

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Caracterização e Secagem do Bagaço de Malte

Alice Leonel

Itajubá, março de 2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Caracterização e Secagem do Bagaço de Malte

Alice Leonel

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia de Energia.

Área de Concentração: Energia, Sociedade e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Hugo Perazzini

Março de 2025
Itajubá

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus pela vida, pela saúde, pelos momentos especiais, pelas alegrias e todas as coisas maravilhosas.

Aos meus pais, Ricardo e Rosangela, pelo amor, cuidado, educação, e por terem me ensinado valores importantes para a vida. Pai, obrigada por ter instalado o meu chuveiro e mãe obrigada por ter me ensinado a fazer angu.

Ao meu companheiro de vida, Carlos, por toda dedicação, paciência, ajuda e amor nos momentos mais difíceis. Pelas incontáveis idas no laboratório para me deixar ou me buscar. Pelas refeições maravilhosas que você preparou para eu conseguir terminar algo que eu precisava fazer.

Ao meu irmão, Felipe, pela parceria, amizade, companheirismo, risadas e brincadeiras de criança. À Mari, pelos momentos gostosos, jogos e séries.

À Lu, pelas conversas, gargalhadas, massagens relaxantes e momentos gostosos.

À minha avó, Benedita, pelo cuidado, amor, preocupação e companheirismo nos últimos anos.

Aos meus sogros por todo o carinho e pelas comidas muito gostosas.

À minha família materna pelos encontros divertidos e especiais.

Ao meu orientador, Hugo Perazzini, pela orientação, ensinamentos e contribuições para que o trabalho ampliasse os conhecimentos sobre o tema.

Aos membros do laboratório, Raphael e Nádia, por terem me ajudado diversas vezes durante o mestrado.

À Professora Rita de Cássia, por ter cedido o Laboratório de Microbiologia Aplicada e Bioprocessos (LMBio) da EEL/USP para a realização das análises de caracterização química. E por ter oferecido um aluno de iniciação científica, o João Vitor, para nos ajudar na execução dos procedimentos. Inclusive, agradeço muito ao João pela ajuda em Lorena e por ter sido muito prestativo conosco.

À Professora Renata de Aquino, pela ajuda na determinação da massa específica real a partir do contato com o Laboratório de Processos de Separação da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQUI-UFU).

À FAPEMIG, que ao conceder a bolsa, permitiu que eu pudesse ter uma experiência acadêmica mais gratificante.

A todas as pessoas, aqui não citadas, mas que de alguma forma impactaram algum momento da minha vida dos últimos anos.

“Feliz aquele que transfere o que sabe e aprende o que ensina”.

Cora Coralina

RESUMO

O bagaço de malte, gerado como um subproduto da indústria cervejeira, representa uma matéria-prima potencial para a geração de energia renovável. Este estudo tem como objetivo investigar as características físicas, químicas e de escoabilidade da biomassa para processamento industrial, além da secagem do resíduo. A amostra de bagaço foi obtida de uma cervejaria local e seca até 8-10% de umidade para armazenamento adequado. A análise física mostrou que o diâmetro médio de Sauter foi de 1,92 mm e o modelo RRB se ajustou melhor aos dados de distribuição de tamanho. A densidade real foi de $1327,8 \pm 3,7 \text{ kg m}^{-3}$, e foi observado que o diâmetro da partícula não influenciou significativamente sua densidade. Foram identificados 4 formatos na amostra de bagaço, denominados BSG1, BSG2, BSG3 e BSG4, com o tipo BSG4 representando 54% da massa total. Além disso, o estudo de forma e morfologia mostrou a irregularidade das partículas e heterogeneidade da amostra de biomassa. Por meio de ensaios de escoabilidade, foram determinados *HR*, *CCI* e AOR, cujos valores foram $1,15 \pm 0,01\%$, $13,00 \pm 0,58\%$ e $42,9 \pm 0,4^\circ$, respectivamente. A caracterização da escoabilidade indicou que o material tem excelente fluidez, indicando pouca coesão entre as partículas. Além disso, os coeficientes de arraste e permeabilidade foram próximos aos valores obtidos na literatura para outras biomassas. A análise composicional do bagaço de malte mostrou que a biomassa apresenta $15,99 \pm 2,33\%$ de extrativos, $22,61 \pm 1,14\%$ de lignina, $18,63 \pm 0,59\%$ de celulose, $18,90 \pm 2,35\%$ de hemicelulose, e $4,03 \pm 0,03\%$ de cinzas totais. A secagem foi realizada em um secador do tipo túnel para temperaturas do ar de secagem iguais a 40 °C, 45 °C e 50 °C, e os resultados mostraram que a difusividade da umidade aumentava com a elevação da temperatura, e que a termodifusão foi pouco significativa. Este estudo destaca o potencial do bagaço de malte para aplicações industriais, devido à sua significativa disponibilidade, baixo custo e composição química.

Palavras-chave: Resíduos agrícolas; bioenergia; pré-tratamento; biomateriais; escoabilidade; composição química.

ABSTRACT

Brewer's spent grain, generated as a byproduct of the brewing industry, represents a potential raw material for renewable energy generation. This study aims to investigate the physical, chemical and flowability characteristics of biomass for industrial processing, as well as the drying of the residue. The bagasse sample was obtained from a local brewery and dried to 8-10% moisture content for proper storage. Physical analysis showed that the mean Sauter diameter was 1,92 mm and the RRB model best fitted the size distribution data. The true density was $1327,8 \pm 3,7 \text{ kg m}^{-3}$, and it was observed that the particle diameter did not significantly influence its density. Four shapes were identified in the bagasse sample, named BSG1, BSG2, BSG3 and BSG4, with the BSG4 type representing 54% of the total mass. Furthermore, the study of shape and morphology showed the irregularity and heterogeneity of the biomass sample. Through flowability tests, *HR*, *CCI* and AOR were determined, whose values were $1,15 \pm 0,01\%$, $13,00 \pm 0,58\%$ and $42,9 \pm 0,4^\circ$, respectively. The characterization of flowability indicated that the material has excellent fluidity, indicating little cohesion between particles. Furthermore, the drag and permeability coefficients were close to the values obtained in the literature for other biomasses. The compositional analysis of the brewer's spent grain showed that the biomass has $15,99 \pm 2,33\%$ extractives, $22,61 \pm 1,14\%$ lignin, $18,63 \pm 0,59\%$ cellulose, $18,90 \pm 2,35\%$ hemicellulose, and $4,03 \pm 0,03\%$ total ash. Drying was carried out in a tunnel dryer at drying air temperatures of 40 °C, 45 °C and 50 °C, and the results showed that moisture diffusivity increased with increasing temperature, and that thermodiffusion was negligible. This study highlights the potential of brewer's spent grain for industrial applications due to its significant availability, low cost and chemical composition.

Keywords: Agricultural residues; bioenergy; pretreatment; biomaterials; flowability; chemical composition.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Pesquisa exploratória sobre secagem do bagaço de malte: a) Número de trabalhos publicados ao longo dos anos; b) Produção de trabalhos por país.....	4
Figura 2 – Etapas do Processamento dos Grãos até a Obtenção do Bagaço de Malte.	5
Figura 3 – Representação esquemática do grão de malte.	7
Figura 4 – Rotas de Conversão de Biomassa.	9
Figura 5 – Bagaço de Malte Após as Etapas de Secagem, Preparado para ser Utilizado nos Estudos de Caracterização.	14
Figura 6 – Equipamentos Utilizados para a Moagem e Peneiramento das Amostras: a) Moinho de Facas; b) Peneira de 20 <i>mesh</i>	15
Figura 7 – Aparato Utilizado na Remoção dos Extrativos da Amostra.....	16
Figura 8 – Aparato Experimental Utilizado na Filtração.	18
Figura 9 – Formatos Característicos na Amostra de Bagaço de Malte (BSG1, BSG2, BSG3, BSG4).	30
Figura 10 – Fluxograma do Procedimento utilizado para o Processamento das Imagens pelo <i>Software ImageJ</i>	31
Figura 11 – Aparato Utilizado para a Determinação da Permeabilidade da Biomassa..	33
Figura 12 – Aparato usado para medir o ângulo de repouso: a) Antes do início do experimento; b) Após a realização do experimento.	39
Figura 13 – Unidade Experimental Utilizada para a Secagem da Biomassa.....	40
Figura 14 – Célula com Amostra de Bagaço Úmido.....	41
Figura 15 – a) Gráfico da Fração Mássica em Função do Diâmetro; b) Gráfico da Fração Acumulada em Função do Diâmetro.	44
Figura 16 – Ajuste dos Modelos Matemáticos da Distribuição Acumulativa.	45
Figura 17 – Parâmetros <i>Area</i> , <i>Perimeter</i> , <i>Major</i> , <i>Minor</i> , <i>Feret</i> e <i>AR</i> (4 Formatos e Amostra Total).....	51
Figura 18 – Comparação das Partículas BSG1, BSG2, BSG3, BSG4 em relação à Esfericidade (Circunferência Circunscrita).	53

Figura 19 – Resultados do Coeficiente de Permeabilidade e do Parâmetro Adimensional: a) d_i^* x Tipo de Relação x K ; b) d_i^* x Tipo de Relação x c	55
Figura 20 – Dados de Queda de Pressão em função da Velocidade: a) Para $d_i^* = 3,68$ mm; b) Para $d_i^* = 4,38$ mm; c) Para $d_i^* = 5,18$ mm.....	57
Figura 21 – Relação entre o d_i^* , Rep e Cd experimental.....	60
Figura 22 – Imagens obtidas pelo MEV para formatos característicos na amostra: BSG1, BSG2, BSG3 e BSG4 com ampliações de 200×, 500× e 1000×.....	61
Figura 23 – Umidade em Base Seca em Função do Tempo.....	66
Figura 24 – Temperatura em Função do Tempo.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Modelos Matemáticos da Distribuição Acumulativa da Fração Mássica das Partículas.	24
Tabela 2 – Parâmetros/comandos e condições utilizados para o processamento das imagens pelo <i>software</i> ImageJ.....	32
Tabela 3 – Correlações Empíricas para o Cálculo da Permeabilidade e do Parâmetro Adimensional.....	35
Tabela 4 – Correlações Empíricas para o Cálculo do Coeficiente de Arraste.....	36
Tabela 5 – Resultado da Análise Composicional do Bagaço de Malte.	42
Tabela 6 - Massa Específica <i>Bulk</i> Compactada em Função do Diâmetro da Partícula. .	47
Tabela 7 – Massa Específica Real para a Amostra Total.	47
Tabela 8 – Massa Específica Aparente em Função do Diâmetro da Partícula (Solvente Hexano)	47
Tabela 9 – Massa Específica Aparente em Função do Diâmetro da Partícula (Solvente Querosene).....	48
Tabela 10 – Resultado da Porosidade da Partícula.....	48
Tabela 11 - Representatividade dos 4 Formatos Característicos na Amostra.	49
Tabela 12 – Resultado da Análise de Imagens através do <i>Software</i> ImageJ - <i>Area</i> , <i>Perimeter</i> , <i>Major</i> , <i>Minor</i> , <i>Angle</i> , <i>Circularity</i> e <i>Feret</i> (4 Formatos e Amostra Total)....	50
Tabela 13 - Resultado da Análise de Imagens através do <i>Software</i> ImageJ - <i>FeretX</i> , <i>FeretY</i> , <i>FeretAngle</i> , <i>MinFeret</i> , <i>AR</i> , <i>Round</i> e <i>Solidity</i> (4 Formatos e Amostra Total). ...	50
Tabela 14 – Esfericidade da Amostra Total e dos 4 Formatos conforme Equação (33). 52	
Tabela 15 – Esfericidade da Amostra Total e dos 4 Formatos conforme Equação (34). 53	
Tabela 16 – Resultados do Coeficiente de Permeabilidade e Parâmetro Adimensional. 55	
Tabela 17 - Resultados do Coeficiente de Arraste.	59
Tabela 18 – Valores obtidos para a Razão de Hausner.	62
Tabela 19 – Valores obtidos para o Índice de Compressibilidade de Carr.....	63
Tabela 20 - Resultado da Porosidade do Leito.	64

Tabela 21 – Resultado do Ângulo de Repouso.....	65
Tabela 22 – Resultado da Análise de Imagens através do Software ImageJ – <i>Area</i> , <i>Perimeter</i> , <i>Major</i> , <i>Minor</i> , <i>Angle</i> , <i>Circularity</i> e <i>Feret</i> (100 Partículas).	70
Tabela 23 – Resultado da Análise de Imagens através do Software ImageJ – <i>Feret X</i> , <i>Feret Y</i> , <i>FeretAngle</i> , <i>MinFeret</i> , <i>AR</i> , <i>Round</i> , <i>Solidity</i> (100 Partículas)	72

SUMÁRIO

1.	Introdução.....	1
2.	Revisão Bibliográfica.....	4
2.1	Origem Industrial do Bagaço de Malte.....	4
2.2	Bagaço de Malte	6
2.3	O Bagaço de Malte como Fonte Energética	8
2.4	Caracterização da Biomassa	11
2.5	Secagem do Bagaço de Malte.....	12
3.	Materiais e Métodos	13
3.1	Natureza, Seleção e Preparo das Amostras	13
3.2	Caracterização Química.....	14
3.2.1	Preparo das Amostras	15
3.2.2	Determinação dos Extrativos na Amostra	15
3.2.3	Determinação de Celulose, Hemicelulose e Lignina na Amostra	17
3.2.4	Determinação do Teor de Cinzas Totais na Amostra	22
3.3	Caracterização Física.....	23
3.3.1	Tamanho e Distribuição Granulométrica	23
3.3.2	Massa Específica	24
3.3.3	Porosidade da Partícula	29
3.3.4	Formatos Característicos na Amostra.....	29
3.3.5	Dimensões e Características das Partículas usando o Software ImageJ.....	30
3.3.6	Esfericidade	32
3.3.7	Permeabilidade	33
3.3.8	Coeficiente de Arraste	35
3.3.9	Morfologia da Partícula	36
3.4	Caracterização da Escoabilidade	37
3.4.1	Razão de Hausner (<i>HR</i>).....	37
3.4.2	Índice de Compressibilidade de Carr (<i>CCI</i>)	37
3.4.3	Porosidade do Leito	38
3.4.4	Ângulo de Repouso (<i>AOR</i>)	38
3.5	Secagem do Bagaço de Malte.....	39
4.	Resultados e Discussões.....	42

4.1	Caracterização Química.....	42
4.2	Caracterização Física.....	43
4.2.1	Tamanho e Distribuição Granulométrica	43
4.2.2	Massa Específica	45
4.2.3	Porosidade da Partícula	48
4.2.4	Formatos Característicos na Amostra.....	48
4.2.5	Análise Digital de Imagens	49
4.2.6	Esfericidade	52
4.2.7	Permeabilidade	54
4.2.8	Coeficiente de Arraste	58
4.2.9	Morfologia da Partícula	60
4.3	Caracterização da Escoabilidade	61
4.3.1	Razão de Hausner (<i>HR</i>).....	61
4.3.2	Índice de Compressibilidade de Carr (<i>CCI</i>)	62
4.3.3	Porosidade do Leito	63
4.3.4	Ângulo de Repouso (AOR)	64
4.4	Secagem do Bagaço de Malte.....	65
5.	Conclusões	68
	APÊNDICE A	70
	Referências	75

1. Introdução

O Brasil ocupa a posição de 3º maior consumidor mundial de cerveja, ficando à frente de países como a Alemanha e a Rússia, segundo pesquisa do Credit Suisse, Euromonitor e Statista, divulgada pela Sindicerv (2021). O país é também o 3º maior produtor de cerveja no mundo, segundo pesquisa publicada pela Barth-Haas Group em 2020 (GOVERNO DO BRASIL, 2022). Com isso, a elevada produção da bebida está associada ao grande consumo interno, às condições climáticas favoráveis, ao cultivo da cevada, às pesquisas e investimentos em tecnologias no campo e à mão-de-obra qualificada.

O país conta com uma área plantada de cevada, matéria-prima para a produção de cerveja, em torno de 104 mil hectares, segundo dados da SIDRA (2022). A produção está concentrada principalmente no Sul e Sudeste do país, o que pode ser explicado pelas condições climáticas favoráveis à plantação, que seriam o clima ameno e pouco chuvoso dos invernos. Tendo em vista a grande plantação dos grãos de cevada, o país tem aumentado a sua produção de cerveja, passando de 13,3 bilhões de litros em 2016, segundo dados da Sindicerv (2023), para 14,1 bilhões de litros, de acordo com a CervBrasil (2023). Além disso, entre 2019 e 2020 foi registrado um aumento de 174 cervejarias no país, segundo o Anuário da Cerveja 2020, publicado pelo MAPA (2021), fazendo com que o setor cervejeiro fosse na contramão de grande parte dos setores da economia brasileira durante o período de pandemia. Assim, o setor representa atualmente 1,6% do PIB nacional, gerando em torno de 2,7 milhões de empregos diretos, indiretos ou induzidos, e cerca de 21 bilhões em impostos, de acordo com a CervBrasil (2023). Esses dados mostram a importância do setor cervejeiro para o país e o seu grande potencial de crescimento.

Cerca de 85% dos resíduos gerados no processo de produção da cerveja são de bagaço de malte, segundo Eliopoulos et al. (2022). De acordo com Kunze (2004), são gerados, aproximadamente, 20 kg de bagaço para cada 100 L de cerveja produzida. Tendo em vista que a produção anual de cerveja é em torno de 14,1 bilhões de litros, de acordo com dados da CervBrasil (2023), anualmente são produzidas cerca de 2,82 milhões de toneladas de bagaço de malte. Considerando sua grande disponibilidade, esse resíduo tem sido explorado para diversas aplicações. Dentre as suas propriedades interessantes, está o

seu valor nutricional, sendo assim utilizado para alimentação animal e humana. Além disso, o bagaço apresenta um elevado poder calorífico, de 18,9 MJ/kg, segundo Kosakowski (2020), indicando também o seu potencial para utilização como biomassa para fontes renováveis de energia.

Tendo em vista a utilização de biomassas para a geração de energia elétrica, segundo dados do BEN (2023), referentes ao ano de 2022, cerca de 8,0% da matriz elétrica brasileira é formada por energia proveniente do uso de biomassas. Ainda segundo BEN (2023), 87,9% da matriz elétrica é proveniente de fontes renováveis contra apenas 26,6% do mundo (dados de 2020), o que mostra que o Brasil é um país potencial de exploração de seus recursos renováveis, dentre eles, hídricos, solares, eólicos, e de biomassas. Com relação à presença das biomassas na matriz elétrica brasileira, a mais representativa para o país são os derivados de cana-de-açúcar, devido ao papel das usinas de açúcar e álcool na economia brasileira. Porém, considerando que outras biomassas, como o bagaço de malte, poderiam ser exploradas para a geração de energia, há um potencial no aumento da presença das energias renováveis na matriz elétrica nacional.

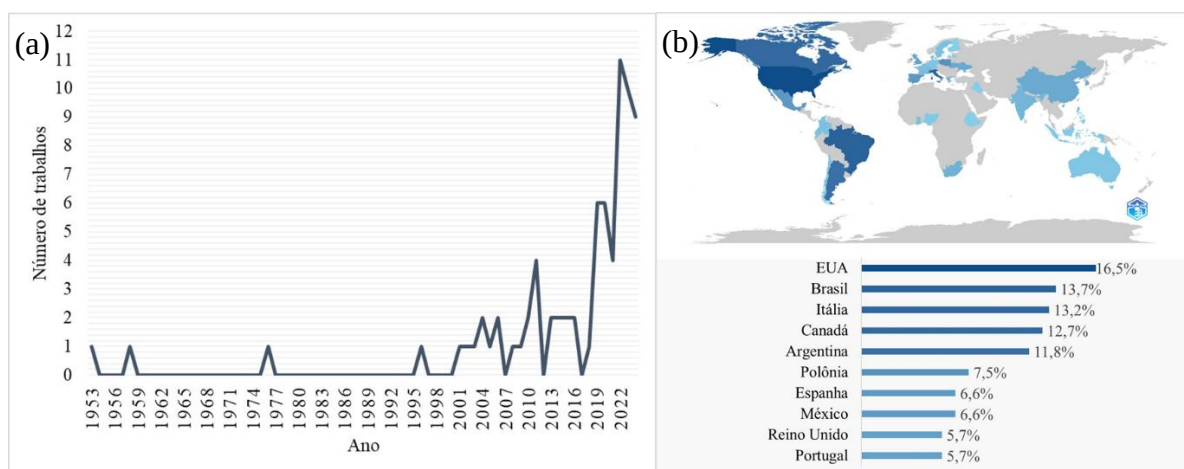
No entanto, as biomassas provenientes de produtos agrícolas, como é o caso do bagaço de malte, em sua maioria, apresentam elevada umidade. Para o bagaço de malte, a umidade fica em torno de 80% (base úmida), segundo Pabbathi et al. (2022). A umidade elevada é prejudicial à conversão termoquímica da biomassa, pois durante o processo de conversão, parte da energia é utilizada para evaporar a água do material, reduzindo a eficiência do processo. Além disso, a presença da umidade no material resulta em um gás de síntese de baixa qualidade. Segundo Panwar e Paul (2021), na pirólise, por exemplo, o bio-óleo é também de baixa qualidade, de menor poder calorífico devido à presença da água. Além disso, a umidade também resulta em maiores custos de transporte e armazenagem do material. Com isso, para que esse resíduo possa ser utilizado para a geração de energia é necessária uma etapa de pré-tratamento, como a secagem, para a redução de sua umidade.

Tendo em vista que a geração de energia a partir da biomassa pode reduzir as contas de energia das cervejarias, e até mesmo torná-las autossuficientes, a produção de energia a partir do bagaço de malte é economicamente e ambientalmente interessante (ORTIZ et al., 2019). Contudo, a literatura apresenta um número reduzido de estudos de caracterização dessa biomassa para esse tipo de aplicação. Com relação ao número de

trabalhos sobre a cinética de secagem do bagaço de malte foi feita uma pesquisa exploratória com base na plataforma Scopus com as palavras-chave “*drying*” e “*brewer’s spent grains*”. Foram encontrados 75 trabalhos com o tema, e na Figura 1 (a) pode-se observar uma tendência no aumento do número de trabalhos nos últimos anos, e de acordo com a Figura 1 (b) o Brasil se destaca como o segundo país em termos de publicação. Embora se verifique esse aumento de estudos, o tema ainda é considerado um desafio. Vale destacar que a Figura 1 foi elaborada com o auxílio da biblioteca Bibliometrix baseada na linguagem de programação R.

Assim, o objetivo geral deste trabalho é realizar a caracterização química, física e da escoabilidade do bagaço de malte para avaliação do potencial dessa biomassa para a produção de bioenergia, e em seguida avaliar o processo de secagem do bagaço de malte em diferentes condições operacionais. Com relação aos objetivos específicos, para a caracterização química propõe-se realizar a análise composicional do bagaço de malte para a determinação dos teores de extrativos, celulose, hemicelulose, lignina e cinzas totais no material. Para a caracterização física objetiva-se determinar o tamanho e distribuição granulométrica das partículas, a massa específica real, aparente e *bulk* compactada, a porosidade da partícula, os formatos característicos na amostra, as dimensões e características das partículas por análise de imagens, a esfericidade, a permeabilidade e o coeficiente de arraste. Para a caracterização da escoabilidade do bagaço de malte propõe-se determinar a razão de Hausner (*HR*), o índice de compressibilidade de Carr (*CCI*), a porosidade do leito, e o ângulo de repouso (*AOR*). Já para o estudo de secagem do material objetiva-se realizar ensaios experimentais para avaliar a umidade e a temperatura da biomassa ao longo do tempo a partir de diferentes temperaturas do ar de secagem.

