meio não afeta significativamente o valor da densidade *bulk*. A partir do ângulo de repouso encontrado, pode-se classificar as sementes de sorgo como sólidos com boa fluidez, indicando que as sementes apresentam boa escoabilidade, mesmo sob condições de alta compactação, o que favorece a dinâmica no leito.

A análise fluidodinâmica do leito de jorro indicou um comportamento consistente com o padrão típico do equipamento o que permitiu uma fácil identificação dos regimes de escoamento. Foi possível determinar os principais parâmetros fluidodinâmicos, incluindo a queda de pressão máxima, queda de pressão de jorro estável e velocidade de jorro mínimo. Ademais, observou-se que a queda de pressão máxima aumenta conforme o aumento de carga das sementes, uma característica que está de acordo com o padrão esperado.

## REFERÊNCIAS

- ADINOYI, A., *et al.* Effect os grain moisture content on the physical properties of some selected sorghum varieties. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, Kano, Nigéria, v. 8, n. Issue 6, p. 1-10, jun. 2017.
- ALLEN, T. Particle Size Measurement. **Chapman e Hall**, Londres, 5ª ed. 2001.
- ALMEIDA, Celina de; ROCHA, Sandra Cristina dos Santos. Fluidodinâmica de sementes de brócolos em leito fluidizado e leito de jorro. **Scientia Agricola**, [S. l.], v. 59, n. 4, p. 645-652, out./dez. 2002.
- ALMEIDA, Natalia P.; SANTOS, Kássia G. Simulação DEM do ângulo de repouso dinâmico de partículas de polietileno. **CBCFD, II Congresso Brasileiro de Fluidodinâmica Computacional**, p. 1-4, 2018
- ANDRADE NETO, R. C., Araújo, J. M., & Almeida, U. O. Crescimento do sorgo forrageiro submetido à adubação verde. **South American Journal of Basic Education, Technical and Technological**, 2018. Recuperado de <https://periodicos.ufac.br/index.php/SAJEBTT/article/view/1477>
- ARAÚJO, E. L., *et al.* Obtenção de peso de mil sementes em genótipos de cacauero (*Theobroma cacao* L.). In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA (SICT) DO INCAPER, 1., 2016. **JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO E INOVAÇÃO DO IFES**, 11., 2016. Venda Nova do Imigrante, ES: IFES; Incaper, 2016.
- AWIKA, J. M., & ROONEY, L. W. Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health. **Phytochemistry**, 2004.
- BARCELLOS, Tatiza. Sorgo: Tudo o que você precisa saber sobre o plantio. **Aegro**, 21 maio 2021.
- BARCELOS, Marcelo Silveira. Análise do comportamento da fluidodinâmica do leito de jorro com misturas de tamanho de partículas. Orientador: Prof. Dr. José Teixeira Freire. 2006. Dissertação (Doutorado) - **Universidade Federal de São Carlos**, São Carlos, 2006.

BATISTA, Rafaella Torres. Obtenção de massa alimentícia integral isenta de glúten à base de farinhas extrudadas de grão-de-bico e milho (Pennisetum glaucum (L.) R. Br.). 2023. Dissertação (Mestrado) - **Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro**, [S. l.], 2023.

BORGES, Tatiana Pereira. Classificação e métodos de cozimento de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) em grãos. Orientador: Mônica Ribeiro Pirozi. 2013. Dissertação (Mestrado) - **Universidade Federal de Viçosa**, Viçosa, 2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de defesa agropecuária. **Regras para análise de sementes**, Brasília, p. 399, 2009. Disponível em: <[https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/arquivos-publicacoes-insumos/2946\\_regras\\_analise\\_\\_sementes.pdf](https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/arquivos-publicacoes-insumos/2946_regras_analise__sementes.pdf)>.

BRITO, R. C., *et al.* Effect of mechanical energy on the energy efficiency of spouted beds applied on drying of sorghum (*Sorghum bicolor* (L) moench). **Chemical Engineering and Processing**, 117, 95–105, 2017.

BRITO, Ronaldo Correia de., *et al.* Estudo da secagem de sementes de sorgo em leito de jorro. In: **ANAIS DO CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA**, 2016. Anais eletrônicos. Campinas, Galoá, 2016.

BUSO, W.H.D., *et al.* Utilização do sorgo forrageiro na alimentação animal. **PUBVET**, Londrina, V. 5, N. 23, Ed. 170, Art. 1145, 2011.

CIAMPITTI, I.A.; CARCEDO, A.P. Grain sorghum yield potential: Understanding the main yield components. Kansas State University: **K.STATE Research and Extension**, 15 set. 2022. Disponível em: [https://webapp.agron.ksu.edu/agr\\_social/m\\_eu\\_article.throck?article\\_id=3232](https://webapp.agron.ksu.edu/agr_social/m_eu_article.throck?article_id=3232).

COCCO, Ray; CHEW, Jia Wei. 50 years of Geldart classification, **Powder Technology**, v. 428, 2023.

CREMASCO, Marco A. Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos. **Editora Blucher**, 3ª edição. 2018.