Figura 1 – Pesquisa exploratória sobre secagem do bagaço de malte: a) Número de trabalhos publicados ao longo dos anos; b) Produção de trabalhos por país



Fonte: Autoria própria.

2. Revisão Bibliográfica

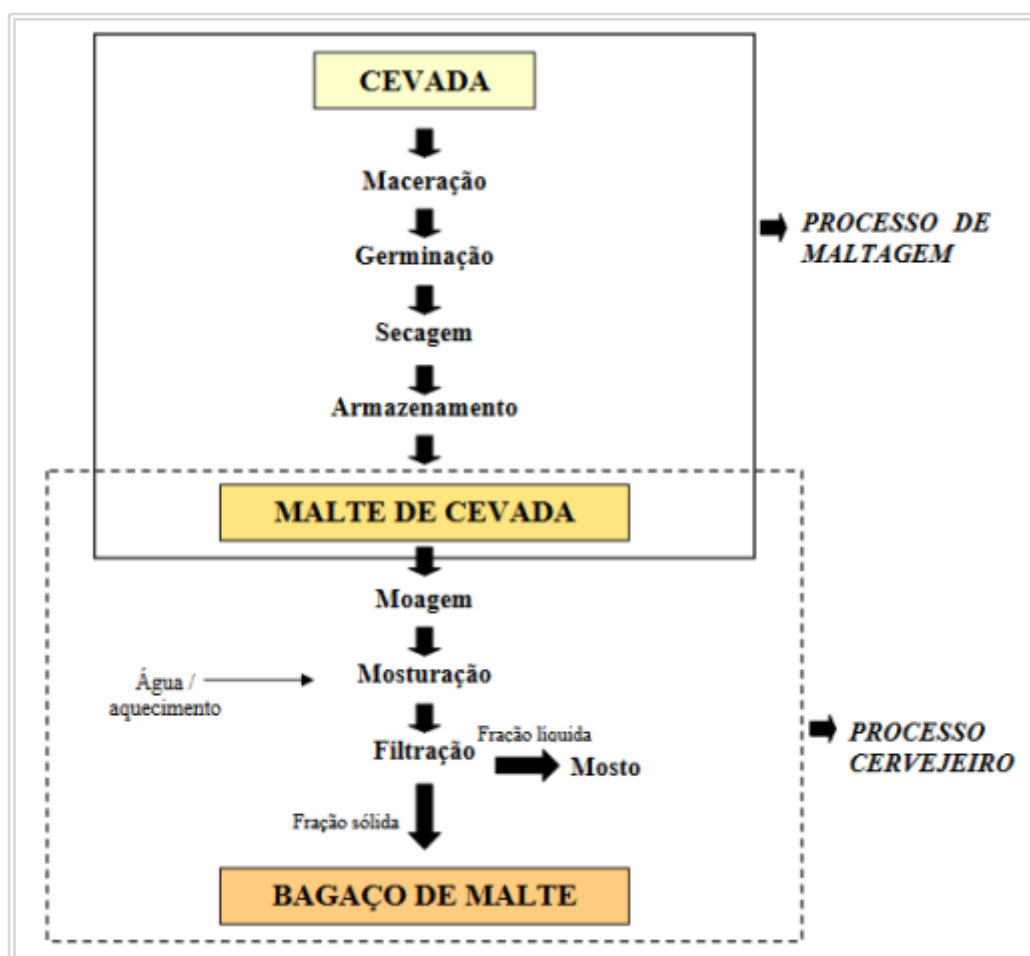
Neste tópico será apresentado o embasamento teórico do presente trabalho, por meio dos seguintes tópicos: a descrição da biomassa em estudo e seu processo de obtenção, a importância da etapa de caracterização do material, e a utilização da biomassa para fins energéticos.

2.1 Origem Industrial do Bagaço de Malte

O malte é uma das matérias-primas fundamentais para a produção de cerveja, fornecendo açúcares fermentáveis e nutrientes, e desempenhando papel na cor, no sabor e no corpo da bebida (MALLET, 2014). Porém, o seu uso gera um resíduo sólido conhecido como bagaço de malte, na faixa de 1,25–1,30 kg/kg de malte com uma umidade que varia de 80-85% (base úmida), de acordo com a técnica de filtração aplicada. Sendo que para cada 100 L de cerveja estima-se a produção de 14-20 kg de bagaço (TSCHOEKE et al., 2023).

O bagaço de malte é gerado a partir do processamento dos grãos de cevada (*Hordeum vulgare*), o qual apresenta duas etapas principais: a maltagem e a mosturação (GUPTA, ABU-GHANNAM e GALLAGHAR, 2010), representadas na Figura 2. A primeira etapa é realizada em uma maltaria, com os grãos que atendem aos critérios de qualidade estando viáveis, livres de doenças e apresentando a casca inteira, por exemplo.

Figura 2 – Etapas do Processamento dos Grãos até a Obtenção do Bagaço de Malte.



Fonte: Adaptado de Menezes e Yamashita (2017).

Antes de iniciar a maltagem, é realizada a limpeza dos grãos através da remoção de corpos estranhos (palha, sementes diversas e poeira), e os grãos são separados de acordo com o tamanho. A maltagem envolve a maceração, a germinação e a secagem dos grãos, como indicado na Figura 2. O principal objetivo da maceração é limpar e hidratar os grãos de cevada, o que leva aproximadamente 48 horas. Durante este tempo, os grãos são misturados com água, a qual é substituída três vezes por água limpa, com períodos de aeração.

Posteriormente, inicia-se a germinação, sendo o surgimento de radículas o sinal mais visível. Durante a germinação, as células da camada de aleurona geram enzimas para quebrar o endosperma e liberar os nutrientes, açúcares e nitrogênio amino livre (*free amino nitrogen* - FAN) que o embrião precisa para se desenvolver. Em seguida, é realizada a secagem, no qual o “malte verde” é seco a 76 °C para maltes claros ou a 110

°C para maltes mais escuros. Então, as radículas secas são retiradas por peneiramento, e o malte deve ser envelhecido por pelo menos três semanas antes de ser usado nas cervejarias (MALLET, 2014).

Como indicado na Figura 2, a segunda etapa do processamento dos grãos é realizada em uma cervejaria, na qual ocorre a mosturação. Neste processo, o malte passa pela operação de moagem e é misturado com água pré-tratada (para eliminar odores e sabores e para a adição de minerais) mantendo a temperatura de 65 a 68 °C por aproximadamente uma hora. A temperatura, o tempo de mosturação e a opção de adicionar outros ingredientes dependem do tipo de cerveja. Durante a mosturação, o amido é convertido em açúcares fermentáveis e dextrinas não fermentáveis por enzimas de diástase. Como resultado da mosturação, o mosto e o bagaço de malte são gerados e separados. O bagaço fica retido, e o mosto é recirculado e drenado (PALMER, 2006).

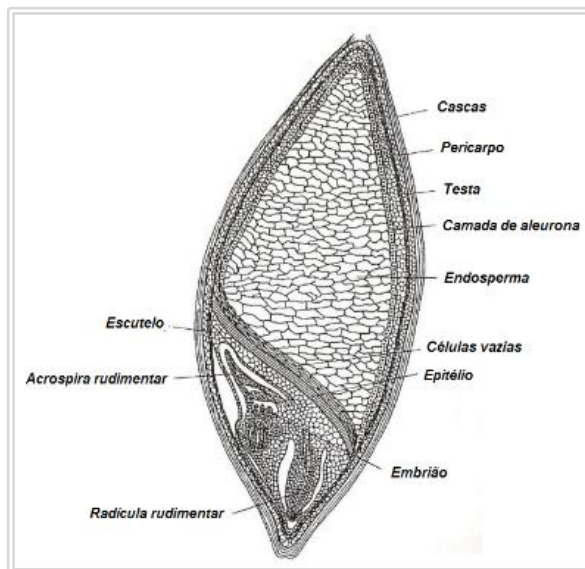
O mosto recuperado é encaminhado para o processo de produção da cerveja, enquanto o bagaço de malte é considerado um resíduo. Como a composição do bagaço varia de acordo com a variedade de cevada, a época de colheita, as técnicas de maltagem e mosturação, e os tipos de ingredientes no caso de adicioná-los durante a mosturação, é essencial determinar a composição e as propriedades físico-químicas da biomassa a ser valorizada, e selecionar a rota de uso mais conveniente. Portanto, a investigação de aplicações alternativas do bagaço de malte é importante sob diversas perspectivas, por exemplo, para a valorização deste coproduto, para a proteção ambiental e para evitar problemas de descarte (CORONADO et al., 2020).

2.2 Bagaço de Malte

O bagaço de malte (*brewers' spent grain*) consiste basicamente da casca, pericarpo e tegumento provenientes do grão de malte original. Sendo que, dependendo da uniformidade da maltagem, mais ou menos endosperma amiláceo e paredes de células vazias de aleurona também podem estar presentes. Usualmente, o teor de amiláceo será insignificante e alguns resíduos de lúpulo introduzidos durante a mosturação estarão presentes dependendo do regime de fermentação usado. Assim, os principais componentes do bagaço de malte são as paredes da casca, pericarpo e tegumento, os quais são ricos em celulose, polissacarídeos não celulósicos e lignina, e podem conter algumas proteínas e lipídios. A casca também contém quantidades consideráveis de sílica e muitos

dos componentes polifenólicos do grão de cevada, o qual está representado na Figura 3 (MACLEOD, 1979).

Figura 3 – Representação esquemática do grão de malte.



Fonte: Nutriagro (2023).

A composição química do bagaço de malte varia de acordo com as características da cevada e do processo de produção da cerveja (HUIGE, 1995; SANTOS et al., 2003). Porém, mesmo com essas variações, o bagaço de malte é considerado um material lignocelulósico com teor de proteínas e fibras de aproximadamente 20% e 70%, respectivamente (MUSSATTO, DRAGONE e ROBERTO, 2006). A análise microscópica do resíduo, indicada no trabalho de Mussatto, Dragone e Roberto (2006), por exemplo, mostra a presença de numerosos tecidos fibrosos da superfície do grão de cevada original, sendo os principais componentes desses tecidos fibrosos o arabinoxilano, a lignina (uma macromolécula polifenólica) e a celulose (um homopolímero linear de unidades de glicose). Como exemplo, Santos et al. (2003), encontraram além de fibra, 24,2% de proteína, 3,9% de lipídios e 3,4% de cinzas no bagaço de malte seco. Além disso, proteínas e fibras são altamente concentradas no resíduo porque boa parte do amido da cevada é removido durante a mosturação (KISSEL e PRENTICE, 1979).

Com relação à composição química do bagaço de malte, segundo Arranz et al. (2021), o elemento majoritário presente na biomassa é o carbono, com $49,44 \pm 0,21$ % em base seca, seguido pelo hidrogênio, $6,69 \pm 0,07$ % em base seca, e pelo nitrogênio, $3,76 \pm$

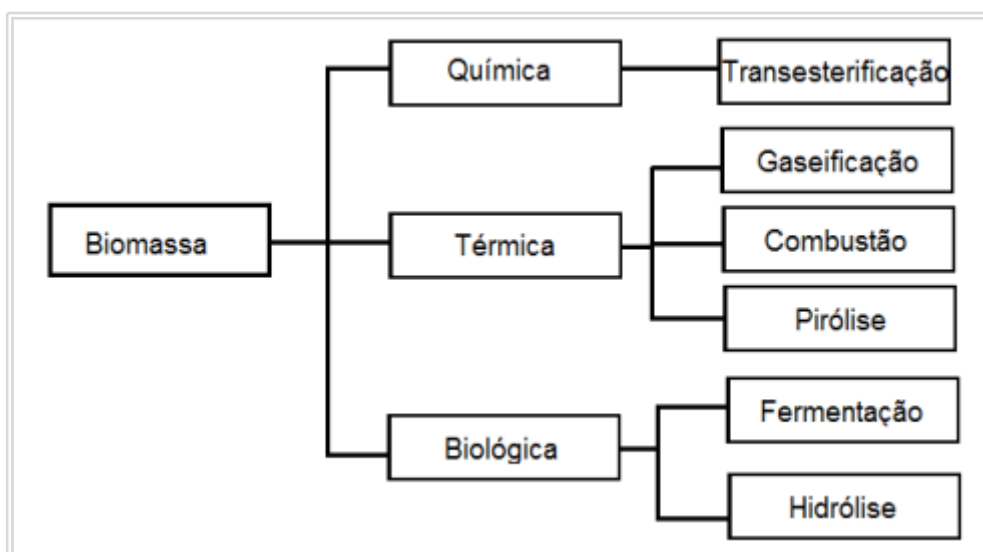
0,01% em base seca. Dada a natureza química da amostra, é esperado que o carbono seja mais representativo, uma vez que o teor de carboidratos do bagaço de malte é alto e a estrutura química desses macronutrientes é formada principalmente por ligações de C – H. Segundo Castro e Colpini (2021), o bagaço de malte apresenta uma estrutura rugosa, com partículas laminares e granulares razoavelmente organizadas, e porosa, o que pode ser uma indicação de que a biomassa pode ser utilizada na síntese de materiais porosos, como adsorventes ou zeólitas, e consequentemente utilizado em processos de adsorção.

2.3 O Bagaço de Malte como Fonte Energética

O bagaço de malte pode ser utilizado para diversos fins, dentre eles para alimentação animal e humana, em processos biotecnológicos, na construção civil, na produção de papel, em processos de adsorção (MUSSATTO, DRAGONE e ROBERTO, 2006), para fins energéticos, através do biometano, do bioetanol, do bio-óleo, do biohidrogênio, da pirólise e da co-combustão (WANG et al., 2015; BOCHMANN, DROSG e FUCHS, 2015; CELAYA, LADE e GOLDFARB, 2015; WILKINSON et al., 2017; MAHMOOD et al., 2013; SANNA et al., 2011; ZHANG e ZANG, 2016).

De forma geral, para a geração de bioetanol a partir da biomassa são realizadas as seguintes etapas: pré-tratamento, hidrólise, fermentação e destilação. Alguns fatores tornam a bioconversão da lignocelulose em bioetanol mais desafiadora, dentre eles: (1) a resistência natural da biomassa à decomposição; (2) a variedade de açúcares liberados na quebra da celulose e da hemicelulose, o que leva à busca por organismos que fermentem esses resíduos com mais eficiência, e (3) custos de coleta e armazenamento de materiais lignocelulósicos (BALAT, 2011). Dentre os microrganismos relatados para a bioconversão do bagaço de malte em bioetanol estão: *S. cerevisiae* (WILKINSON, SMART e COOK, 2014), *S. cerevisiae* NRRL YB 2293 (LIGUORI et al., 2015), *Zymomonas mobilis* (DÁVILA, ROSENBERG e CARDONA, 2016), *Pichia stipitis*, *Kluyveromyces marxianus* (WHITE, YOHANNAN e WALKER, 2008), *Trametes versicolor* (OKAMOTO et al., 2014), entre outros. No fluxograma da Figura 4 estão indicadas as principais rotas de conversão da biomassa, dentre elas a química, a biológica e a térmica. A conversão da biomassa em bioetanol está representada na rota biológica.

Figura 4 – Rotas de Conversão de Biomassa.



Fonte: Figueiredo (2011).

Ainda sobre o aproveitamento energético do bagaço de malte, cabe destacar o seu emprego em processos de conversão termoquímica para a geração de calor, eletricidade e intermediários gasosos ou líquidos, os quais podem ser convertidos em combustíveis líquidos ou outros produtos químicos. A quantidade de cada componente produzido nos processos de conversão pode ser controlada ajustando fatores do processo, como temperatura, taxa de alimentação, tempo de aquecimento e tamanho de partícula da biomassa (GNANASEKARAN et al., 2023).

Dentre os processos de conversão mais conhecidos estão a pirólise, a gaseificação e a combustão. A pirólise está entre as vias mais estudadas para a produção de biocombustível a partir de biomassa nos últimos anos (POURKARIMI et al., 2019), sendo um processo no qual a biomassa é decomposta por calor em uma faixa de temperatura de 300 a 650 °C, na ausência de oxigênio, conduzida à pressão atmosférica (TANG et al., 2020). Os produtos obtidos incluem o biocarvão, o bio-óleo e gases não condensáveis, incluindo hidrogênio, metano, monóxido de carbono, dióxido de carbono e outros hidrocarbonetos gasosos. A pirólise pode ser caracterizada como pirólise lenta, rápida e *flash*, dependendo das condições do processo, como taxa de aquecimento, tempo de residência, tamanho de partícula e temperatura. A pirólise lenta, também conhecida como carbonização, é típica em temperaturas que variam de 300 a 700 °C e tem um longo período de residência (várias horas a vários dias). A pirólise rápida ocorre a uma taxa de

aquecimento rápido (10–200 °C/min) e tempo de residência curto (0,5–10 s, tipicamente 2 s), resultando em um alto rendimento de bio-óleo de 50–70% em peso. A pirólise *flash* ocorre a uma taxa de aquecimento maior (>103 °C/min) e um tempo de permanência mais curto (0,5 s), sendo que maiores rendimentos de gás de síntese (50-60% em peso) podem ser gerados por este procedimento (FOONG et al., 2020).

A gaseificação, por sua vez, é um processo de conversão térmica no qual o material carbonáceo é convertido em um produto gasoso ou gás de síntese a partir de um fluxo de gás contendo oxigênio controlado, em altas temperaturas (550-1000 °C) (ELMAZ, YÜCEL, e MUTLU, 2020). O produto gasoso ou gás de síntese é composto de hidrogênio e monóxido de carbono com uma pequena quantidade de metano, água, dióxido de carbono, nitrogênio e hidrocarbonetos superiores. A gaseificação da biomassa é conduzida na presença de um agente gaseificante (ar ou oxigênio), e os gases resultantes podem ser convertidos em uma variedade de produtos químicos por meio das rotas Fischer-Tropsch (FT), e vários tipos de combustíveis de transporte, como metanol e DME (SANTOS e ALENCAR, 2020). A gaseificação de biomassa é o método mais eficiente de transformar biomassa em calor e energia por meio de motores, turbinas e caldeiras. Calor e energia podem ser criados de forma eficiente durante a gaseificação usando combustíveis de baixa densidade energética, como biomassa lignocelulósica (KHAN, 2023).

A combustão é um processo no qual a biomassa é queimada com excesso de ar, em elevadas temperaturas (entre 850-1200 °C) a partir de uma série de reações químicas (YAO et al., 2023; ZHENG et al., 2020). Durante o processo de combustão, o carbono é oxidado em dióxido de carbono e o hidrogênio é oxidado em água (KHAN, 2023). A matéria inflamável é oxidada, e o gás de combustão é recuperado como energia térmica por uma caldeira e o vapor produzido é usado para gerar eletricidade (TSYBINA e WUENSCH, 2018). O processo de combustão pode resultar em emissões tóxicas, o que pode ser superado com a instalação de sistemas de limpeza de gases de combustão. Esses sistemas de limpeza de gás podem diminuir significativamente a alta quantidade de descarga de poluentes das tecnologias de incineração (ALAO, POPOOLA e AYODELE, 2022). Apesar de suas desvantagens, como a baixa eficiência de conversão, as dificuldades de tratamento de cinza, e dos possíveis danos ambientais que podem ser gerados (DHANALAKSHMI et al., 2022), o processo de incineração é favorável devido à sua capacidade de eliminar patógenos, da sua maturidade técnica e de seu elevado nível

de geração de calor e energia elétrica por meio de operações combinadas de calor e energia (CHP) (CHEN et al., 2022). Isso enquadra a combustão/ou incineração entre as tecnologias termoquímicas viáveis para gerar energia (CHEN et al., 2022). Na Figura 4 os processos de pirólise, gaseificação e combustão estão representados na rota de conversão térmica.

2.4 Caracterização da Biomassa

A caracterização da biomassa ajuda na definição do destino do resíduo, pois dependendo das características do bagaço, ele será utilizado para nutrição animal e/ou humana, produção de polímeros, de bioquímicos e/ou de biocombustíveis (NAIBAHO; KORZENIOWSKA, 2021).

Muitos pesquisadores estudaram a possibilidade de melhorar a qualidade do bagaço de malte para alimentos, nutracêuticos e biopolímeros. Dentre as possibilidades encontradas estão a modificação da fibra, a fermentação (CHU et al., 2019), o tratamento físico (LI et al., 2019), o tratamento químico (RAVINDRAN et al., 2018) e uma combinação de técnicas (ESPINO et al., 2014; GIL-LOPEZ et al., 2019). Contudo, os resultados dependem das propriedades básicas e da qualidade da biomassa. Por isso, é importante conhecer as propriedades físico-químicas do resíduo, de forma a determinar as melhores maneiras de valorizá-lo.

Massardi, Massini e Silva (2020), Wilkinson, Smart e Cook (2014) e Qin, Johansen e Mussatto (2018) realizaram a caracterização química do bagaço de malte a partir da determinação do teor de proteínas, cinzas, extrativos, lignina solúvel e insolúvel, celulose e hemicelulose. Com relação à caracterização física e de escoabilidade nota-se que a literatura apresenta diversos trabalhos para biomassas, porém poucos para o bagaço de malte, o que justifica o objetivo deste estudo. Por exemplo, Rezaei et al. (2016) e Rezaei e Sokhansanj (2018) fizeram a distribuição granulométrica, a análise digital de imagens, o cálculo dos fatores de forma, a determinação da densidade real, dos parâmetros *HR* (*Hausner Ratio*), *CCI* (*Carr Compressibility Index*) e AOR (ângulo de repouso) para *ground chip particle* e para *ground pellet particle*, respectivamente. Tannous et al. (2013) estudaram a distribuição granulométrica, os fatores de forma, a densidade real, *HR*, *CCI*, a porosidade e a morfologia de uma madeira da espécie *Douglas fir*. Bitra et al. (2011) apresentaram a distribuição granulométrica e acumulativa

considerando o modelo de Rosin, Rammler and Bennett (RRB) para partículas de palha de trigo. Souza et al. (2021) realizaram a caracterização de fibras celulósicas granulares para estudo de secagem a partir da análise de imagens, da morfologia e das propriedades físicas e estruturais da biomassa. Souto et al. (2021) determinaram as propriedades físicas do caroço de açaí seco, como a massa específica *bulk* compactada, a porosidade do leito e os fatores de forma e geométricos por análise de imagens.

2.5 Secagem do Bagaço de Malte

A secagem é um dos métodos mais comuns para remover umidade da biomassa. O estudo desta etapa de pré-tratamento objetiva determinar as condições ótimas de processo para minimizar o consumo de energia e o custo da secagem e é possível observar um aumento no número de estudos acerca da cinética de secagem do bagaço de malte devido ao seu potencial de aplicação industrial (ARRANZ et al., 2018; MALLÉN; NAJDANOVIC-VISAK, 2018; SINGH et al., 2020).