CUNHA, F. G. E. Estudo da extração mecânica de bixina das sementes de urucum em leito de jorro. 2008. 92 p. Tese (Mestrado em Engenharia Química) - **Universidade Federal de Uberlândia**, Uberlândia, 2008.

ESTECA, G.F.; BRITO, R.C.; BÉTTEGA, R. Caracterização física e cinética de secagem de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench). **COBEQ IC**, [S. l.], p. 1-6, 16 jul. 2017.

FERNANDES, Conceição Flores. Análise da eficiência energética da secagem de pastas em leite de jorro. 2005. Dissertação (Mestrado) - **Universidade Federal de São Carlos**, [S. l.], 2005.

FERNANDES, Gislaine., *et al.* Caracterização dos açúcares em diferentes partes dos colmos do sorgo sacarino. In: **CONGRESSO INTERNACIONAL DE BIOENERGIA**, 9., 2014. São Paulo, [S. l.], p. 1-6, 1 out. 2014.

FERNANDES, Patrick Bezerra., *et al.* Aspectos relacionados ao potencial forrageiro do sorgo. **PubVet**, [S. l.], v. 14, n. 7, p. 1-7, jul. 2020.

FREIRE, J.T.; ALBINI, G. Tópicos especiais em sistemas particulados. 1. ed. São Carlos: **DEQ/UFSCar**, 2019. v. 5. ISBN 978-85-913116-3-7.

GARCIA, Simone. Por dentro do cocho: Gérmen de milho. **Agrocere**s, 16 abr. 2020. Disponível em: <https://agrocere multimix.com.br/blog/por-dentro-do-cocho-germen-de-milho/>.

GEISEN, S., *et al.* Physical and Structural Characterization of Underutilized Climate-Resilient Seed Grains: Millets, Sorghum, and Amaranth. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, [S. l.], v. 5, p. 1-13, 10 jun. 2021.

GELDART, D. Gas fluidization technology. New York: **John Wiley & Sons**, 1986.

GELDART, D. Types of gas fluidization. **Powder Technology**, 1973.

GONÇALVES, Alex Augusto. Tecnologia do Sorgo. **ITA 02213**. 4 fev. 2002. Imagem.

HAYNES, W.M. Handbook of Chemistry and Physics. 95th. ed. Boca Raton, Florida: **CRC Press**, 2014.

INACIO, Bruno da Silva. Produção de sorgo ganha destaque no Brasil. **Sensix**, 14 jun. 2023. Disponível em: <https://blog.sensix.ag/producao-de-sorgo-ganha-destaque-no-brasil/>.

KACHINSKI, K.D.; STAHLSCHMIDT, R.M. Seleção e dimensionamento de um sistema de leite de jorro com fenda para aplicação de secagem. Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Regina Parise. 2018. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel) - **Universidade Tecnológica do Paraná**, Ponta Grossa, 2018.

LONDE, T.M.; DE LIMA, E.A.P.; FINZER, J.R.D. Secagem de defensivo agrícola do tipo grânulo dispersível em leito fluidizado de escala piloto. **Brazilian Journal of Development, Curitiba**, v. 7, n. 4, p. 33352-33375, 1 abr. 2021.

LOURENÇO, G. A. Transporte pneumático horizontal de partículas de baixa densidade: proposta de um sistema de alimentação e estudos de fluidodinâmica. 155 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - **Universidade Federal de Uberlândia**, Uberlândia, 2019.

MAGALHÃES, P.C.; DURÃES, F.O.M; RODRIGUES, J.A.S. Fisiologia da Planta de Sorgo. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**, Sete Lagoas, n. 86, p. 1-4, 1 nov. 2003.

MARCOS FILHO, Júlio. Fisiologia de sementes de plantas cultivadas. Londrina. **Abrates**, 2015.

MASSARO, L.S., *et al.* Influência da umidade nos ângulos de repouso estático e dinâmico de diferentes tipos de açúcares. **SimAPI**, Universidade Federal de São Carlos, p. 1-7, 16 maio 2019.

MATHUR, K. B., & EPSTEIN, N. Dynamics of Spouted Beds. **Department of Chemical Engineering University of British Columbia**, Vancouver. Canada, 1974.

MATHUR, K. B., & GISHLER, P. E. A study of the application of the spouted bed technique to wheat drying. **Journal of Applied Chemistry**, 1955.

MATHUR, K. B., & GISHLER, P. E. A technique for contacting gases with coarse solid particles. **Aiche Journal**, 1955.

MCCABE, Warren L. Unit operations of chemical engineering. 7th ed. Boston, MA: **McGraw-Hill**, 2005.

MI, Goupeng., *et al.* Measurement of Physical Properties of Sorghum Seeds and Calibration of Discrete Element Modeling Parameters. **Agriculture**, Basel, Suíça, p. 1-21, 11 maio 2022.

MOCELLIN, Kérli Daiana; MARQUEZI, Milene. Sorgo Granífero (“Sorghum bicolor l. moench”): uma revisão sobre as propriedades funcionais e utilização do grão na alimentação humana. 2021. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel) - **Instituto Federal de Santa Catarina**, [S. l.], 2021.