Devido à elevada umidade do bagaço de malte “in natura”, a biomassa deve ser preservada para estender sua vida útil e reduzir os custos de transporte e armazenamento. Atualmente, os métodos de preservação do bagaço de malte incluem liofilização, congelamento, secagem em estufa e vapor superaquecido, sendo o mais comum a secagem em secador rotativo (THAI et al., 2022). Estes métodos utilizam grandes quantidades de energia; com isso, alternativas mais eficientes energeticamente precisam ser desenvolvidas (FÁRÇAŞ et al., 2014; LYNCH; STEFFEN; ARENDT, 2016).

A energia térmica necessária para evaporar a umidade do material pode ser fornecida de diferentes maneiras: condução, convecção, radiação e micro-ondas, entre outras. Esses diferentes métodos de transferência de calor da fase gasosa para a fase sólida permitem o uso de diversos métodos de secagem. A classificação dos secadores e a seleção de um método apropriado de secagem de resíduos sólidos variam consideravelmente devido à grande diversidade de resíduos e à dificuldade de trabalhar com sistemas não uniformes. Em geral, os secadores podem ser classificados de acordo com o método de transferência de calor e as características físicas da biomassa úmida. Alguns tipos de secadores incluem secadores de leito fixo, rotativos, do tipo túnel, em leito de jorro, pneumáticos e de leito fluidizado (JIMOH et al., 2023; PERAZZINI et al., 2016; YI et al., 2020).

Alguns autores estudaram a secagem de biomassas, dentre eles Perazzini et al. (2014) verificaram que o secador rotativo era adequado para resíduos cítricos, sendo que o conteúdo de umidade foi reduzido de 85% para 12% (base úmida) de forma a garantir a inativação microbiológica. Fufa et al. (2025) investigaram a cinética de secagem de fatias de sementes de abacate que foram submetidas a diferentes pré-tratamentos e métodos de secagem (secador de leito fluidizado, estufa e secador solar) usando amostras liofilizadas como controle. Pinto et al. (2025) estudaram a secagem do resíduo sólido do suco de laranja em um leito de jorro agitado mecanicamente, os experimentos foram conduzidos em temperaturas entre 40 e 80 °C, e a demanda energética da secagem foi 12,6–23,4% em relação a do leito de jorro convencional.

Dessa forma, o estudo da secagem de biomassa apresenta complexidades. Os desafios se devem à heterogeneidade que os sólidos apresentam, ao grande número de variáveis envolvidas no processo e à necessidade de se obter um produto com umidade final adequada a partir de um processo de secagem eficiente (PERAZZINI et al., 2016).

3. Materiais e Métodos

Neste tópico serão apresentadas a natureza, a forma de seleção e o preparo da biomassa estudada, além dos procedimentos utilizados para a caracterização química, física, da escoabilidade do material e para o estudo de secagem do bagaço de malte.

3.1 Natureza, Seleção e Preparo das Amostras

Inicialmente, realizou-se um levantamento dos resíduos gerados em quantidades consideráveis no território brasileiro e com potencial energético. A partir deste levantamento, o bagaço de malte, devido ao crescimento do setor cervejeiro nos últimos anos, foi selecionado para estudo visando a sua utilização para fins energéticos. Essa biomassa é um resíduo do processo produtivo da cerveja, e para esse trabalho foi fornecida pela empresa MusA[®], localizada na cidade de Itajubá, no estado de Minas Gerais.

As amostras de bagaço de malte quando recebidas da cervejaria apresentavam alta umidade, em torno de 85% (base úmida). A preparação do material para armazenagem

foi realizada de duas maneiras distintas, dependendo do tipo de estudo. As amostras que seriam utilizadas nas análises de caracterização passaram por processos consecutivos de secagem, primeiro uma secagem mecânica utilizando panos para a remoção da água em excesso (água superficial) e, em seguida, uma secagem em estufa a 45 °C por 16 h. A Figura 5 mostra a biomassa após essas duas etapas de secagem, preparada para ser utilizada nos estudos de caracterização. Já as amostras destinadas aos ensaios de secagem foram congeladas e, para serem utilizadas foram deixadas na geladeira por 26 horas para descongelar. Passado este período, a biomassa foi deixada por 5 horas à temperatura ambiente para dar início aos experimentos.

Figura 5 – Bagaço de Malte Após as Etapas de Secagem, Preparado para ser Utilizado nos Estudos de Caracterização.



Fonte: Autoria própria.

3.2 Caracterização Química

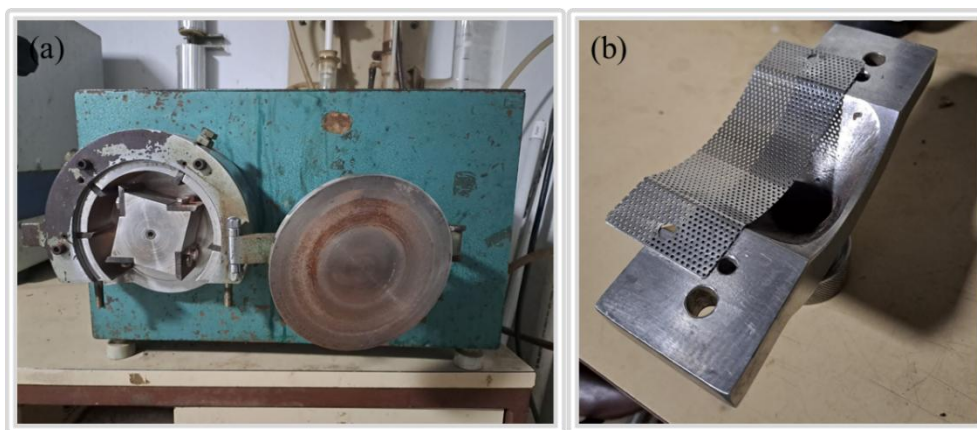
A caracterização química da biomassa em estudo foi feita a partir da realização da análise composicional do bagaço de malte com o objetivo de determinar os teores de extrativos, celulose, hemicelulose, lignina e cinzas totais na amostra. Para isso, foi utilizado um procedimento baseado na metodologia Procedimentos Padrões para Análise Composicional da Biomassa (*Standard Procedures for Biomass Compositional Analysis*)

estabelecida pelo Laboratório Norte-Americano NREL, 2009 (*National Renewable Energy Laboratory*). A análise química foi realizada no Laboratório de Microbiologia Aplicada e Bioprocessos (LMBio), localizado na Universidade de São Paulo (EEL/USP).

3.2.1 Preparo das Amostras

As amostras foram preparadas segundo o procedimento padrão do NREL, o que envolveu etapas de moagem e peneiramento. Inicialmente, as amostras secas foram trituradas em um moinho de facas e peneiradas para obtenção de partículas de tamanho de 20 *mesh* (0,85 mm) em uma tela metálica, sendo esses aparatos apresentados na Figura 6. Para a execução do procedimento de caracterização química, a umidade da amostra deve estar em aproximadamente 10% (base úmida); caso contrário, indica-se a secagem do material ao ambiente. Devido a isso, a umidade das amostras em base úmida foi determinada em uma balança de infravermelho da marca Marte ID50 em uma temperatura de 105 °C. Para análise da umidade utilizou-se, aproximadamente, 1 g de amostra, e os resultados obtidos pela balança indicaram a porcentagem de água perdida pelo material (umidade residual).

Figura 6 – Equipamentos Utilizados para a Moagem e Peneiramento das Amostras: a) Moinho de Facas; b) Peneira de 20 *mesh*.



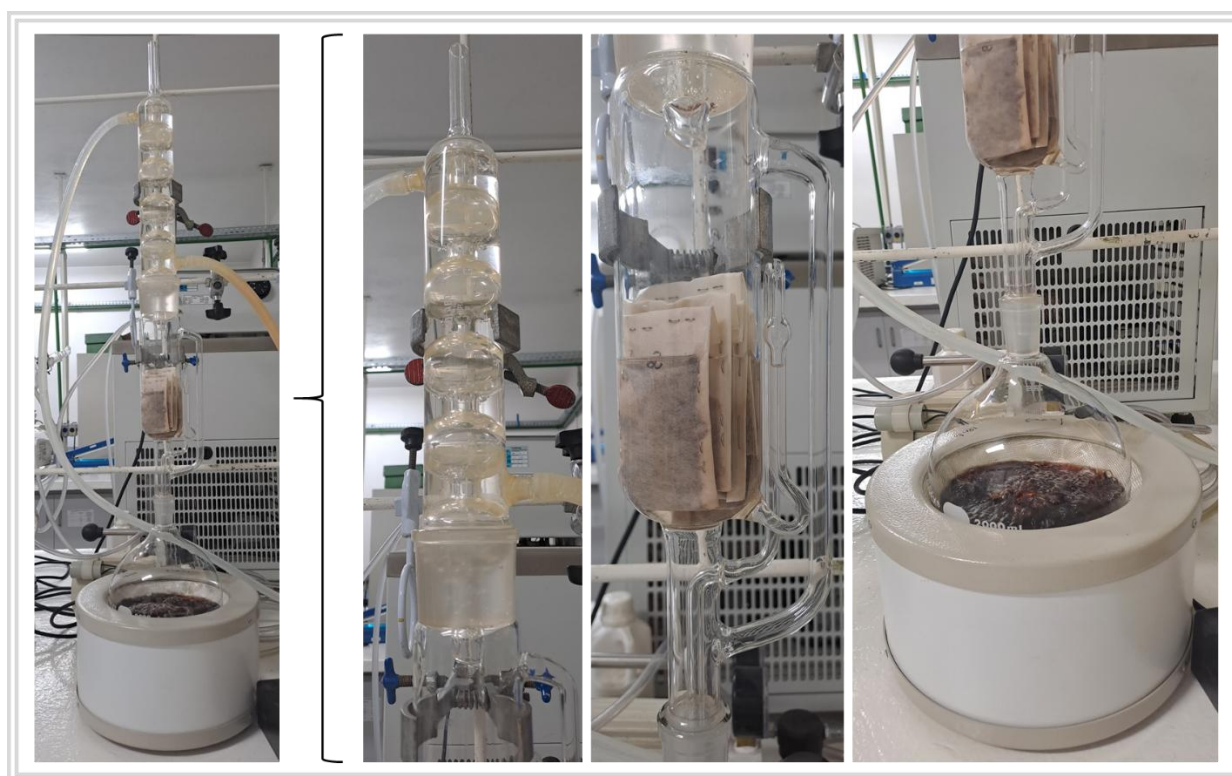
Fonte: Autoria própria.

3.2.2 Determinação dos Extrativos na Amostra

Para a realização da análise composicional da biomassa a partir da metodologia indicada foi realizada uma etapa de remoção de extrativos presentes na amostra. Isso é sugerido para evitar qualquer tipo de interferência desses componentes na determinação

dos compostos estruturais da biomassa. Com isso, a retirada dos extrativos tinha como objetivo remover o material não estrutural (clorofila, ceras, entre outros) da biomassa vegetal por meio de um processo de extração exaustiva em Soxhlet, utilizando etanol 95%. Para isso, foram pesadas aproximadamente 3 g do bagaço de malte, em triplicata, e as amostras foram colocadas em pequenos envelopes feitos de papel filtro. Esses envelopes foram grampeados e levados para extração por um período aproximado de 6 horas. Ao final da extração, os envelopes foram retirados e mantidos à temperatura ambiente para secagem e posterior pesagem. O aparato utilizado para a extração está indicado na Figura 7.

Figura 7 – Aparato Utilizado na Remoção dos Extrativos da Amostra.



Fonte: Autoria própria.

A determinação do teor de extrativos (*Teor Extrat.*), em porcentagem, foi realizada a partir da Equação (1).

$$Teor\ Extrat. = \left[1 - \left(\frac{m_{env.+amostra} - m_{env.}}{m_{amostra\ ini.\ env.}} \right) \right] 100 \quad (1)$$

sendo que, $m_{\text{env.}+\text{amostra}}$ é a massa do conjunto (envelope e amostra) após extração e secagem, $m_{\text{env.}}$ é a massa do envelope, e $m_{\text{amostra ini. env.}}$ é a massa de amostra inicial, colocada no envelope antes da extração, medidas em gramas. A amostra sem extrativos obtida foi utilizada nas etapas de análise composicional indicadas no item 3.2.3.

3.2.3 Determinação de Celulose, Hemicelulose e Lignina na Amostra

Para a determinação de carboidratos estruturais (celulose e hemicelulose) e lignina (solúvel e insolúvel) foram realizadas duas etapas de hidrólise ácida, uma concentrada e outra diluída. Para isso, em um tubo de ensaio foram pesadas em torno de 0,3 g da amostra, e adicionados 3 mL de ácido sulfúrico 72%. O tubo foi colocado em um banho térmico regulado a 30 °C por 2 horas, sendo esse procedimento realizado em triplicata. Com bastões de vidro, as três amostras no banho foram homogeneizadas em intervalos de 10 minutos. Após a realização da hidrólise ácida concentrada, os tubos foram removidos do banho e as soluções ácidas foram diluídas a uma concentração de 4% pela adição de 84 mL de água destilada. Os hidrolisados resultantes foram transferidos para Erlenmeyers de 125 mL, e as vidrarias foram seladas com papel alumínio e colocadas em autoclave a 121 °C por 1 hora para completa hidrólise dos oligômeros. Em seguida, os frascos foram removidos da autoclave e deixados esfriando lentamente para que fosse possível retirar o papel alumínio. Então, a mistura reacional de cada frasco Erlenmeyer de 125 mL foi filtrada com auxílio do aparato experimental indicado na Figura 8, composto por um filtro de vidro (GF-3) previamente seco em estufa a 105 °C e tarado junto ao pesa filtro. Os filtrados obtidos foram reservados em frascos de vidro para serem utilizados na determinação de lignina solúvel e carboidratos. Separado o filtrado de interesse, lavou-se o sólido que ficou retido no papel filtro com 113 mL de água destilada e este foi, então, direcionado para a determinação de lignina insolúvel. Além de todo o procedimento ter sido feito em triplicata (três amostras), ele também foi realizado sem a adição da biomassa no início, com o objetivo de se obter uma solução chamada de “branco”, para ser utilizada na análise de lignina solúvel descrita no item 3.2.3.1.

Figura 8 – Aparato Experimental Utilizado na Filtração.



Fonte: Autoria própria.

3.2.3.1 Determinação de Lignina Solúvel

Essa análise foi realizada em um prazo de 6 horas após a obtenção do filtrado, conforme indicado no item 3.2.3. As três amostras e o branco foram diluídos para uma faixa de leitura de 0,2 a 1 em absorbância. Para isso, 4 mL de cada um dos filtrados obtidos foram transferidos para balões volumétricos de 100 mL aferidos com água destilada (diluição das amostras foi de 1:25). Em seguida, as soluções diluídas foram transferidas para cubetas de quartzo, e as absorbâncias medidas em um espectrofotômetro de UV-Visível no comprimento de onda de 240 nm (comprimento de onda específico para a biomassa estudada) (MAIONE, 2019). O restante do filtrado (não diluído) foi reservado para a determinação dos carboidratos no HPLC.

A determinação do teor de lignina solúvel (*Teor Lignina Sol.*), em porcentagem, foi realizada a partir da Equação (2).

$$Teor\ Lignina\ Sol. = 100 \frac{A}{ab} FD \frac{V}{m_{amostra}} 29 \quad (2)$$

sendo que, A é a absorbância da amostra medida em 240 nm, lida no espectrofotômetro UV-Visível, a é a absortividade da biomassa, no caso do bagaço de malte, 25 L/g.cm, b é o caminho ótico, igual a 1 cm, FD é o fator de diluição, nesse caso, 0,04 (1/25), V é o

volume da solução inicial de ácido sulfúrico a 72% (m/m) em L, e m_{amostra} é a massa de amostra seca inicial em gramas (colocada no tubo de ensaio para iniciar a hidrólise ácida).

3.2.3.2 Determinação de Celulose e Hemicelulose

Os filtrados obtidos no item 3.2.3 (não diluídos) foram utilizados para a determinação dos teores de celulose e hemicelulose na biomassa. Inicialmente, os filtrados foram passados por um filtro Sep Pak C18 (Millipore), o qual foi rinsado anteriormente com etanol 95%. Em seguida, foi aplicada a técnica de Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC) para a determinação dos teores de carboidratos, utilizando as seguintes condições: coluna Bio Rad Aminex HPX-87H (300 x 7,8 mm); temperatura da coluna, 45 °C; temperatura do detector, 35 °C; detector de índice de refração Waters 410; eluente, solução de ácido sulfúrico 0,005 M, fluxo de 0,6 mL/min; volume da amostra injetada, 20 µL. O eluente antes de ser usado foi filtrado a vácuo em membrana de éster de celulose, 0,45 µm de poro, e 47 mm de diâmetro (Millipore) e simultaneamente degaseificado em banho de ultrassom (Thornton) por 25 minutos.

Como resultado, o HPLC fornece as concentrações dos açúcares glicose, xilose e arabinose em g/L. A partir das Equações (3) e (4) pode-se calcular os teores de glicose (*Teor Glico.*) e xilose + arabinose (*Teor Xilo. + Arabi.*), em porcentagem, na biomassa, respectivamente.

$$Teor\ Glico. = \left(\frac{C_{\text{glico.}} \cdot 87 \cdot \frac{1}{1000}}{m_{\text{amostra}}} \right) 100 \quad (3)$$

$$Teor\ Xilo. + Arabi. = \left(\frac{(C_{\text{xilo.}} + C_{\text{arabi.}}) \cdot 87 \cdot \frac{1}{1000}}{m_{\text{amostra}}} \right) 100 \quad (4)$$

sendo, $C_{\text{glico.}}$, $C_{\text{xilo.}}$ e $C_{\text{arabi.}}$ as concentrações de glicose, xilose e arabinose em g/L, obtidas no HPLC. Ao multiplicar essas concentrações pelo fator 0,087 (87/1000) obtém-se a massa do componente em gramas presente no meio reacional, em 87 mL (3 mL de ácido sulfúrico + 84 mL de água destilada), tendo em vista que é conhecida a massa em gramas do componente presente em 1000 mL de solução.

A partir dos teores de glicose e xilose + arabinose foi possível determinar os teores de celulose (*Teor Celul.*) e hemicelulose (*Teor de Hemi.*), em porcentagem, presentes no bagaço de malte, utilizando as Equações (5) e (6), respectivamente.

$$Teor Celul. = Teor Glico. FC_c FPH_c \quad (5)$$

$$Teor de Hemi. = Teor Xilo. + Arabi. FC_h FPH_h \quad (6)$$

sendo, FC_c o fator de conversão para celulose, igual a 0,9, FPH_c o fator de perda de hidrolisado para celulose, igual a 1,055, FC_h o fator de conversão para hemicelulose, igual a 0,88, e FPH_h o fator de perda de hidrolisado para hemicelulose, igual a 1,155.

3.2.3.3 Determinação de Lignina Insolúvel

O papel filtro contendo os resíduos sólidos provenientes da etapa de hidrólise ácida foram colocados cuidadosamente em placas de vidro e levados para a estufa a 80 °C por, aproximadamente, 12 horas. Decorrido esse tempo, as placas de vidro foram retiradas e colocadas em um dessecador para esfriar. Em seguida, os papéis filtro foram pesados em balança analítica e as massas foram registradas ($m_{\text{papel+resí. inso.}}$). Após a pesagem, os papéis filtro foram transferidos para cadinhos de incineração previamente preparados (conforme descrito no item 3.2.4) e o conjunto (cadinho + papel filtro com resíduo sólido) foi levado para a mufla a 575 °C por 24 horas. Posteriormente, o conjunto foi retirado da mufla e deixado em dessecador por 1 hora para resfriamento. A seguir, o conjunto foi pesado e a massa anotada ($m_{\text{cad.+cinzas}}$). Cabe destacar que as massas dos papéis filtro (m_{papel}) e dos cadinhos ($m_{\text{cad.}}$) utilizados também foram registradas. Com isso, o teor de lignina insolúvel (*Teor Lignina Insol.*), em porcentagem, foi determinado a partir da Equação (7).

$$Teor Lignina Insol. = \left[\frac{m_{\text{resí. inso.}} - (m_{\text{cinzas cad.}} - m_{\text{cinzas papel}})}{m_{\text{amostra}}} \right] 100 \quad (7)$$

sendo que, a massa de resíduo insolúvel, $m_{\text{resí. inso.}}$, a massa de cinzas no cadinho, $m_{\text{cinzas cad.}}$, e a massa de cinzas do papel filtro, $m_{\text{cinzas papel}}$, em gramas, foram determinadas pelas Equações (8), (9) e (10), respectivamente.

É importante destacar que a massa de cinzas no cadinho pode ser composta pelas cinzas do papel filtro utilizado e pelas cinzas presentes no resíduo insolúvel. Com isso, para se ter uma estimativa da quantidade de cinzas que seria proveniente do papel filtro utilizado, foi feito um teste colocando um papel filtro de massa conhecida em um cadinho ($m_{\text{um papel}}$), e este foi levado a mufla a 575 °C por 24 h, e após resfriamento em dessecador, a massa de cinzas gerada foi medida ($m_{\text{cinzas um papel}}$). Com isso, obteve-se a fração de cinzas que é formada a partir de uma determinada massa de papel filtro, e essa proporção multiplicada por cada massa de papel filtro utilizado (m_{papel}) permitiu obter a quantidade aproximada de cinzas que seriam geradas por cada um deles ($m_{\text{cinzas papel}}$), como evidenciado na Equação (10).

$$m_{\text{resí. inso.}} = m_{\text{papel+resí. inso.}} - m_{\text{papel}} \quad (8)$$

$$m_{\text{cinzas cad.}} = m_{\text{cad.+cinzas}} - m_{\text{cad.}} \quad (9)$$

$$m_{\text{cinzas papel}} = \left(\frac{m_{\text{cinzas um papel}}}{m_{\text{um papel}}} \right) m_{\text{papel}} \quad (10)$$

3.2.3.4 Determinação do Teor de Lignina Total na Amostra

O teor de lignina total (*Teor Lignina Total*), em porcentagem, na amostra pode ser calculado pela soma do teor de lignina solúvel com o teor de lignina insolúvel na amostra, como indicado pela Equação (11).

$$\text{Teor Lignina Total} = \text{Teor Lignina Sol.} + \text{Teor Lignina Insol.} \quad (11)$$

3.2.3.5 Correção dos Teores de Lignina, Celulose e Hemicelulose

Os teores de lignina, celulose e hemicelulose foram determinados a partir de uma amostra que não continha os extrativos. Além disso, embora se quantifique as cinzas no resíduo insolúvel, que estaria junto da lignina insolúvel, há uma quantidade de cinzas presentes na amostra inicial que não está sendo contabilizada. Logo, a amostra utilizada na determinação dos teores de lignina, celulose e hemicelulose não continham extrativos e parte das cinzas. Com isso, é necessário redefinir os teores desses componentes para

uma massa de biomassa com extrativos e cinzas totais. Essa correção é feita a partir das Equações (12), (13) e (14).