MOSHENIN, N. N. Physical properties of plant and animal materials, New York: **Gordon and Breach Publishers**, 1986, p. 841.

MÜLLER, Dominik; FIMBINGER, Eric; BRAND, Clemens. Algorithm for the determination of the angle of repose in bulk material analysis, **Powder Technology**, v. 383, p. 598-605, 2021.

MWITHIGA, G., e SIFUNA, M. M. Effect of moisture content on the physical properties of three varieties of sorghum seeds. **Journal of Food Engineering**, 75(4), 480–486, 2006.

NASCIMENTO, Lidiane Diniz. Caracterização, análise fluidodinâmica e secagem de sementes de painço em leito de jorro. 2014. Dissertação (Mestrado) - **Universidade Federal do Pará**, [S. l.], 2014.

Olazar, M., *et al.* Spouted Bed Reactors. **Chemical Engineering & Technology**, 26(8), 845–852, 2003.

OLIVEIRA, Arthur de Souza., *et al.* Desenvolvimento e construção de leito de jorro para recobrimento de partículas de ureia. **Revista brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação**, [S. l.], p. 1-14, 29 out. 2018.

POZITANO, Mariana; ROCHA, Sandra Cristina dos Santos. Caracterização física e germinação de sementes de *Senna macranthera*. **Revista Brasileira de Sementes**, [S. l.], p. 1-8, 21 nov. 2023.

QUEIROZ, V. A. V., *et al.* Nutritional composition of sorghum [*Sorghum Bicolor* (L.) Moench] genotypes cultivated without and with water stress. **Journal of Cereal Science**, 2015.

RIBAS, Paulo Motta., *et al.* Sorgo: Introdução e Importância Econômica. **Embrapa**, [S. l.], v. 26, n. 1, p. 1-14, dez. 2003.

ROSS, W. M., & KOFOID, K. D. Determining 1,000-Seed Weight in Grain Sorghum. **Crop Science**, 18(3), 507. 2018.

Santana, E. B., *et al.* Fluid-dynamic behavior of flaxseed fluidized and spouted bed. **Ciência Rural**, 47(10), 2017.

SANTOS, Amanda Aparecida de Lima. Estudo experimental e de simulação computacional da secagem de sementes de mamão em leito de jorro. 2022. Dissertação (Mestrado) - **Universidade Federal de Lavras**, [S. l.], 2022.

SILVA, Alexandre Ferreira., *et al.* Sorgo granífero: Estenda sua Safrinha com Segurança. **Embrapa**. Documentos 176, [S. l.], p. 1-67, 1 jul. 2015.

SILVA, C.D. Caracterização morfobiométrica de sementes de sorgo. **ENPOS**, Pelotas, p. 1-4, 23 nov. 2020.

SILVA, Davi Francisco da., *et al.* Características morfológicas, melhoramento genético e densidade de plantio das culturas do sorgo e do milho: uma revisão. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 10, n. 3, p. 1-9, 8 mar. 2021.

SILVA, Thiago Dias., *et al.* Influência do processamento de grãos sobre o desempenho de ruminantes e a população microbiana do rúmen. **Caderno de Ciências Agrárias**, [S. l.], v. 10, n. 2, p. 53-60, 4 ago. 2018.

SILVA, V.A. Monitoramento de regimes de contato gás-sólido em leito de jorro conecilíndrico por medidas de queda de pressão em tempo real. Orientador: Prof. Dr. Sandra Cristina dos Santos Rocha. 1998. Dissertação (Mestrado) - **Universidade Estadual de Campinas**, Campinas, 1998.

TABOSA, J. N., *et al.* Importância do melhoramento genético de diferentes tipos de sorgo para as mesorregiões do Agreste, Sertão e afins do Semiárido Brasileiro. **Embrapa**. 2019.

TADINI, Carmen C., *et al.* Operações Unitárias na Indústria de Alimentos. **Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda**. Grupo GEN, 2015. E-book. ISBN 978-85-216-3034-0.

TADINI, Carmen C., *et al.* Operações Unitárias na Indústria de Alimentos - Vol. 2. **Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda**. Grupo GEN, 2016. E-book. ISBN 9788521632689.

USDA - United States Department of Agriculture: Foreign Agricultural Service. Sorghum 2022. 11 2023. Disponível em: [https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/cropview/commodityView.aspx?cropid=0459200&sel\\_year=2022&rankby=Production](https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/cropview/commodityView.aspx?cropid=0459200&sel_year=2022&rankby=Production).

VALLIN, Giovanna. Conheça o sorgo: Um dos cereais mais cultivados do mundo. **Sygenta**, 13 abr. 2022.

VIEIRA NETO, José Luiz. Estudo experimental e de simulação da fluidodinâmica de um leito de jorro com tubo draft. Orientador: Marcos Antônio de Souza Barrozo. 2007. Dissertação (Mestrado) - **Universidade Federal de Uberlândia**, Uberlândia, 2007.