Teor Lignina Corrigido

$$= \text{Teor Lignina Total}(100\% - (\text{Teor Extrat.} + \text{Teor Cinzas Totais})) \quad (12)$$

Teor Celulose Corrigido

$$= \text{Teor Celul.}(100\% - (\text{Teor Extrat.} + \text{Teor Cinzas Totais})) \quad (13)$$

Teor Hemicelulose Corrigido

$$= \text{Teor de Hemi.}(100\% - (\text{Teor Extrat.} + \text{Teor Cinzas Totais})) \quad (14)$$

3.2.4 Determinação do Teor de Cinzas Totais na Amostra

Essa análise objetiva determinar a quantidade de material inorgânico na biomassa, seja estrutural ou extraída, como parte da composição total do material. Inicialmente, os cadinhos para incineração foram rotulados apropriadamente e colocados na mufla a 575 °C por um período de 4 horas e, em seguida, os cadinhos foram resfriados em dessecador por 1 hora. O procedimento de aquecer o cadinho na mufla e resfriá-lo em dessecador foi repetido de hora em hora até peso constante do cadinho. Em seguida, o cadinho foi pesado e tarado, 1 g da amostra foi transferido e o conjunto levado para a mufla a 575 °C por 24 horas. Decorrido esse tempo, esperou-se o resfriamento da mufla para a remoção cuidadosa dos cadinhos para o dessecador, e após atingirem a temperatura ambiente, os cadinhos foram pesados. O teor de cinzas totais (*Teor Cinzas Totais*), em porcentagem, na amostra foi calculado segundo a Equação (15).

$$\text{Teor Cinzas Totais} = \left(\frac{m_{\text{cad.} + \text{cinzas totais}} - m_{\text{cad.}}}{m_{\text{amostra adi.}}} \right) 100 \quad (15)$$

sendo que, $m_{\text{cad.} + \text{cinzas totais}}$ é a massa do cadinho com as cinzas e $m_{\text{amostra adi.}}$ é a massa de amostra seca transferida inicialmente para o cadinho.

3.3 Caracterização Física

A caracterização física do bagaço de malte foi feita a partir da determinação do tamanho e distribuição granulométrica das partículas, da massa específica real, aparente e *bulk* compactada, da porosidade da partícula, dos formatos característicos na amostra, das dimensões e características das partículas por análise de imagens, da esfericidade, da permeabilidade, do coeficiente de arraste e da velocidade terminal.

3.3.1 Tamanho e Distribuição Granulométrica

Foi realizado o processo de peneiramento das amostras secas do bagaço de malte utilizando uma peneiradora eletromagnética (modelo IRIS FTL-0200, Filtra Vibración S.L., Barcelona, Espanha). Nesse equipamento, as peneiras com aberturas correspondentes a 4,75; 4,00; 3,35; 2,80; 2,36; 2,00; 1,40; 1,18 e 1,00 mm foram dispostas de cima para baixo, do menor para o maior número de *mesh*. Após montado o conjunto, 150 g da amostra foram colocadas sobre a peneira de maior abertura, e foi iniciado o peneiramento a partir da agitação/vibração das peneiras durante 10 min, seguindo o procedimento da ASABE ANSI Standard S319.3. Após o processo de separação granulométrica, a massa retida em cada peneira foi medida usando uma balança analítica (precisão de $\pm 0,0001$ g) e utilizada na determinação do diâmetro de Sauter (d_{sv}), de acordo com a Equação (16).

$$d_{sv} = \frac{1}{\sum \left(\frac{x_i}{d_i^*} \right)} \quad (16)$$

sendo, x_i a fração mássica retida na peneira de abertura d_i , e d_i^* o diâmetro médio aritmético entre a peneira de diâmetro d_i e d_{i+1} , calculado conforme Equação (17). Cabe destacar que, a peneira com diâmetro d_{i+1} é a peneira subsequente à peneira com diâmetro d_i , com $d_{i+1} > d_i$.

$$d_i^* = \frac{d_i + d_{i+1}}{2} \quad (17)$$

Para estimar a distribuição acumulativa da fração mássica das partículas de bagaço de malte foram utilizados cinco modelos matemáticos com o objetivo de identificar qual

deles melhor se ajustaria à distribuição da amostra em estudo. Os modelos e as respectivas equações estão indicados na Tabela 1.

Tabela 1 – Modelos Matemáticos da Distribuição Acumulativa da Fração Mássica das Partículas.

Nº do Modelo	Nome do Modelo	Equação	Referência
I	Sigmoid	$y = \frac{1}{1 + \left(\frac{D_{50}}{d_i^*}\right)^m}$	Massarani (2002)
II	Log-normal	$y = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left[\frac{\ln \left(\frac{d_i^*}{D_{50}} \right)}{\sqrt{2} \ln \sigma} \right] \right]$	Peçanha (2014)
III	Rosin, Rammler and Bennett (RRB)	$y = 1 - \exp \left[- \left(\frac{d_i^*}{D_{63,2}} \right)^n \right]$	Peçanha (2014)
IV	Gates, Gaudin and Schumann (GGS)	$y = \left(\frac{d_i^*}{D_{100}} \right)^m$	Peçanha (2014)

sendo D_{50} , $D_{63,2}$ e D_{100} os diâmetros nos quais 50%, 63,2% e 100% das partículas estão abaixo deles, respectivamente, m e n parâmetros adimensionais sem significado físico, σ um parâmetro que representa o desvio-padrão geométrico, e y a fração acumulada dos diâmetros menores que d_i^* .

3.3.2 Massa Específica

Neste trabalho foram determinadas as massas específicas real, aparente e *bulk* das partículas de bagaço de malte. Vale ressaltar que a massa específica aparente das partículas foi determinada por dois métodos diferentes para comparação.

3.3.2.1 Massa Específica Aparente (ρ_p) – solvente hexano

A massa específica aparente das partículas (ρ_p) foi determinada por picnometria líquida utilizando hexano P.A. (ρ_{hexano} igual a 0,665 g mL⁻¹) na temperatura de 24±2 °C, com um picnômetro de volume nominal 100 mL. Inicialmente, foi feita a calibração do

picnômetro com o objetivo de determinar o volume real da vidraria ($V_{\text{real pic.}}$). Para isso, foi pesada a massa do picnômetro vazio ($m_{\text{pic.}}$) e, em seguida, foi adicionado o solvente até completar o volume total do picnômetro, sendo a massa novamente medida ($m_{\text{pic.+hexano}}$). A partir da Equação (18), foi calculado o volume real do picnômetro utilizado ($V_{\text{real pic.}}$).

$$V_{\text{real pic.}} = \frac{m_{\text{pic.+hexano}} - m_{\text{pic.}}}{\rho_{\text{hexano}}} \quad (18)$$

Posteriormente, foi adicionada uma massa de amostra (m_p) calculada pela Equação (19), a qual foi preparada conforme indicado no item 3.3.1.

$$m_p = m_{\text{pic.+amostra}} - m_{\text{pic.}} \quad (19)$$

sendo $m_{\text{pic.+amostra}}$ a massa do picnômetro + amostra.

Em seguida, foi adicionada uma quantidade de solvente ($m_{\text{solv. umid.}}$), de acordo com a Equação (20), para fazer a umidificação da amostra. Esse processo foi feito para assegurar que os poros das partículas fossem preenchidos, e assim durante a picnometria, o volume de hexano medido (V_{hexano}) correspondesse ao volume ocupado entre as paredes da vidraria e a superfície das partículas.

$$m_{\text{solv. umid.}} = m_{\text{pic.+amo.+umid.}} - m_{\text{pic.+amostra}} \quad (20)$$

sendo, $m_{\text{pic.+amo.+umid.}}$ a massa do picnômetro + amostra + solvente de umidificação. Após a umidificação, foi completado o volume da vidraria com hexano, cuja massa (m_{hexano}) foi calculada pela Equação (21).

$$m_{\text{hexano}} = m_{\text{pic.+amo.+umid.+he.}} - m_{\text{pic.+amo.+umid.}} \quad (21)$$

sendo, $m_{\text{pic.+amo.+umid.+he.}}$ a massa do picnômetro + amostra + solvente de umidificação + hexano.

Assim, a partir da Equação (22), foi possível determinar o volume de hexano (V_{hexano}) que completou o picnômetro, e a partir do volume de hexano (V_{hexano}) e do

volume real do picnômetro ($V_{\text{real pic.}}$), foi possível calcular o volume do sólido (V_p) utilizando a Equação (23) e, com isso, determinar a massa específica aparente das partículas (ρ_p) em kg m^{-3} , por meio da Equação (24).

$$V_{\text{hexano}} = \frac{m_{\text{hexano}}}{\rho_{\text{hexano}}} \quad (22)$$

$$V_p = V_{\text{real pic.}} - V_{\text{hexano}} \quad (23)$$

$$\rho_p = \left(\frac{m_p}{V_p} \right) 1000 \quad (24)$$

Vale destacar que as massas foram medidas e calculadas em gramas e os volumes calculados em mililitros.

3.3.2.2 Massa Específica Aparente (ρ_p) – solvente querosene

O método utilizado para determinar a massa específica aparente (ρ_p) a partir do solvente querosene ($\rho_{\text{querosene}}$ igual a $0,785 \text{ g mL}^{-1}$), na temperatura de $28 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, com um picnômetro de volume nominal 50 mL, foi adaptado de Rasul et al. (1999). Inicialmente, 16 g de bagaço seco foram colocados imersos em uma coluna de água por 24 h, submetidos a uma pressão hidrostática de aproximadamente 14 kPa. Após este período, a água foi drenada e foi removida a maior parte da água externa à biomassa. Em seguida, para a remoção da água superficial do bagaço ainda em excesso foi utilizado papel.

Posteriormente, foi feita a calibração do picnômetro com o objetivo de determinar o volume real da vidraria ($V_{\text{real pic.}}$). Para isso, foi pesada a massa do picnômetro vazio ($m_{\text{pic.}}$), em seguida foi adicionado o solvente até completar o volume total do picnômetro e, então, foi medida a massa novamente ($m_{\text{pic.+que}}$). A partir da Equação (25), foi calculado o volume real do picnômetro utilizado ($V_{\text{real pic.}}$).

$$V_{\text{real pic.}} = \frac{m_{\text{pic.+que}} - m_{\text{pic.}}}{\rho_{\text{querosene}}} \quad (25)$$

Em seguida, aproximadamente, 11,5 g de bagaço úmido foram adicionados no picnômetro, sendo que a massa total foi denominada $m_{\text{pic.+amostra}}$. O volume da vidraria foi completado com querosene, cuja massa ($m_{\text{querosene}}$) foi calculada pela Equação (26).

$$m_{\text{querosene}} = m_{\text{pic.+amostra+querosene}} - m_{\text{pic.+amostra}} \quad (26)$$

sendo, $m_{\text{pic.+amostra+querosene}}$ a massa do picnômetro + amostra + querosene.

Após a picnometria, a massa de bagaço úmido foi transferida para uma placa de Petri e foi deixada na estufa a 105 ± 3 °C por 24 horas. Ao final deste período, a massa de bagaço de malte seca foi medida (m_p).

Assim, a partir da Equação (27), foi possível determinar o volume de querosene ($V_{\text{querosene}}$) que completou o picnômetro, e a partir do volume de querosene ($V_{\text{querosene}}$) e do volume real do picnômetro ($V_{\text{real pic.}}$), foi possível calcular o volume do sólido (V_p) utilizando a Equação (28) e, com isso, determinar a massa específica aparente das partículas (ρ_p) em kg m^{-3} , por meio da Equação (24).

$$V_{\text{querosene}} = \frac{m_{\text{querosene}}}{\rho_{\text{querosene}}} \quad (27)$$

$$V_p = V_{\text{real pic.}} - V_{\text{querosene}} \quad (28)$$

Vale destacar que foram utilizados dois métodos para a determinação da massa específica aparente do bagaço de malte, pois o método convencional da picnometria utilizado por Sousa et al. (2024), indicou resultados inconsistentes. Isto porque ao adicionar o solvente, ele penetrava os poros do material, fazendo com que a medida se tornasse incorreta. Além disso, foram selecionados solventes com densidades inferiores à da água para facilitar a decantação do material durante a picnometria. Tendo em vista que se o material emergisse, uma parte da massa de biomassa poderia ser perdida, comprometendo os resultados obtidos.

3.3.2.3 Massa Específica *Bulk* Compactada (ρ_b)

A massa específica *bulk* compactada do conjunto de partículas (ρ_b) foi determinada utilizando uma proveta de 1000 mL (V_b). De início, foi pesada a massa da

proveta vazia ($m_{\text{prov.}}$) e, então, foi introduzida uma quantidade de amostra (preparada no item 3.3.1) que completasse o volume total da vidraria. Em seguida, foi iniciada a compactação do material a partir de batidas executadas mecanicamente sobre uma superfície rígida, sendo que à medida que o material era compactado, o volume ocupado dentro da proveta era reduzido (inferior a 1000 mL). Quando se notava que não ocorria mais a compactação das partículas, as batidas eram interrompidas para que se pudesse adicionar mais biomassa até a marca de 1000 mL. Então, continuavam as batidas até que houvesse uma quantidade de amostra dentro da proveta que mesmo com as batidas, o volume permanecesse constante, igual a 1000 mL. Neste momento, a massa total foi medida ($m_{\text{prov.+amostra}}$), e a partir da massa final de amostra (m_b), foi possível calcular a massa específica *bulk* compactada (ρ_b) em kg m^{-3} , de acordo com a Equação (29). Cabe destacar que as massas foram medidas em gramas.

$$\rho_b = \left(\frac{m_{\text{prov.+amostra}} - m_{\text{prov.}}}{V_b} \right) 1000 = \left(\frac{m_b}{V_b} \right) 1000 \quad (29)$$

3.3.2.4 Massa Específica Real (ρ_r)

A massa específica real das partículas (ρ_r) em kg m^{-3} foi determinada utilizando um picnômetro a gás hélio (marca Micromeritics, modelo Accupyc 1331, sensibilidade igual a 10^{-4}g/cm^3) que se encontra no Laboratório de Processos de Separação da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQU-UFU). A unidade possui dois tambores de igual volume, um corresponde à célula de referência e o outro à célula com a amostra, ambos pressurizados com gás. Na célula contendo a amostra, o gás hélio pressurizado difundiu no leito do material e nos poros das partículas. Então, o volume total das partículas (V_r) foi calculado usando a medida de diferença de pressão entre os dois tambores, baseado na lei dos gases ideais. As medidas foram repetidas cinco vezes para demonstrar a reprodutibilidade dos resultados.

Cabe destacar que o volume total das partículas (V_r) compreende o volume do sólido (*particles' skeleton*) e dos possíveis poros fechados (*closed pores*). Isso porque a massa específica real calculada não é exatamente a “real”, pois se fosse, consideraria apenas o volume do sólido (V_s). Com isso, a massa específica real determinada pela Equação (30) é um valor entre a “real” e a aparente, o que pode ser explicado pelo fato de que na determinação da massa específica por picnometria a gás, o gás apenas pode

penetrar nos mesoporos (2-50 nm), e o acesso aos microporos (< 2 nm) e *closed pores* são limitados. Assim, o volume determinado com o picnômetro a gás inclui não apenas o volume de sólidos (V_s), como o de possíveis *closed pores* (V_{cp}).

$$\rho_r = \frac{m_r}{V_s + V_{cp}} = \frac{m_r}{V_r} \quad (30)$$

3.3.3 Porosidade da Partícula

A porosidade da partícula (ε_p) foi determinada a partir da relação entre as massas específicas aparente (ρ_p) e real (ρ_r), de acordo com a Equação (31).

$$\varepsilon_p = 1 - \frac{\rho_p}{\rho_r} \quad (31)$$

3.3.4 Formatos Característicos na Amostra

Dada a elevada heterogeneidade das partículas de bagaço de malte, um estudo foi conduzido para identificar os potenciais formatos característicos presentes na biomassa. A técnica de quarteamento foi utilizada para selecionar uma amostra representativa de bagaço de malte, a partir da separação do material, foram identificados 4 formatos característicos de partículas. Estes foram analisados por meio de um estereoscópio, cujas imagens estão representadas na Figura 9, e receberam denominações BSG1 a BSG4.

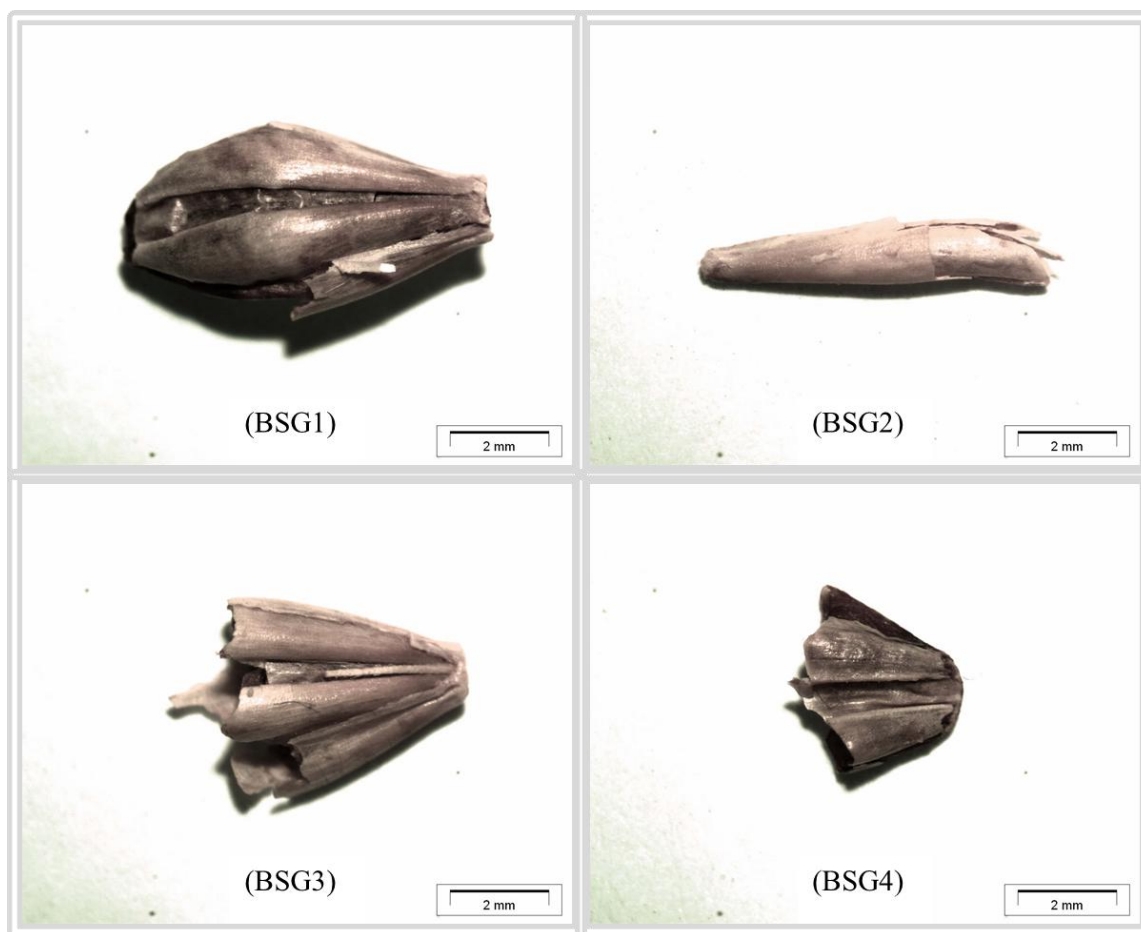
Foi determinada a porcentagem (em massa) de cada formato ($f_{\text{form.}}$) na amostra a partir da Equação (32).

$$f_{\text{form.}} = \left(\frac{m_{\text{form.}}}{m_{\text{amo.quar.}}} \right) 100 \quad (32)$$

sendo, $m_{\text{form.}}$ a massa de partículas com um dos 4 formatos característicos na amostra, e $m_{\text{amo.quar.}}$ a massa total de amostra selecionada após a técnica de quarteamento.

Além disso, foram determinadas as principais dimensões de cada formato característico na amostra a partir do processamento das imagens obtidas pelo estereoscópio por meio do *software* AnalySIS.

Figura 9 – Formatos Característicos na Amostra de Bagaço de Malte (BSG1, BSG2, BSG3, BSG4).



Fonte: Autoria própria.

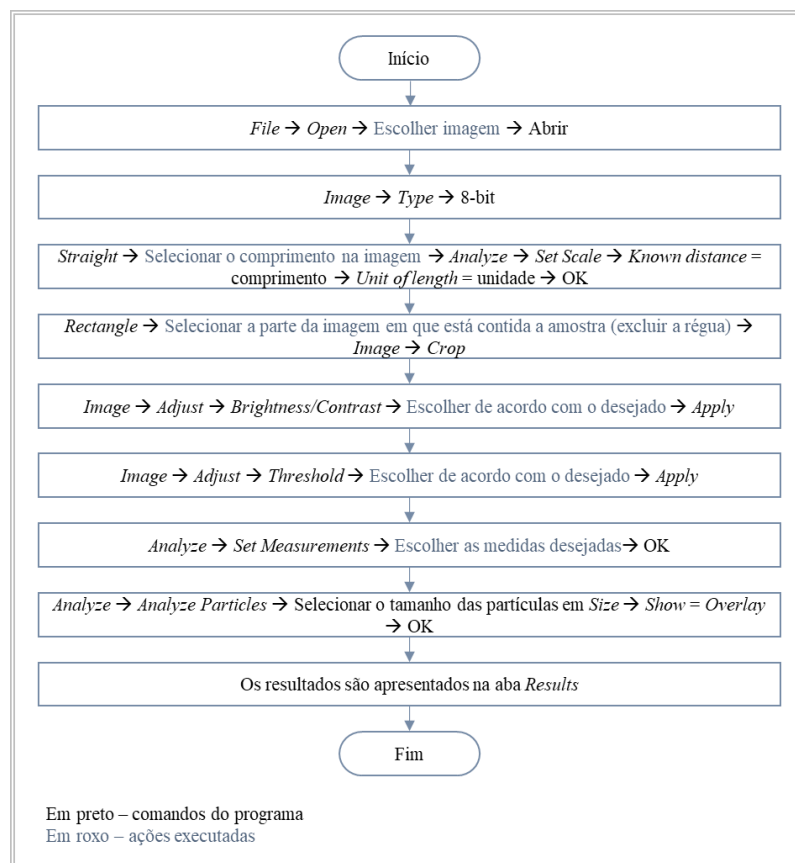
Por meio das imagens apresentadas na Figura 9 pode ser observado que a partícula do tipo BSG1 representa todo o grão, enquanto as partículas dos tipos BSG2, BSG3 e BSG4 correspondem a diferentes partes da casca. A partícula BSG2 possui uma seção mais alongada, a partícula BSG3 apresenta um formato triangular, com quase metade do tamanho da partícula BSG1, e a partícula BSG4 representa a ponta da casca, que corresponde, praticamente, a 1/3 da BSG1.

3.3.5 Dimensões e Características das Partículas usando o Software ImageJ

A análise de imagens a partir do *software* ImageJ (versão 1.53t, 2022, Institutos Nacionais da Saúde, EUA) foi empregada para caracterizar tanto a amostra como um todo, como cada formato característico, separadamente. Para isso, foram selecionados dois grupos principais de partículas, um representativo da amostra total e outro composto

pelos formatos característicos. As imagens digitais foram adquiridas por uma câmera digital (iPhone 11, câmera de 12 MP) e, em seguida, foi realizado o passo a passo descrito na Figura 10 para o processamento das imagens pelo *software* ImageJ. Assim foram obtidas as seguintes dimensões e características das partículas analisadas: A (*area*), P (*perimeter*), Ma (*major*), Mi (*minor*), An (*angle*), Cir (*circularity*), Fe (*feret*), FeX (*feretX*), FeY (*feretY*), FeAn (*feretAngle*), MinFe (*minFeret*), AR (*aspect ratio*), Ro (*round*) e So (*solidity*). As condições utilizadas para processar as imagens da biomassa em estudo estão apresentados na Tabela 2.

Figura 10 – Fluxograma do Procedimento utilizado para o Processamento das Imagens pelo *Software* ImageJ.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 2 – Parâmetros/comandos e condições utilizados para o processamento das imagens pelo *software* ImageJ.

Parâmetro/Comando	Condição
Selecionar o comprimento na imagem	Foi marcado 1 cm na régua
<i>Known distance</i> (comprimento)	1
<i>Unit of length</i> (unidade)	cm
<i>Brightness/Contrast</i> (brilho/contraste)	Foi escolhido o máximo contraste
<i>Threshold</i> (segmentação da imagem)	Não foi selecionado nenhum item e não foi feito nenhum ajuste
<i>Set Measurements</i> (escolher as medidas)	<i>Area, Shape descriptors, Perimeter, Fit ellipse, Feret's diameter</i>
	<i>Size</i> (área): 0,01-Infinity
<i>Analyze Particles</i> (analisar as partículas)	Selecionar <i>Display results, Clear results, Summarize, Include holes, Overlay</i>

Fonte: Autoria própria.

3.3.6 Esfericidade

Devido aos formatos característicos da amostra indicados no item 3.3.4, o bagaço de malte não pode ser associado a uma geometria regular (cilindro, paralelepípedo retângulo ou esferoide prolato), sendo caracterizado como uma partícula irregular. Dessa maneira, foram utilizadas duas correlações para a determinação da esfericidade das partículas (ψ), as quais estão indicadas nas Equações (33) e (34) (GOLDONI et al., 2015).

$$\psi = \frac{W}{L} \quad (33)$$

$$\psi = \frac{\sqrt{\frac{4A}{\pi}}}{d_{\text{Feret}}} \quad (34)$$

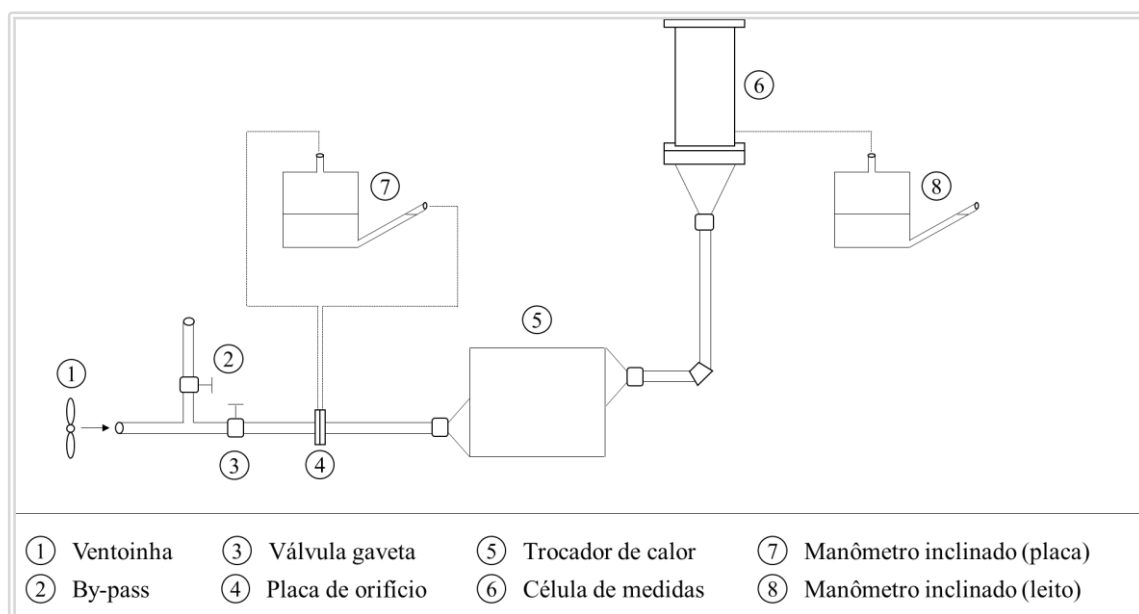
sendo que, as dimensões de largura (W), comprimento (L), área (A), e diâmetro máximo (d_{Feret}) foram obtidas pela análise de imagens utilizando o *software* ImageJ, como descrito no item 3.3.5. Cabe destacar que a esfericidade foi calculada tanto para a amostra

total, como para cada formato característico com o objetivo de comparar os resultados obtidos.

3.3.7 Permeabilidade

A permeabilidade do meio poroso (K) foi determinada a partir de um aparato experimental representado esquematicamente na Figura 11. Durante o experimento, foram registradas as medidas de queda de pressão (ΔP) em função da velocidade do fluido (q), no caso, ar ambiente.

Figura 11 – Aparato Utilizado para a Determinação da Permeabilidade da Biomassa.



Fonte: Autoria própria.

Para o cálculo da permeabilidade foi utilizada a Equação de Forchheimer, indicada pela Equação (35). Para isso, a Equação (35) foi integrada e considerada na condição de escoamento incompressível, o que resultou na Equação (36). Em seguida, a Equação (36) foi escrita na forma de uma equação linear, do tipo $y = ax + b$, representada pela Equação (37) e os termos da Equação de Forchheimer correspondentes à y , x , a e b foram indicados nas Equações (38), (39), (40) e (41), respectivamente. Os valores de queda de pressão do fluido e velocidade determinados experimentalmente foram substituídos nas Equações (38) e (39), para o cálculo de y e x , respectivamente. Então, cada par (y , x) foi plotado em um gráfico para a obtenção de uma reta para a definição dos valores de a e b ,

coeficiente angular e linear, respectivamente. A partir de a e b , e utilizando as Equações (40) e (41), foram calculados o parâmetro adimensional (c) e a permeabilidade (K), respectivamente.

$$\frac{-dP}{dz} = \left(\frac{\mu_f}{K} q\right) + \left[\left(\frac{c\rho_f}{\sqrt{K}}\right) q^2\right] \quad (35)$$

$$\frac{-\Delta P}{L} = \left(\frac{\mu_f}{K} q\right) + \left[\left(\frac{c\rho_f}{\sqrt{K}}\right) q^2\right] \quad (36)$$

$$\frac{-\Delta P}{Lq} = \frac{\mu_f}{K} + \left[\left(\frac{c\rho_f}{\sqrt{K}}\right) q\right] \quad (37)$$

$$y = \frac{-\Delta P}{Lq} \quad (38)$$

$$x = q \quad (39)$$

$$a = \frac{c\rho_f}{\sqrt{K}} \quad (40)$$

$$b = \frac{\mu_f}{K} \quad (41)$$

sendo, L o comprimento do leito de partículas de bagaço de malte em metros, μ_f a viscosidade dinâmica do fluido em Pa.s e ρ_f a massa específica do fluido em kg m⁻³.

Os valores experimentais obtidos para a permeabilidade e para o parâmetro adimensional foram comparados aos calculados a partir de correlações empíricas, as quais estão indicadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Correlações Empíricas para o Cálculo da Permeabilidade e do Parâmetro Adimensional.

Nº da Correlação	Equação	Condição	Referência
I	$K = \frac{(\psi d_{sv})^2 \varepsilon_b^3}{36\beta(1 - \varepsilon_b)^2}$	-	Massarani (2002)
II	$c = \frac{0,143}{\varepsilon_b^{3/2}}$	$10^{-10} \leq K \leq 10^{-8} [m^2]$ $0,35 \leq \varepsilon_b \leq 0,45$	Ergun (1952)
III	$c = \varepsilon_b^{-3/2} \left[\left(0,13 \left(\frac{K_0}{K} \right)^{0,37} + \left(0,10 \left(\frac{K_0}{K} \right)^{0,01} \right) \right]^{0,98}$	$K_0 = 10^{-10} [m^2]$ $10^{-13} \leq K \leq 10^{-7} [m^2]$ $0,10 \leq \varepsilon_b \leq 0,75$	Costa e Massarani (1982)

sendo ε_b a porosidade do leito, descrita no item 3.4.3 e K_0 uma permeabilidade de referência. O parâmetro β é um fator estrutural que está ligado à tortuosidade dos canais considerados na modelagem do escoamento, o qual pode ser calculado segundo a Equação de Happel representada na Equação (42) (D'ÁVILA e FILHO, 1980).

$$\beta = \frac{\varepsilon_b^3 \left[1 + \frac{2}{3} (1 - \varepsilon_b)^{5/3} \right]}{2(1 - \varepsilon_b) \left[1 - \frac{3}{2} (1 - \varepsilon_b)^{1/3} + \frac{3}{2} (1 - \varepsilon_b)^{5/3} - (1 - \varepsilon_b)^2 \right]} \quad (42)$$

3.3.8 Coeficiente de Arraste

Para a determinação do coeficiente de arraste (C_d), foi utilizado o mesmo experimento empregado na definição da permeabilidade do meio poroso. Então, as medidas de queda de pressão e velocidade do leito foram registradas, e para o caso do coeficiente de arraste, o valor de interesse seria o par $(\Delta P, q)$ para o qual q fosse a velocidade de mínima fluidização (q_{mf}). A partir da Equação (43), foi calculado o coeficiente de arraste experimental.

$$C_d = \frac{4}{3} d_{sv} \frac{(\rho_p - \rho_f)g}{\rho_f q_{mf}^2} \quad (43)$$

em que g é a aceleração da gravidade, igual a $9,8 \text{ m s}^{-2}$.

O valor experimental obtido para o coeficiente de arraste foi comparado aos calculados a partir de correlações empíricas para partículas esféricas, as quais estão indicadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Correlações Empíricas para o Cálculo do Coeficiente de Arraste.

Nº da Correlação	Equação	Condição	Referência
I	$C_d = \frac{24}{Re_p}$	$Re_p < 0,4$ (Regime de Stokes)	Kunii e Levenspiel (1991)
II	$C_d = \frac{10}{\sqrt{Re_p}}$	$0,4 < Re_p < 500$ (Regime Intermediário)	
III	$C_d = 0,43$	$500 < Re_p < 200000$ (Regime de Newton)	
IV	$C_d = \frac{46,5}{Re_p} - \frac{116,67}{Re_p^2} + 0,6167$	$10 < Re_p < 100$	Morsi e Alexander (1972)
V	$C_d = \frac{98,33}{Re_p} - \frac{2778}{Re_p^2} + 0,3644$	$100 < Re_p < 1000$	

sendo Re_p , o número de Reynolds da partícula, definido segundo a Equação (44). Vale destacar que a velocidade de mínima fluidização (q_{mf}) foi considerada a velocidade terminal da partícula.

$$Re_p = \frac{\rho_f q_{mf} d_{sv}}{\mu_f} \quad (44)$$

3.3.9 Morfologia da Partícula

A análise da morfologia das partículas foi realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV, modelo LEO 1450VP, Carl Zeiss, Alemanha). Trata-se de uma técnica eficaz para análise precisa da forma, aparência da superfície e porosidade das amostras, devido à obtenção de imagens com alta ampliação e resolução. As imagens possuem uma característica virtual, pois o que é exibido na unidade do monitor é a transcodificação da energia emitida por elétrons, em vez de radiação luminosa. As observações no MEV foram realizadas com partículas de bagaço de malte colocadas em suportes de amostra e revestidas com ouro sob vácuo para garantir a visibilidade adequada das imagens (FENG

et al., 2024; TANNOUS et al., 2013). As micrografias de MEV foram obtidas com ampliações de 200×, 500× e 1000×.

3.4 Caracterização da Escoabilidade

A caracterização da escoabilidade da biomassa em estudo foi feita a partir da determinação da razão de Hausner (HR), do índice de compressibilidade de Carr (CCI), da porosidade do leito, e do ângulo de repouso (AOR).

3.4.1 Razão de Hausner (HR)

A razão de Hausner é uma medida da mudança relativa no volume *bulk* que ocorre quando um material é compactado do seu estado aerado (*loose*) para um estado mais comprimido (*tapped*), medindo a coesão dos materiais. Inicialmente foi adicionada uma quantidade de biomassa (m_b) que completasse o volume total da proveta (V_{Lb}). Em seguida, foram realizadas batidas com a proveta sobre uma superfície rígida, com intervalos de 5 em 5 batidas, e ao notar que o material não podia ser mais compactado, foi anotado o volume final (V_{Tb}). A partir disso, foram calculados a massa específica do leito no estado aerado (ρ_{Lb}) e a massa específica do leito no estado mais comprimido (ρ_{Tb}), de acordo com as Equações (45) e (46), respectivamente. A razão de Hausner (HR) foi determinada segundo a Equação (47).

$$\rho_{Lb} = \frac{m_b}{V_{Lb}} \quad (45)$$

$$\rho_{Tb} = \frac{m_b}{V_{Tb}} \quad (46)$$

$$HR = \frac{\rho_{Tb}}{\rho_{Lb}} \quad (47)$$

3.4.2 Índice de Compressibilidade de Carr (CCI)

De forma similar à razão de Hausner, o índice de compressibilidade de Carr (CCI) representa uma mudança na massa específica *bulk* compactada do material, da condição inicial aerada para um estado mais compactado, a partir da realização de ‘batidas’ de uma proveta contendo o material. Assim, a partir do mesmo experimento utilizado para a

determinação da razão de Hausner, pôde-se calcular o índice de compressibilidade de Carr, utilizando a Equação (48).

$$CCI = \left(1 - \frac{\rho_{Lb}}{\rho_{Tb}}\right) \times 100 \quad (48)$$

3.4.3 Porosidade do Leito

A porosidade do leito (ε_b) foi determinada a partir da massa específica aparente do material e da massa específica do leito (*bulk*), de acordo com a Equação (49). Para calcular a porosidade do leito no estado aerado, foi considerado $\rho_b = \rho_{Lb}$, e para determinar a porosidade do leito no estado compactado, foi admitido $\rho_b = \rho_{Tb}$.

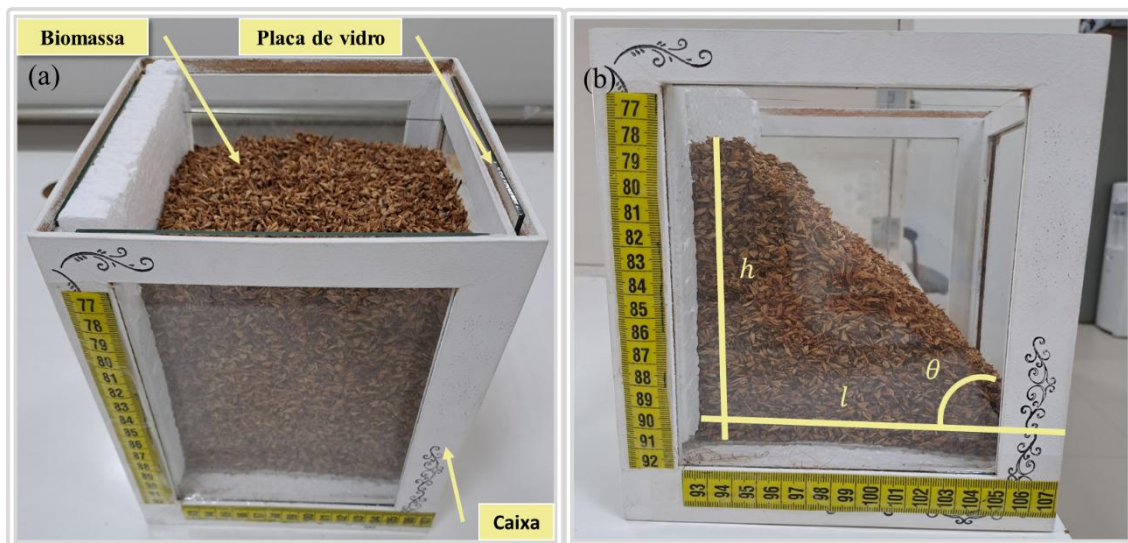
$$\varepsilon_b = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \quad (49)$$

3.4.4 Ângulo de Repouso (AOR)

O ângulo de repouso (AOR) das partículas de bagaço de malte foi determinado a partir do aparato indicado na Figura 12, formado por uma caixa, uma placa de vidro e uma fita métrica, cujas dimensões internas eram de 12,6 cm de largura, 16,3 cm de altura e 14,7 cm de comprimento. Uma massa de amostra de aproximadamente 0,7 g foi colocada dentro do aparato até atingir a altura total de 15 cm, conforme mostrado na Figura 12 (a). A placa de vidro foi erguida para cima e as partículas caíram pela ação da gravidade, formando uma pilha semicônica de partículas de biomassa, como representado na Figura 12 (b). Em seguida, as medidas de altura (h) e comprimento (l) foram lidas e o raio (θ) formado foi calculado, a partir da Equação (50). O ângulo de repouso foi medido seis vezes para verificar a reprodutibilidade dos resultados.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{h}{l} \right) \quad (50)$$

Figura 12 – Aparato usado para medir o ângulo de repouso: a) Antes do início do experimento; b) Após a realização do experimento.



Fonte: Autoria própria.

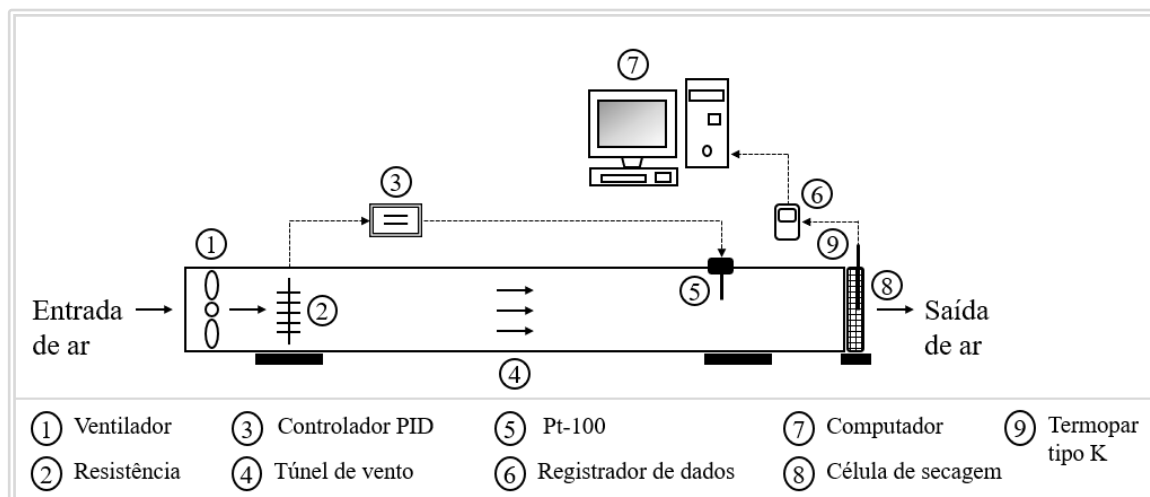
3.5 Secagem do Bagaço de Malte

O estudo da secagem do bagaço de malte foi realizado a partir da análise do comportamento da umidade em base seca ($X_{b,s}$) e da temperatura do material (T) ao longo do tempo. Para os experimentos foi utilizado um secador do tipo túnel de escala laboratorial (comprimento de 1,2 m e diâmetro interno de 0,1 m) considerando uma camada fina de bagaço de malte. Sendo que o conceito de camada fina pressupõe que as partículas estão perfeitamente misturadas de tal forma que a temperatura e a umidade são as mesmas em qualquer posição do meio poroso a cada instante de tempo durante o processo de secagem. Além disso, pode ser considerado que as variações de temperatura e do conteúdo umidade das partículas com o tempo são mais significativas do que com o espaço.

A representação esquemática da unidade de secagem está indicada na Figura 13. Uma massa de 279 g do bagaço foi pesada e colocada em uma célula circular (diâmetro de 15 cm e espessura de 3 cm), como indicado na Figura 14. O sistema foi energizado, e o ar de secagem fornecido por um ventilador (1) associado em série com um conjunto de resistências elétricas circulares (2) conectadas a um controlador de temperatura (3) (Contemp, ETC46). O controlador estava ligado a um sensor de temperatura Pt-100 (5) para manter a temperatura na condição experimental, 40 °C. Para todas as condições experimentais, a velocidade foi mantida em aproximadamente $1,8 \text{ m s}^{-1}$, aferida com a

ajuda de um termo anemômetro. A partir do momento em que o equilíbrio térmico foi atingido no interior do túnel (4), a célula (8) foi posicionada na saída do secador, como mostrado na Figura 13. A massa da amostra na célula ($m_{(t)}$) foi aferida em intervalos de 5 min até a primeira hora, de 10 min até a segunda hora, e de 20 min a partir da segunda hora. O experimento foi realizado até o momento no qual a massa da célula deixou de variar. Por fim, a amostra foi deixada na estufa a $105 \pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ por 24 horas e, com isso, foi determinada a massa de sólido seco (m_{ss}). O procedimento foi repetido para outras condições experimentais, temperatura do ar igual a $45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$, e cada uma das condições foi realizada em duplicata. Para todos os experimentos, a umidade relativa do ar ambiente e a umidade do ar de secagem foram determinadas a partir de um termo-higrômetro (Politerm, acurácia $\pm 2,0\%$ e resolução $0,01\%$ e $0,01 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

Figura 13 – Unidade Experimental Utilizada para a Secagem da Biomassa.



Fonte: Autoria própria.

Figura 14 – Célula com Amostra de Bagaço Úmido.



Fonte: Autoria própria.

A umidade do bagaço de malte em cada instante de tempo foi determinada a partir da Equação (51), sendo $X_{b.s}$ a umidade em base seca do bagaço no tempo t em kg de água/kg de sólido seco, $m_{(t)}$ a massa de bagaço úmido no tempo t em kg, e m_{ss} a massa de bagaço seco em kg.

$$X_{b.s} = \frac{m_{(t)} - m_{ss}}{m_{ss}} \quad (51)$$

O mesmo procedimento utilizado no estudo da umidade do material foi empregado na análise da temperatura (T) do bagaço de malte ao longo do tempo durante a secagem. Porém, na etapa em que o equilíbrio térmico no túnel de vento foi atingido, antes do início do experimento, foi colocado um termopar do tipo K (9) acoplado na célula. O termopar foi conectado a um registrador de dados (6) (Akso, AK176) e a um computador (7), e foi feito o registro da temperatura do sólido úmido antes do início da secagem ($t = 0$ s). Após este registro, a célula foi posicionada na saída do secador dando início ao experimento. A medida da temperatura do material foi coletada em intervalos de 30 segundos, e a secagem foi realizada até o momento em que a temperatura do bagaço de malte atingiu a temperatura do ar de secagem. Esta metodologia foi repetida para outras condições experimentais, $T = 45$ °C e 50 °C, e cada uma das condições foi realizada em duplicata. Para todos os experimentos a umidade relativa do ar ambiente e a umidade do ar de secagem foram determinadas a partir de um termo-higrômetro (Politem, acurácia $\pm 2,0\%$ e resolução $0,01\%$ e $0,01$ °C).

4. Resultados e Discussões

Neste tópico serão apresentados os resultados e as discussões a respeito das caracterizações química, física e da escoabilidade da biomassa estudada.

4.1 Caracterização Química

Os resultados obtidos a partir da caracterização química da biomassa estudada foram: os teores de extrativos, celulose, hemicelulose, lignina (solúvel e insolúvel) e cinzas totais na amostra. Os valores encontrados para cada componente estão indicados na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultado da Análise Composicional do Bagaço de Malte.

Componente	Graus de Liberdade	Teor		
		Média [%]	Desvio Padrão [%]	Intervalo de Confiança de 95% [%]
Extrativos	2	15,99	2,33	10,20 - 21,78
Lignina	2	22,61	1,14	19,77 - 25,45
Celulose	2	18,63	0,59	17,17 - 20,08
Hemicelulose	2	18,90	2,35	13,06 - 24,73
Cinzas Totais	2	4,03	0,03	3,96 - 4,11

Fonte: Autoria própria.

Observa-se pelos resultados indicados na Tabela 5 que o bagaço de malte apresentou composição química dentro da faixa mostrada na literatura. O teor de celulose, igual a $18,63 \pm 0,59\%$, é próximo ao determinado por Wilkinson, Smart e Cook (2014), de $19,2 \pm 1,4\%$, e por Qin, Johansen e Mussatto (2018), de $20,56 \pm 0,62\%$. Já o teor de hemicelulose, de $18,90 \pm 2,35\%$, é similar ao obtido por Wilkinson, Smart e Cook (2014), de $18,4 \pm 3,7\%$, e próximo ao de Qin, Johansen e Mussatto (2018), de $25,97 \pm 0,58\%$. Com relação ao teor de lignina, igual a $22,61 \pm 1,14\%$, pode-se verificar que o valor ficou próximo ao de Qin, Johansen e Mussatto (2018), de $19,57 \pm 0,94\%$, porém diferente do determinado por Wilkinson, Smart e Cook (2014), de $9,9 \pm 1,4\%$. Para o teor de extrativos, o valor determinado experimentalmente, de $15,99 \pm 1,90\%$, ficou distante de Qin, Johansen e Mussatto (2018) e Wilkinson, Smart e Cook (2014), cujos valores foram iguais a $5,30 \pm 0,18\%$ e $5,2 \pm 2,1\%$, respectivamente. Para as cinzas totais, o valor de $4,03 \pm 0,03\%$

ficou próximo ao de Qin, Johansen e Mussatto (2018) de $3,54 \pm 0,02\%$, e um pouco mais distante de Wilkinson, Smart e Cook (2014), de $2,7 \pm 0,07\%$.

As pequenas divergências encontradas podem ser justificadas pelos diferentes tipos e características químicas do bagaço de malte e de receitas de cervejarias e, também, pelas diversas metodologias utilizadas na determinação dos componentes. Além disso, devem ser levados em consideração os erros experimentais durante a realização dos experimentos. Uma outra ponderação que deve ser feita é que a soma das frações mássicas foi igual a 80,16%, sendo que a porcentagem restante pode ter sido uma fração de amido que não pode ser lida no HPLC, por exemplo.

4.2 Caracterização Física

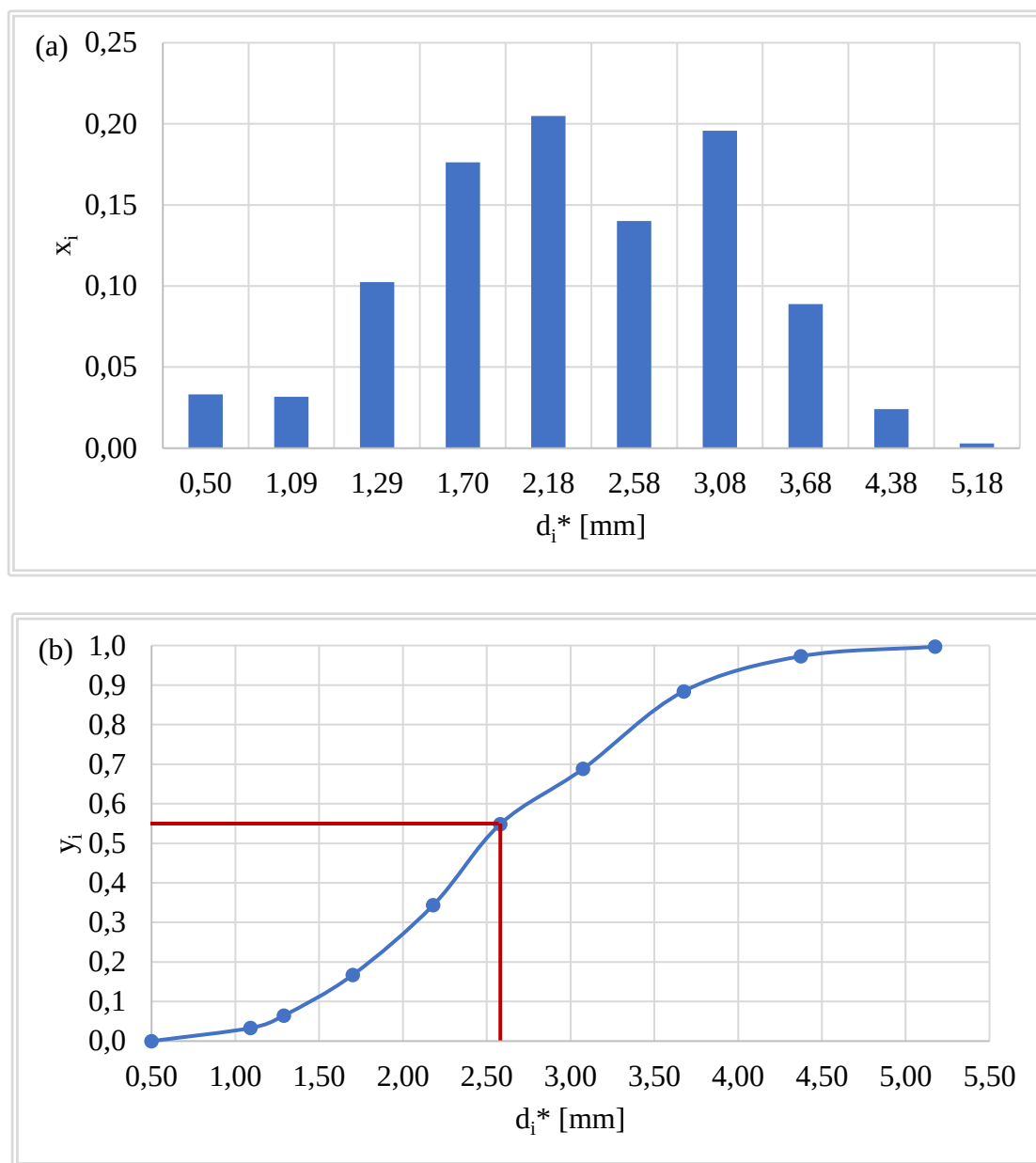
Os resultados obtidos a partir da caracterização física da biomassa estudada foram: o tamanho e a distribuição granulométrica, as massas específicas real, aparente e *bulk* compactada, a porosidade da partícula, os formatos característicos na amostra, as dimensões e características das partículas por análise de imagens, a esfericidade, a permeabilidade e o coeficiente de arraste.

4.2.1 Tamanho e Distribuição Granulométrica

A Figura 15 (a) e (b) apresenta os gráficos de fração mássica (x_i) e fração acumulada (y) em função do diâmetro médio aritmético entre as peneiras (d_i^*), respectivamente.

Pode-se observar a partir da Figura 15 (a) que dentre os 10 diâmetros analisados, quatro deles, que seriam 1,70; 2,18; 2,58 e 3,08 mm, representam aproximadamente 72 % em massa da amostra. Isto justifica o fato do diâmetro médio da amostra, calculado através do diâmetro de Sauter, igual a 1,92 mm, estar dentre esses diâmetros mais representativos do material. A Figura 15 (b) também explica esse dado, tendo em vista que cerca de 50% da massa é correspondente a diâmetros inferiores a 2,50 mm, o que está representado pela linha vermelha. Rocha et al. (2020) encontraram como diâmetro médio de Sauter para o bagaço de malte o valor de 2,14 mm, similar ao determinado neste trabalho.

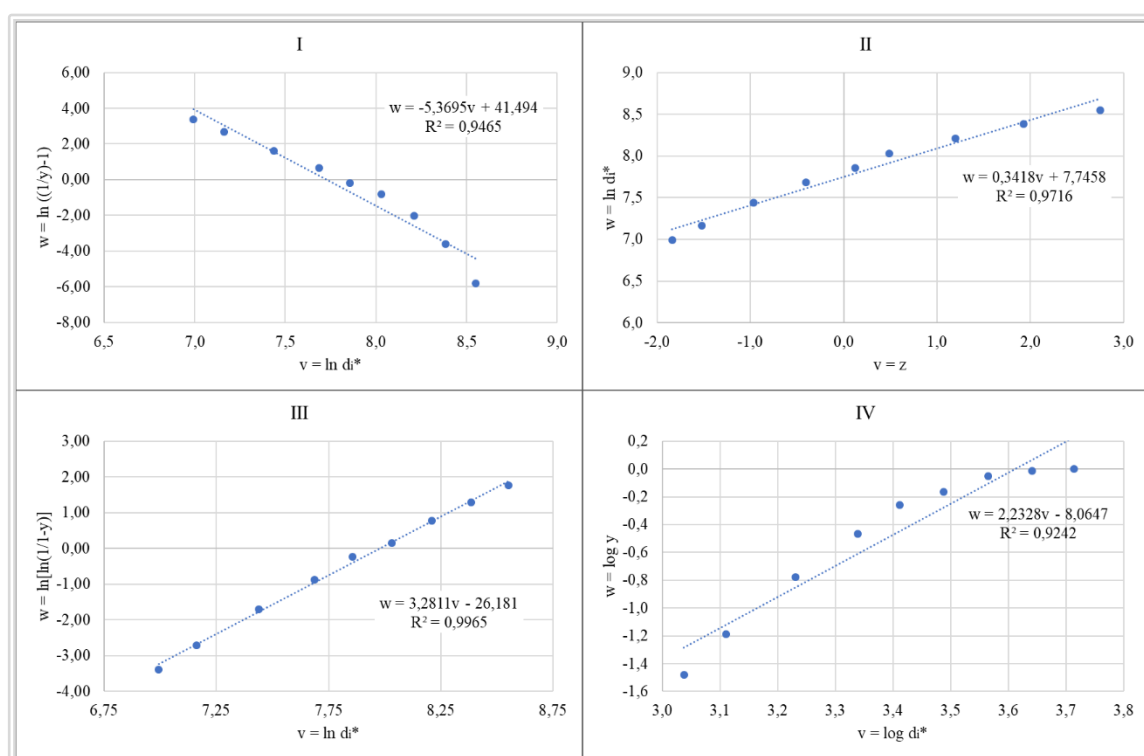
Figura 15 – a) Gráfico da Fração Mássica em Função do Diâmetro; b) Gráfico da Fração Acumulada em Função do Diâmetro.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 16 apresenta os ajustes dos modelos matemáticos para a distribuição acumulativa, e o que se pode notar é que o modelo de número III, de Rosin, Rammler and Bennett (RRB), foi o que melhor se ajustou aos dados, com $R^2 = 0,9965$. Assim, com base no coeficiente de determinação, a ordem dos modelos com melhores ajustes foi III, II, I e IV, respectivamente. Nota-se que, embora o modelo III melhor represente a distribuição granulométrica da amostra de bagaço de malte, os demais modelos também apresentaram um ajuste significativo aos dados, com $R^2 > 0,9$.

Figura 16 – Ajuste dos Modelos Matemáticos da Distribuição Acumulativa.



Fonte: Autoria própria.

4.2.2 Massa Específica

Os valores obtidos para as massas específicas *bulk* compactada (ρ_b), real (ρ_r) e aparente (ρ_p) empregando hexano e querosene, estão indicados nas Tabelas 6, 7, 8 e 9, respectivamente. Na determinação das massas específicas *bulk* compactada e aparente com hexano os valores foram obtidos para toda a faixa de diâmetros estudada, enquanto que na determinação das massas específicas real e aparente com querosene, a análise foi feita para a amostra total e para apenas alguns diâmetros, respectivamente.

Conforme esperado para a biomassa, a massa específica real é superior à aparente, a qual é superior à *bulk* compactada. Esse fato pode ser explicado ao se observar as Equações (24), (25) e (26), nas quais a principal mudança entre elas está relacionada ao volume considerado.

Como mostrado na Tabela 7, para a determinação da massa específica real foram realizados 5 experimentos, cujo valor médio foi de 1327,8 kg/m³ e desvio de 3,7 kg/m³. A massa específica aparente foi determinada por dois diferentes métodos devido à imprecisão observada na técnica de medição, e pode-se observar em ambos os casos que

não houve uma correlação direta entre os diâmetros das partículas e os valores de massa específica determinados, como indicados nas Tabelas 8 e 9. Comportamento diferente foi notado para outras biomassas, como a cana de açúcar, em que há uma tendência na diminuição da massa específica com o aumento do diâmetro, de acordo com Pérez (2018). Esse tipo de relação não foi observada para o bagaço de malte, o que pode ser atribuído à pequena diferença entre os diâmetros, à irregularidade no formato das partículas e à dificuldade de caracterização do material por peneiramento devido à sua morfologia não esférica. Como indicado na Tabela 6, para a massa específica *bulk* compactada, é possível observar uma relação entre os diâmetros e a massa específica determinada. Assim, verifica-se que há uma tendência de menores valores de massa específica *bulk* compactada para maiores diâmetros devido ao formato das partículas, isso porque para um mesmo volume, a massa de material ‘empacotada’ é menor para as partículas com diâmetros maiores.

Barrozo et al. (2019) também determinaram a densidade real para o bagaço de malte, cujo valor foi de $1386 \pm 4 \text{ kg m}^{-3}$, próximo ao valor obtido no presente estudo. Entretanto, a densidade aparente foi igual a $828 \pm 69 \text{ kg m}^{-3}$, diferente dos valores mostrados nas Tabelas 8 e 9, o que pode ser justificado pelo método experimental distinto utilizado. Estudos na literatura determinaram a densidade de partículas para outros tipos de biomassa, com valores mais semelhantes aos resultados do bagaço de malte neste trabalho. Sohni et al. (2018) determinaram a densidade aparente para folha de dendê e casca de arroz, cujos valores foram de $231 \pm 18,75 \text{ kg m}^{-3}$ e $328 \pm 7,60 \text{ kg m}^{-3}$, respectivamente. Pérez et al. (2018) mediram a densidade aparente para bagaço de cana-de-açúcar e os valores obtidos ficaram na faixa de $465,9 - 605,2 \text{ kg m}^{-3}$.

Tabela 6 - Massa Específica *Bulk* Compactada em Função do Diâmetro da Partícula.

d_i^* [mm]	ρ_b [kg/m ³]
0,50	300,4
1,09	256,5
1,29	257,6
1,70	231,1
2,18	231,8
2,58	221,7
3,08	223,6
3,68	213,4
4,38	199,6
5,18	164,0

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7 – Massa Específica Real para a Amostra Total.

Amostra	Graus de Liberdade	ρ_r [kg/m ³]	Desvio ρ_r [kg/m ³]	Intervalo de Confiança de 95 % [kg/m ³]
Total	4	1327,8	3,7	1323,2 - 1332,4

Fonte: Autoria própria.

Tabela 8 – Massa Específica Aparente em Função do Diâmetro da Partícula (Solvente Hexano)

d_i^* [mm]	Graus de Liberdade	ρ_p [kg/m ³]	Desvio padrão ρ_p [kg/m ³]	Intervalo de Confiança de 95 % [kg/m ³]
0,50	1	422,0	7,4	355,5 - 488,5
1,00	4	446,7	40,6	396,3 - 497,1
1,18	1	443,3	20,0	263,6 - 623,0
1,40	1	458,3	10,6	363,1 - 553,5
2,00	2	460,4	5,0	448,0 - 472,8
2,36	3	433,9	36,2	376,3 - 491,5
2,80	3	451,5	38,4	390,4 - 512,6
3,35	1	430,3	5,0	385,4 - 475,2
4,00	1	401,8	2,4	380,2 - 423,4
4,75	1	402,1	2,9	376,0 - 428,2

Fonte: Autoria própria.

Tabela 9 – Massa Específica Aparente em Função do Diâmetro da Partícula (Solvente Querosene)

d_i^* [mm]	Graus de Liberdade	ρ_p [kg/m ³]	Desvio padrão ρ_p [kg/m ³]	Intervalo de Confiança de 95 % [kg/m ³]
0,50	4	256,81	18,58	233,71 - 279,91
1,29	4	283,87	2,91	280,25 - 287,49
1,70	4	286,15	4,88	280,06 - 292,24
2,18	4	303,52	10,51	290,46 - 316,58
2,58	4	304,79	7,24	295,82 - 313,76
3,08	4	300,77	9,15	289,4 - 312,14

Fonte: Autoria própria.

4.2.3 Porosidade da Partícula

O valor da porosidade da partícula de bagaço de malte (ε_p) foi obtido considerando a amostra total. Para isso, os valores de ρ_p e ρ_r indicados na Tabela 10 foram utilizados na Equação (27) na determinação de ε_p , cujo valor encontrado foi de 0,67.

Tabela 10 – Resultado da Porosidade da Partícula.

Amostra	ρ_r [kg/m ³]	ρ_p [kg/m ³]	ε_p [-]
Total	1327,8	435,0	0,67

Fonte: Autoria própria.

Este valor pode ser comparado ao de outras biomassas. Por exemplo, segundo o trabalho de Pérez (2018), a porosidade média do bagaço de cana de açúcar é igual a 0,69, valor próximo ao encontrado para o bagaço de malte. Para a casca de arroz, de acordo com Chabannes et al. (2017), a porosidade é de 0,54 – 0,64. Outras biomassas, como o resíduo de tabaco, o bagaço de sorgo, o bagaço da fibra do sorgo, e a casca de soja têm porosidades inferiores ao bagaço de malte, iguais a 0,48, 0,41, 0,33 e 0,24, respectivamente, calculadas a partir do trabalho de Cardoso et al. (2013).

4.2.4 Formatos Característicos na Amostra

Foram realizados cinco experimentos para a determinação das porcentagens mássicas de cada um dos formatos característicos da amostra de bagaço de malte, e os

valores médios encontrados estão apresentados na Tabela 11. Os desvios apresentados nos experimentos podem ser justificados por erros provenientes da amostragem e, também, pela heterogeneidade da amostra de bagaço de malte. Pode-se observar que a partícula do tipo BSG4 foi a mais representativa na amostra contando com, aproximadamente, 54% da massa total, seguida das partículas do tipo BSG2 (20%), BSG3 (15%) e BSG1 (10%). Conforme mostrado no item 3.3.4, as partículas dos tipos BSG2, BSG3 e BSG4 representam diferentes partes da casca, totalizando cerca de 90% da massa total. A predominância da casca em relação ao grão inteiro (partícula BSG1) é justificada pelo processo produtivo da cerveja, como detalhado no item 2.2, no qual, durante a preparação do mosto, os grãos de malte são moídos de modo a romper a casca do grão e expor o conteúdo.

Tabela 11 - Representatividade dos 4 Formatos Característicos na Amostra.

Identificação do Formato da Amostra	Média das Porcentagens [%]	Desvio Padrão das Porcentagens [%]	Graus de Liberdade
BSG1	10%	1%	4
BSG3	15%	2%	4
BSG2	20%	4%	4
BSG4	54%	3%	4

Fonte: Autoria própria.

4.2.5 Análise Digital de Imagens

Foi realizada a análise de imagens pelo *software* ImageJ para a amostra total (100 partículas) e para cada um dos 4 formatos característicos, e os valores dos parâmetros analisados estão indicados nas Tabelas 12 e 13, sendo que para o caso da amostra total, estão apresentados os valores médios desses parâmetros em relação às 100 partículas. Porém, nas Tabelas 22 e 23 do APÊNDICE A podem ser consultados os valores referentes a cada uma das 100 partículas estudadas.

Tabela 12 – Resultado da Análise de Imagens através do *Software ImageJ - Area, Perimeter, Major, Minor, Angle, Circularity e Feret* (4 Formatos e Amostra Total).

Tipo de Partícula	Graus de Liberdade	Descrição do Dado	Medidas						
			A	P	Ma	Mi	An	Cir	Fe
BSG1	0	Valor	0,246	2,061	0,808	0,387	68,862	0,727	0,841
BSG2	0	Valor	0,095	1,711	0,750	0,161	95,911	0,406	0,777
BSG3	0	Valor	0,165	1,887	0,546	0,383	65,300	0,580	0,669
BSG4	0	Valor	0,088	1,266	0,369	0,303	92,214	0,689	0,406
Amostra Total	99	Média	0,129	1,656	0,589	0,274	85,967	0,573	0,646
		Desvio Padrão	0,059	0,357	0,141	0,091	53,388	0,138	0,147
		Intervalo de Confiança de 95%	0,117 a 0,141	1,585 a 1,727	0,561 a 0,617	0,256 a 0,292	75,370 a 96,560	0,546 a 0,600	0,617 a 0,675

sendo A (*area*), P (*perimeter*), Ma (*major*), Mi (*minor*), An (*angle*), Cir (*circularity*) e Fe (*feret*). Fonte: Autoria própria.

Tabela 13 - Resultado da Análise de Imagens através do *Software ImageJ - FeretX, FeretY, FeretAngle, MinFeret, AR, Round e Solidity* (4 Formatos e Amostra Total).

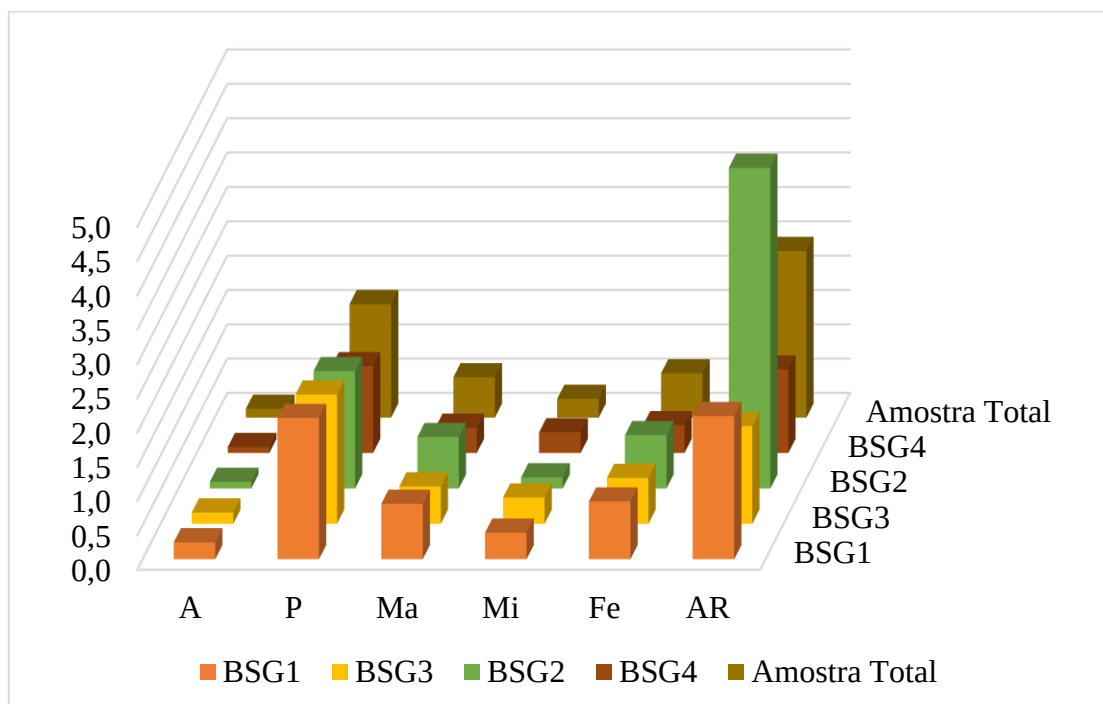
Tipo de Partícula	Graus de Liberdade	Descrição do Dado	Medidas						
			FeX	FeY	FeAn	MinFe	AR	Ro	So
BSG1	0	Valor	0,031	0,123	69,370	0,422	2,089	0,479	0,966
BSG3	0	Valor	0,041	0,427	59,172	0,444	1,425	0,702	0,865
BSG2	0	Valor	0,036	0,706	98,227	0,179	4,671	0,214	0,924
BSG4	0	Valor	0,047	0,974	117,150	0,315	1,218	0,821	0,911
Amostra Total	99	Média	0,590	0,482	86,546	0,312	2,429	0,486	0,864
		Desvio Padrão	0,353	0,285	51,657	0,096	1,126	0,182	0,058
		Intervalo de Confiança de 95%	0,520 a 0,660	0,425 a 0,539	76,300 a 96,800	0,293 a 0,331	2,206 a 2,652	0,450 a 0,522	0,852 a 0,876

sendo FeX (*feretX*), FeY (*feretY*), FeAn (*feretAngle*), MinFe (*minFeret*), AR (*aspect ratio*), Ro (*round*) e So (*solidity*). Fonte: Autoria própria.

Dentre as 14 variáveis analisadas, A, P, Ma, Mi, An, Cir, Fe, FeX, FeY, FeAn, MinFe, AR, Ro e So, pode-se fazer algumas considerações em relação a algumas delas para comparar os diferentes formatos e observar características da amostra total. Como pode ser observado pela Figura 17, no que se refere à área (*area*) da partícula, a do tipo

BSG1 apresentou o maior valor, visto que é a maior partícula dentre as 4, e a do tipo BSG4 o menor valor, representando a menor das partículas. Além disso, a mesma classificação dos tipos de partículas em ordem das áreas foi observada para o perímetro (*perimeter*).

Figura 17 – Parâmetros *Area*, *Perimeter*, *Major*, *Minor*, *Feret* e *AR* (4 Formatos e Amostra Total).



sendo A (*area*), P (*perimeter*), Ma (*major*), Mi (*minor*), Fe (*feret*) e AR (*aspect ratio*).
Fonte: Autoria própria.

Para as variáveis *major* e *minor*, que representariam o comprimento (*L*) e a largura das partículas (*W*), respectivamente, o que se pode verificar é que as partículas BSG1 e BSG2 apresentaram os maiores comprimentos, enquanto as partículas BSG1 e BSG3 ficam com as maiores larguras, e a relação entre esses dois parâmetros é mostrada pelo AR (ou ψ) na Equação (33). Pelos valores de AR indicados na Tabela 13 e na Figura 17, nota-se que a partícula do tipo BSG2 apresenta a menor proporção entre a largura e o comprimento, seguida da partícula BSG1, o que também pode ser verificado ao analisar as imagens da Figura 9.

Além disso, o parâmetro *Feret* indica o maior diâmetro da partícula, e o que se pode observar é que a mesma ordem dos tipos de partícula em relação ao parâmetro *major* foi encontrada para *Feret*, ambos representando comprimentos das partículas. Com

relação à amostra total são apresentados os valores médios dos parâmetros para as 100 partículas e o desvio padrão. Os valores de desvio padrão, por sua vez, são significativos em relação à média, por exemplo, para os parâmetros área e *AR* o desvio é, aproximadamente, a metade da média. Esse comportamento reflete a presença dos diferentes formatos na amostra total, mostrando a sua heterogeneidade quanto ao tamanho e forma.

O trabalho de Rezaei et al. (2016) também realiza a análise digital de imagens a partir do *software* ImageJ para dois tipos de partículas, *ground chip particles* e *ground pellet particles*, para diferentes diâmetros. Para a abertura de peneira de 3,2 mm para ambas as biomassas os valores de *Ma*, *Mi*, $1/AR$, *Cir* e *Ro* foram $4,95 \pm 1,46$ mm e $2,51 \pm 0,57$ mm, $1,03 \pm 0,30$ mm e $1,54 \pm 0,28$ mm, $0,22 \pm 0,09$ e $0,64 \pm 0,16$, $0,28 \pm 0,08$ e $0,40 \pm 0,13$, $0,25 \pm 0,09$ e $0,70 \pm 0,21$, respectivamente. O bagaço de malte apresentou valores similares às duas biomassas dependendo do parâmetro analisado.

4.2.6 Esfericidade

Os valores de esfericidade (ψ) calculados para a amostra total e para os 4 formatos característicos segundo as Equações (33) e (34) estão indicados nas Tabelas 14 e 15, respectivamente. A Tabela 14 mostra que quanto mais próximo o valor de *AR* (*aspect ratio*) de 1, maior é a esfericidade da partícula, visto que as dimensões *L* (comprimento) e *W* (largura) apresentam valores mais similares entre si. Analisando-se os dados da Tabela 15, pode-se observar que dentre os dois parâmetros utilizados no cálculo da esfericidade, a área é a que mais influencia no cálculo.

Tabela 14 – Esfericidade da Amostra Total e dos 4 Formatos conforme Equação (33).

Amostra	<i>AR</i> [-]	ψ [-]
Total	2,429	0,41
BSG1	2,089	0,48
BSG2	4,671	0,21
BSG3	1,425	0,70
BSG4	1,218	0,82

Fonte: Autoria própria.

Tabela 15 – Esfericidade da Amostra Total e dos 4 Formatos conforme Equação (34).

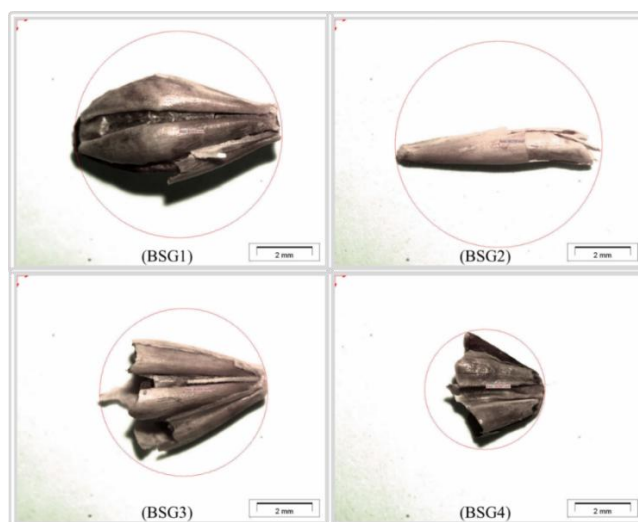
Amostra	A [cm²]	d_{Ferret} [cm]	ψ [-]
Total	0,129	0,646	0,63
BSG1	0,246	0,841	0,67
BSG2	0,095	0,777	0,45
BSG3	0,165	0,669	0,69
BSG4	0,088	0,406	0,82

Fonte: Autoria própria.

Pelos dados das Tabelas 14 e 15 pode-se perceber que a amostra apresenta uma grande heterogeneidade, visto que os valores da esfericidade para cada formato são distintos entre si e em comparação com a amostra total. Ambos os métodos de cálculo utilizados, indicados pelas Equações (33) e (34), mostraram a variação nos tipos de partículas presentes na amostra.

Pode-se perceber em relação aos formatos que a ordem dos tipos de partículas em relação à maior esfericidade é: BSG4 > BSG3 > BSG1 > BSG2, para ambos os métodos utilizados. Este comportamento pode ser observado pelas imagens dos tipos de partículas apresentadas na Figura 18. A partícula BSG4 é que mais se aproximada de uma partícula esférica em comparação às demais, e a partícula BSG2 é a mais alongada, que menos se assemelha a uma esfera.

Figura 18 – Comparação das Partículas BSG1, BSG2, BSG3, BSG4 em relação à Esfericidade (Circunferência Circunscrita).



Fonte: Autoria própria.

O que se pode notar é que o valor da esfericidade calculado para as partículas do tipo BSG4 foi igual para os dois métodos, e similar no caso das partículas BSG3, mas diferente para as partículas BSG1, BSG2 e para a amostra total. Uma justificativa seria o fato de que os dois métodos utilizam diferentes diâmetros para o cálculo da esfericidade, como as partículas BSG3 e BSG4 são as mais esféricas, espera-se que esses diâmetros apresentem valores mais próximos entre si.

De forma a comparar os dados com outras biomassas na literatura, Rezaei e Sokhansanj (2018) determinaram a esfericidade da casca de madeira triturada (*ground bark*) e de chips de madeira triturados (*ground wood*) pelo método apresentado na Equação (33) e obtiveram os valores de 0,61 e 0,22, respectivamente. O primeiro apresentou valor mais próximo ao obtido para o bagaço de malte, o que se justifica pelo fato do formato da biomassa ser mais semelhante à casca de madeira triturada em relação aos chips de madeira triturados.

4.2.7 Permeabilidade

Os valores do coeficiente de permeabilidade (K) e do parâmetro adimensional (c) experimentais e empíricos determinados estão apresentados na Tabela 16. Vale ressaltar que esses parâmetros foram obtidos para 3 diâmetros da amostra, e não para os 10 totais, visto que os ensaios de permeabilidade obtiveram melhores resultados para os diâmetros maiores 3,68, 4,38 e 5,18 mm. Para os diâmetros menores houve dificuldade na execução do experimento, o que pode estar relacionado à imprecisão na leitura dos manômetros para valores baixos de queda de pressão.

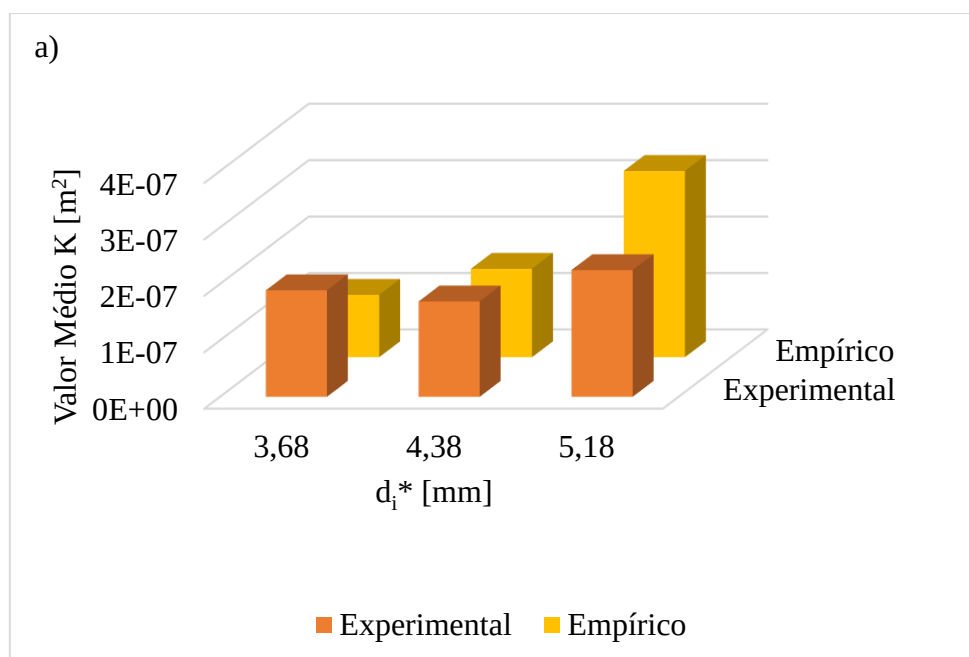
Tabela 16 – Resultados do Coeficiente de Permeabilidade e Parâmetro Adimensional.

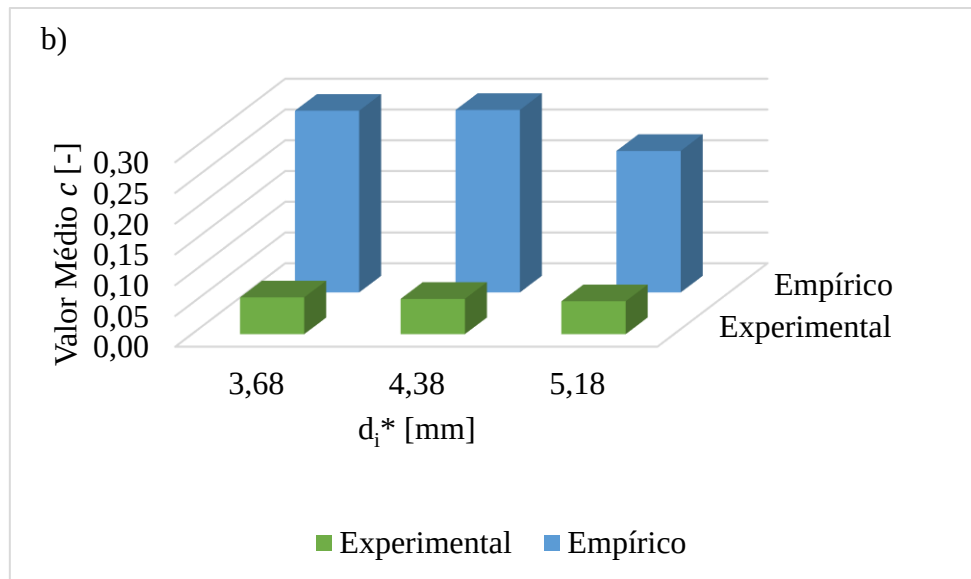
d_i^* [mm]	Tipo de Relação	Valor médio K [m ²]	Desvio padrão K [m ²]	Desvio Relativo K [%]
3,68	Experimental	$1,9 \times 10^{-7}$	$6,3 \times 10^{-8}$	-
	Empírico (I)	$1,1 \times 10^{-7}$	-	71,0
4,38	Experimental	$1,7 \times 10^{-7}$	$4,2 \times 10^{-9}$	-
	Empírico (I)	$1,6 \times 10^{-7}$	-	7,9
5,18	Experimental	$2,2 \times 10^{-7}$	$2,8 \times 10^{-8}$	-
	Empírico (I)	$3,3 \times 10^{-7}$	-	32,0

d_i^* [mm]	Tipo de Relação	Valor médio c [-]	Desvio padrão c [-]	Desvio Relativo c [%]
3,68	Experimental	0,06	0,03	-
	Empírico (III)	0,30	0,00	79,8
4,38	Experimental	0,06	0,00	-
	Empírico (III)	0,30	0,00	80,7
5,18	Experimental	0,05	0,01	-
	Empírico (III)	0,23	0,00	76,8

Fonte: Autoria própria.

Figura 19 – Resultados do Coeficiente de Permeabilidade e do Parâmetro Adimensional: a) d_i^* x Tipo de Relação x K ; b) d_i^* x Tipo de Relação x c .

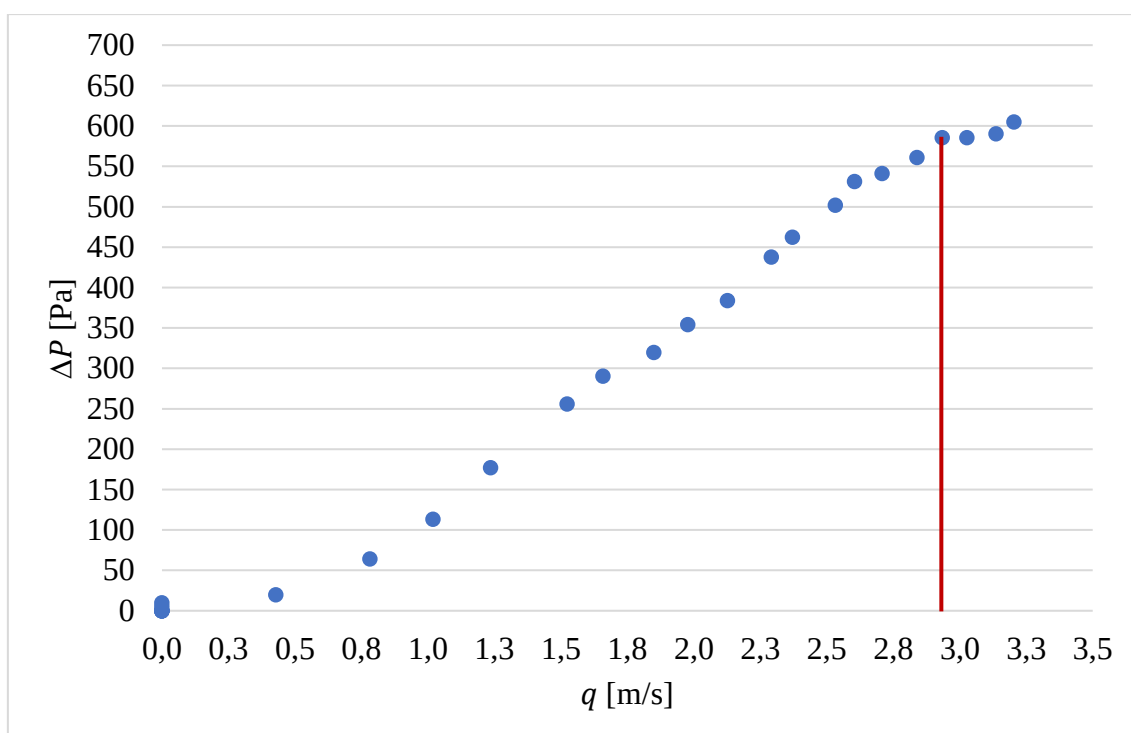
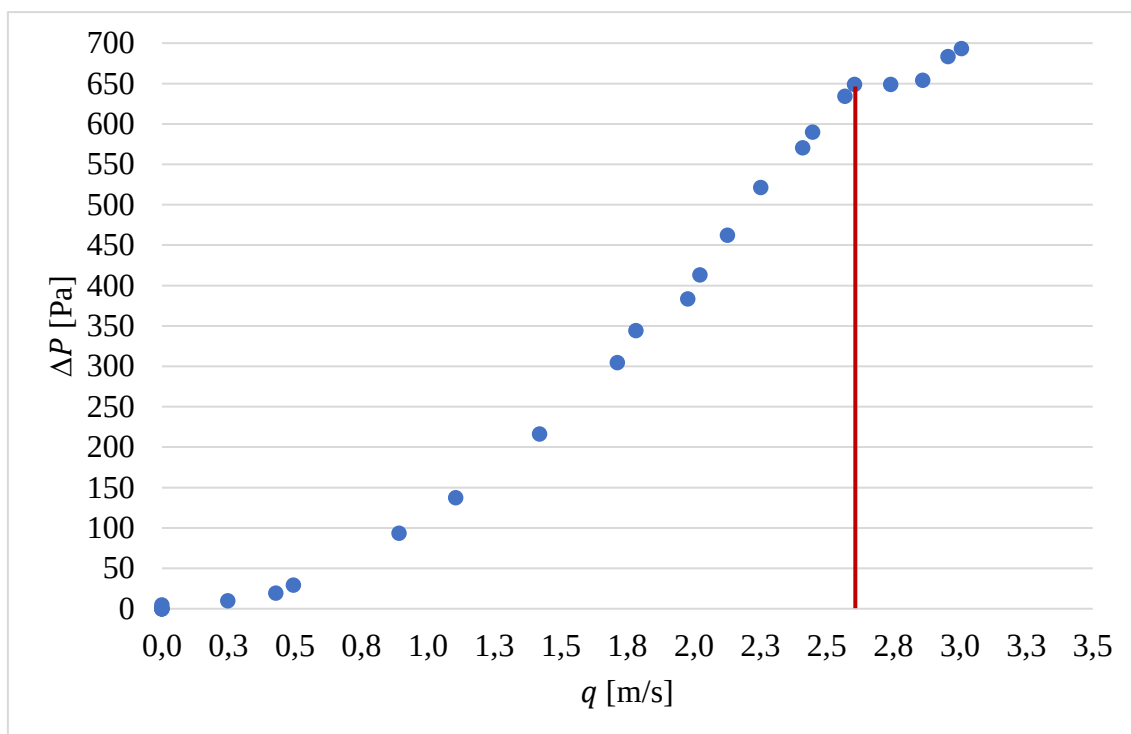


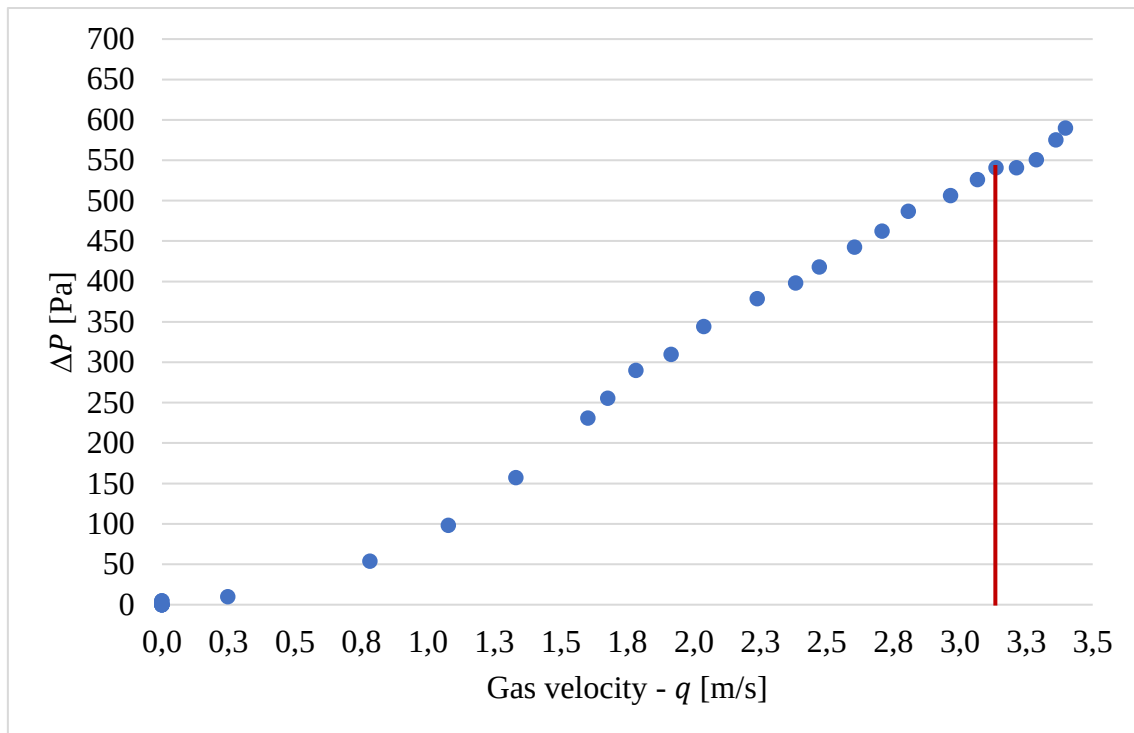


Fonte: Autoria própria.

Pode-se observar pela Tabela 16 e pela Figura 19 que existe um desvio significativo dos dados experimentais de K e de c em relação aos estimados pelas correlações empíricas para cada diâmetro analisado, e isso pode ser explicado por uma possível imprecisão na leitura dos manômetros inclinados utilizados, visto que foi verificada uma dificuldade na leitura para valores de queda de pressão baixos. Esses valores estão apresentados nos gráficos da Figura 20, sendo que os experimentos foram conduzidos em duplicata para cada diâmetro (grau de liberdade igual a 1) e os dados apresentados são referentes aos experimentos com as melhores curvas de queda de pressão em função da velocidade. Cabe destacar que a linha vermelha representa o par $(\Delta P, q)$ para o qual se atinge a velocidade de mínima fluidização (q_{mf}). Em um processo de fluidização usualmente verificam-se duas etapas, a primeira na qual a queda de pressão é linear em relação à velocidade, e a segunda na qual a queda de pressão se torna constante com o aumento da velocidade. E a velocidade na qual ocorre a mudança do comportamento da curva é denominada velocidade de mínima fluidização (q_{mf}). Porém, para alguns materiais, como o bagaço de malte, as curvas mostram que a queda de pressão aumenta ligeiramente com o aumento de q a partir de q_{mf} , como pode ser observado na Figura 20, devido à característica da biomassa, o que pode estar relacionado à má qualidade da fluidização.

Figura 20 – Dados de Queda de Pressão em função da Velocidade: a) Para $d_i^* = 3,68$ mm; b) Para $d_i^* = 4,38$ mm; c) Para $d_i^* = 5,18$ mm





Fonte: Autoria própria.

Comparando os resultados obtidos com os de outras biomassas, segundo Eric et al. (2011), a palha de soja (diâmetro < 6 mm) apresenta permeabilidade próxima ao bagaço de malte, na faixa de $1,81\text{-}6,46 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$. Porém, o valor de c ficou na faixa de $0,51\text{-}3,43$, diferente do observado para o material em estudo, sendo que essa variação pode estar relacionada também ao erro experimental citado, além do fato dos métodos utilizados terem limitações e das partículas serem difíceis de caracterizar devido à heterogeneidade da amostra.

Outros exemplos seriam os chips de madeira (*pine chips*) e a casca de madeira (*gum bark*) (triturados para diâmetro 3-4 mm), que apresentaram permeabilidade igual a $1,74 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$ e $2,63 \cdot 10^{-8}$ e c igual a 0,37 e 0,35, respectivamente (Wang et al., 2019). Esses valores, contudo, não são similares aos encontrados para o bagaço de malte.

4.2.8 Coeficiente de Arraste

Os valores do coeficiente de arraste (C_d) experimentais e determinados com o uso das correlações empíricas (Tabela 4) estão apresentados na Tabela 17. Assim como para a permeabilidade, os experimentos foram realizados em duplicatas (grau de liberdade igual a 1) para os 3 diâmetros maiores, em função de melhores resultados.

Tabela 17 - Resultados do Coeficiente de Arraste.

d_i^* [mm]	Tipo de Relação	Valor médio C_d [-]	Desvio padrão C_d [-]	Intervalo de Confiança de 95% [-]	Desvio Relativo C_d [%]
3,68	Experimental	1,98	0,56	0 - 7,01	-
	Empírico (III)	0,43	0,00	-	360,6
	Empírico (V)	0,52	0,02	0,34 - 0,70	280,3
4,38	Experimental	2,21	0,18	0,59 - 3,83	-
	Empírico (III)	0,43	0,00	-	414,5
	Empírico (V)	0,50	0,01	0,41 - 0,59	344,9
5,18	Experimental	2,78	0,87	0 - 10,60	-
	Empírico (III)	0,43	0,00	-	547,6
	Empírico (V)	0,48	0,02	0,30 - 0,66	480,7

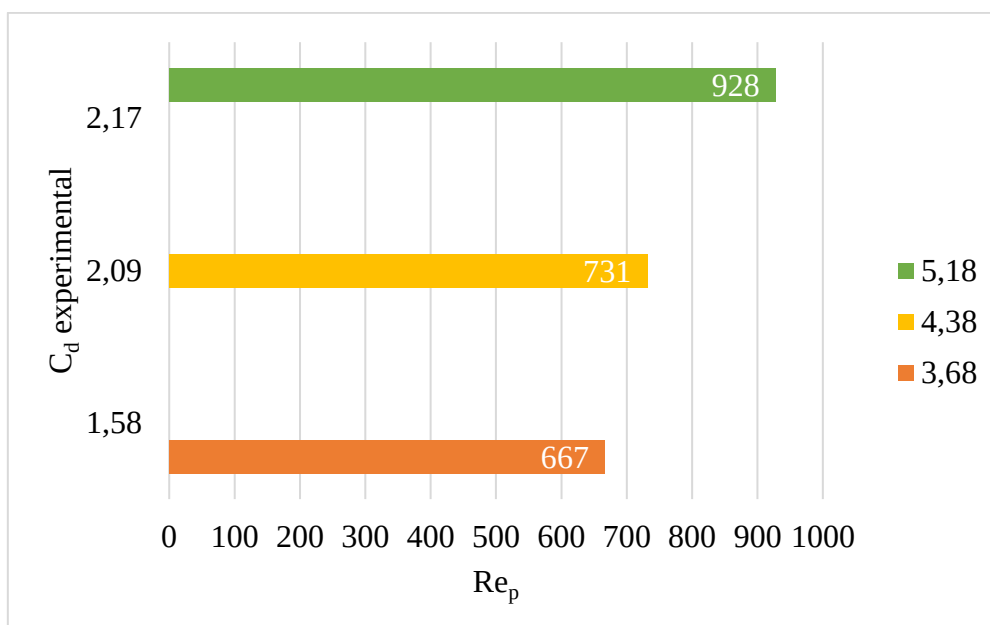
Fonte: Autoria própria.

Pode-se notar que os desvios entre os valores experimentais e estimados para C_d para os diâmetros analisados é superior aos desvios determinados para K e c , sendo que o mesmo experimento foi utilizado para determinar todas essas variáveis. Uma explicação seria também a possível imprecisão de leitura no manômetro inclinado, e outra poderia estar relacionada ao cálculo de C_d , que não leva em consideração a esfericidade das partículas, o que pode ter resultado em um erro maior considerando a heterogeneidade da amostra.

Além disso, observa-se que como esperado, à medida que os diâmetros aumentam o valor de C_d estimado (V) diminui, comportamento oposto ao verificado para o C_d experimental. A Figura 21 mostra esse comportamento a partir dos dados dos experimentos que apresentaram os melhores resultados para C_d experimental. Presume-se que com o aumento do diâmetro ocorreria uma diminuição no coeficiente de arraste, porque conforme o diâmetro aumenta o valor de Re_p também aumenta, e como mostrado na correlação V da Tabela 4, os valores de Re_p e C_d são inversamente proporcionais. Assim, uma justificativa para o resultado experimental está no fato das partículas serem materiais biológicos irregulares e, assim, o formato das partículas varia com o tamanho delas. Essa mesma divergência foi verificada no trabalho de Silva et al. (1998) para a borra de café (*coffee grounds*), no qual para o diâmetro de 0,50 mm, C_d experimental foi 0,8, C_d empírico (II) foi 1,06 e C_d empírico (IV) foi de 1,12. Além disso, para o diâmetro

de 2,01 mm, C_d experimental foi de 1,1, C_d empírico (II) foi de 0,43 e C_d empírico (IV) foi 0,52.

Figura 21 – Relação entre o d_i^* , Re_p e C_d experimental.

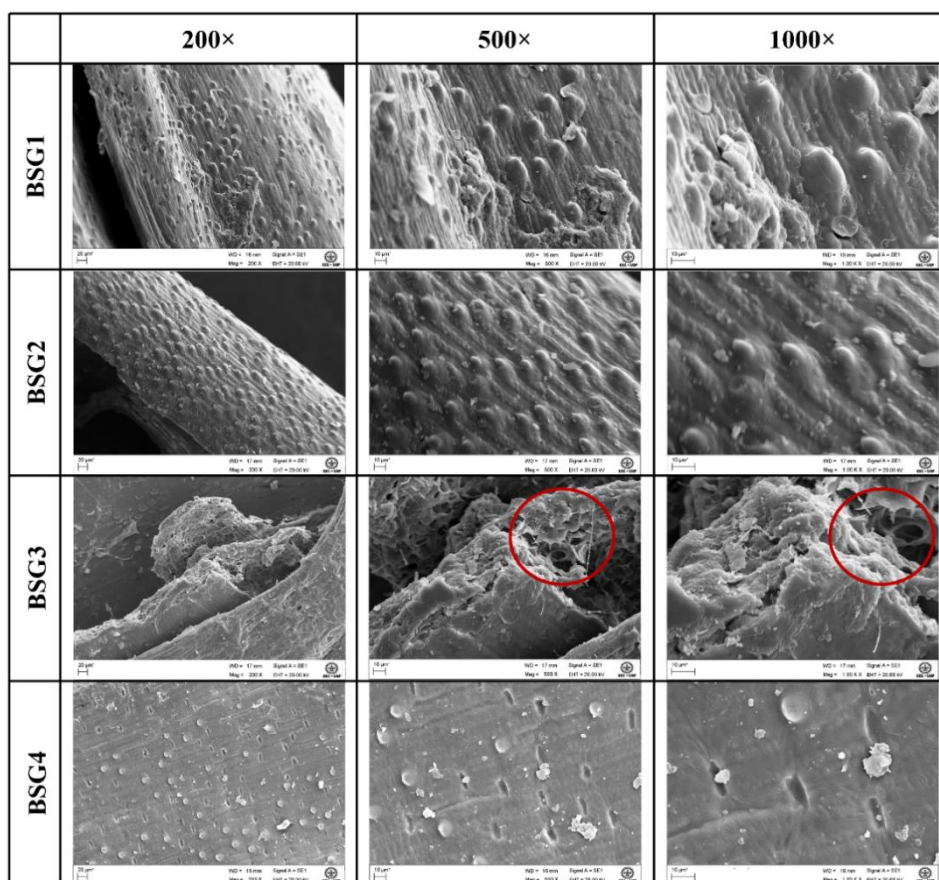


Fonte: Autoria própria.

4.2.9 Morfologia da Partícula

A Figura 22 mostra as imagens do MEV obtidas para formatos característicos na amostra de bagaço de malte. Foi possível observar que as partículas do tipo BSG1 e BSG2 têm uma superfície mais rugosa do que as partículas do tipo BSG4, conforme exibido na ampliação de 1000×. As micrografias das partículas do tipo BSG3 para 500× e 1000× mostraram a ruptura das partículas indicando sua estrutura porosa (mostrada por um círculo vermelho). A estrutura porosa do material pode ser uma indicação de que ele pode ser usado para a síntese de adsorventes ou zeólitas e, conseqüentemente, empregado em processos de adsorção (CASTRO; MEURER; COLPINI, 2021), bem como para processo de conversão termoquímica. A partícula de bagaço de malte tem uma superfície mais rugosa do que o resíduo de açaí (SOUTO et al., 2021), mas uma superfície mais lisa do que as fibras celulósicas granulares (SOUZA et al., 2021).

Figura 22 – Imagens obtidas pelo MEV para formatos característicos na amostra: BSG1, BSG2, BSG3 e BSG4 com ampliações de 200×, 500× e 1000×.



Fonte: Autoria própria.

4.3 Caracterização da Escoabilidade

Os resultados obtidos para a caracterização da escoabilidade da biomassa estudada foram: a razão de Hausner (HR), o índice de compressibilidade de Carr (CCI), a porosidade do leito, e o ângulo de repouso (AOR).

4.3.1 Razão de Hausner (HR)

A razão de Hausner (HR) foi determinada para a amostra total e para os diâmetros de 1,70 mm e 2,18 mm, e os valores calculados estão indicados na Tabela 18. Cabe destacar que foi escolhida a amostra total e esses diâmetros em função da quantidade de material disponível para preencher a proveta de 1000 mL para realizar o experimento. Em adição, selecionou-se uma proveta com esse volume para se conseguir um maior número de batidas da vidraria até o material compactar, permitindo uma melhor análise da

compactação da biomassa. Em estudos futuros, esse tipo de análise será feito para os demais tipos de partículas.

Tabela 18 – Valores obtidos para a Razão de Hausner.

d_i^* [mm]	Graus de Liberdade	Média HR	Desvio Padrão HR	Intervalo de Confiança de 95%	Classificação do Escoamento
Amostra Total	2	1,15	0,01	1,13 - 1,17	Boa
1,70	2	1,11	0,02	1,06 - 1,16	Excelente
2,18	2	1,10	0,00	-	Excelente

sendo que a classificação do escoamento foi feita de acordo com Dehghannya et al. (2018). Fonte: Autoria própria.

Como se pode observar pelas Equações (41), (42) e (43), a razão de Hausner representa uma proporção entre o volume inicial (V_{Lb}) e o volume final (V_{Tb}) da biomassa. Pelos dados da Tabela 18, pode-se verificar que os valores de HR obtidos para os diâmetros analisados são semelhantes, e não é possível correlacioná-los diretamente.

Os resultados encontrados para o bagaço de malte são semelhantes aos determinados para a casca de madeira triturada (*ground bark*), cujo valor encontrado foi de $1,17 \pm 0,01$ (para $d_{sv} = 0,45$ mm), segundo Rezaei e Sokhansanj (2018). Esses dados indicam que as duas biomassas apresentam menor compressibilidade e, assim, maior fluidez e facilidade no manuseio se comparada a outras biomassas. Por exemplo, chips de madeira triturados (*ground wood*) que apresentaram valor de HR igual a $1,57 \pm 0,01$ (para $d_{sv} = 0,58$ mm), o que mostra que as partículas desse material são mais coesivas entre si (REZAEI; SOKHANSANJ, 2018).

4.3.2 Índice de Compressibilidade de Carr (CCI)

Assim como a razão de Hausner, o índice de compressibilidade de Carr (CCI) foi determinado para a amostra total e para os diâmetros de 1,70 e 2,18 mm, e os valores calculados estão apresentados na Tabela 19. Em estudos futuros, esse tipo de análise será feito para os demais tipos de partículas.

Tabela 19 – Valores obtidos para o Índice de Compressibilidade de Carr.

d_i^* [mm]	Graus de Liberdade	Média <i>CCI</i>	Desvio Padrão <i>CCI</i>	Intervalo de Confiança de 95%
Amostra Total	2	13,33	0,58	11,89 - 14,77
1,70	2	9,74	1,45	6,14 - 13,34
2,18	2	9,00	0,00	-

Fonte: Autoria própria.

O índice de compressibilidade de Carr representa a porcentagem do volume reduzido em relação ao volume inicial (V_{lb}). Com isso, quanto maior o valor de *CCI*, maior é a compressibilidade da amostra estudada. O que se pode observar é que, assim como para a razão de Hausner, o índice de compressibilidade de Carr para o bagaço de malte foi semelhante dentre os diâmetros analisados como indicado na Tabela 19, e não é possível correlacionar diretamente os valores de *CCI* com os diâmetros.

Além disso, os valores de *CCI* mostraram, assim como *HR*, a baixa compactação do bagaço de malte, o que permite maior fluidez e facilidade de manuseio das partículas. Comparando também com o trabalho de Rezaei e Sokhansanj (2018), pode-se observar que a casca de madeira triturada apresentou *CCI* próximo ao do bagaço de malte, com valor de $14,29 \pm 0,58$ %. Diferente do verificado para os chips de madeira triturados, que obtiveram *CCI* igual a $36,39 \pm 0,45\%$ (REZAEI; SOKHANSANJ, 2018), ou seja, apresentaram maior compressão. Tannous et al. (2013) obtiveram o valor de *CCI* para madeira bruta de abeto-de-Douglas igual a 38,35% e Moschini et al. (2014) determinaram o valor de *CCI* para o amido nativo de pinhão, cujo valor foi de $23,74 \pm 2,20\%$, indicando menor fluidez das partículas.

4.3.3 Porosidade do Leito

Os valores da porosidade do leito (ε_b) foram obtidos para todos os diâmetros da amostra e estão indicados na Tabela 20. Para isso, os valores de ρ_p e ρ_b indicados nas Tabelas 8 e 6, respectivamente, foram utilizados na Equação (49) para a determinação de ε_b .

Tabela 20 - Resultado da Porosidade do Leito.

d_i^* [mm]	ε_b [-]
0,50	0,29
1,09	0,43
1,29	0,42
1,70	0,50
2,18	0,50
2,58	0,49
3,08	0,50
3,68	0,50
4,38	0,50
5,18	0,59

Fonte: Autoria própria.

Com relação à porosidade do leito, verifica-se que há uma tendência de maiores valores de porosidade para diâmetros maiores. Isso porque, como mostrado no item 4.2.2, a massa específica *bulk* compactada tende a ser menor com o aumento dos diâmetros, o que está relacionado ao formato das partículas maiores, que ficam menos compactadas no leito, resultando em maiores vazios entre as partículas.

Esse comportamento também foi verificado no trabalho de Pérez (2018) para o bagaço de cana de açúcar, no qual ε_b para o diâmetro de 0,075 mm foi de 0,695, e à medida que diâmetro aumentava, o valor da porosidade tendia a um aumento também, atingindo no diâmetro máximo de 9,5 mm, o valor de 0,858. Uma outra observação que pode ser feita está no fato das porosidades para o bagaço de cana de açúcar serem superiores às porosidades para o bagaço de malte na mesma faixa de diâmetros. Isso pode ser explicado pelo formato das duas biomassas, enquanto o bagaço de cana tem uma estrutura mais fibrosa resultando em mais vazios no leito, o bagaço de malte se assemelha mais a um grão, permitindo maior compactação.

4.3.4 Ângulo de Repouso (AOR)

Foi determinado o ângulo de repouso (θ) para a amostra total de bagaço de malte, e o valor médio, o desvio padrão, os graus de liberdade e o intervalo de confiança estão indicados na Tabela 21.

Tabela 21 – Resultado do Ângulo de Repouso.

Graus de Liberdade	Média θ [°]	Desvio Padrão θ [°]	Intervalo de Confiança de 95% [°]
5	42,9	0,4	42,5 – 43,3

Fonte: Autoria própria.

O ângulo de repouso, assim como *HR* e *CCI*, é um indicador de fluidez das partículas. O resultado obtido para θ confirma o comportamento mostrado pelos outros dois indicadores. O ângulo de $42,9 \pm 0,4^\circ$ mostra uma boa fluidez do material, valor similar ao determinado para a casca de madeira triturada, igual a $42,5 \pm 1,4^\circ$ e diferente do encontrado para os chips de madeira triturados, igual a $61,0 \pm 1,1^\circ$, material que não flui facilmente (REZAEI; SOKHANSANJ, 2018). Moschini et al. (2014) investigaram as propriedades de escoabilidade do amido nativo de pinhão que exibiu menor fluidez do que o bagaço de malte, cujo valor de AOR foi de $44,93^\circ \pm 0,65^\circ$.

Cabe destacar que essa propriedade é importante no projeto de silos e outros equipamentos para armazenamento, visto que está relacionada à capacidade de armazenagem do material, ajudando a determinar se é ou não necessário alguma força externa para a movimentação de grãos. Com isso, calcular AOR auxilia na determinação da massa total que fluirá de um silo, do ângulo requerido para o escoamento livre do material, e se é necessário um vibrador no fundo de uma tremonha, por exemplo.

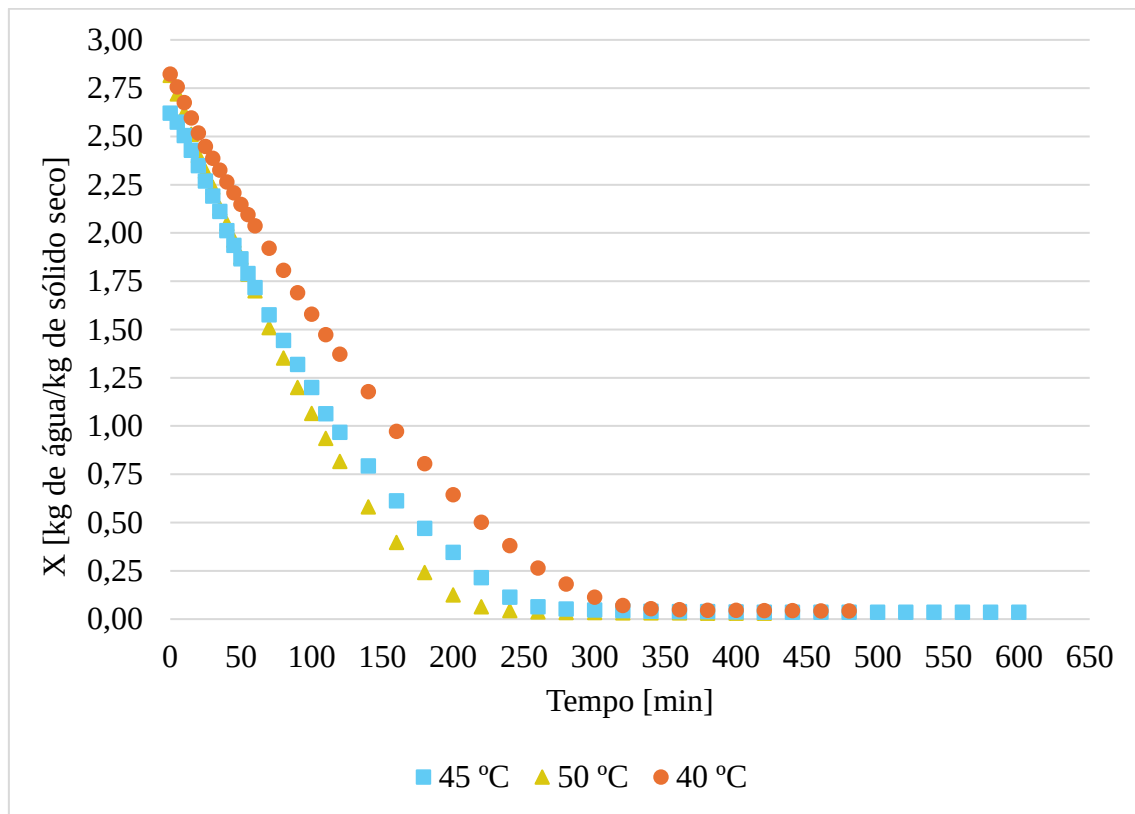
4.4 Secagem do Bagaço de Malte

Os resultados obtidos a partir do estudo da secagem da biomassa foram: análises do comportamento da umidade e da temperatura do material ao longo do tempo de secagem.

A Figura 23 mostra a umidade em base seca ($X_{b,s}$) do bagaço de malte em função do tempo durante a secagem para três condições experimentais, $T = 40^\circ\text{C}$, 45°C e 50°C . Comparando os dados, verificou-se uma redução do tempo de processo com a elevação da temperatura do ar de secagem. Isto pode ser explicado pelo aumento do fornecimento de energia no sistema, reduzindo a resistência à difusão da umidade. A umidade inicial média do material em base seca foi de $2,78 \pm 0,08$ kg de água/kg de sólido seco e a umidade relativa média do ar ambiente foi de $46,04 \pm 10,35\%$. Além disso, foi medida a umidade

relativa média do ar de secagem, para $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, cujos valores foram iguais a $38,60\pm 3,34\%$, $19,09\pm 3,66\%$ e $15,99\pm 0,50\%$, respectivamente.

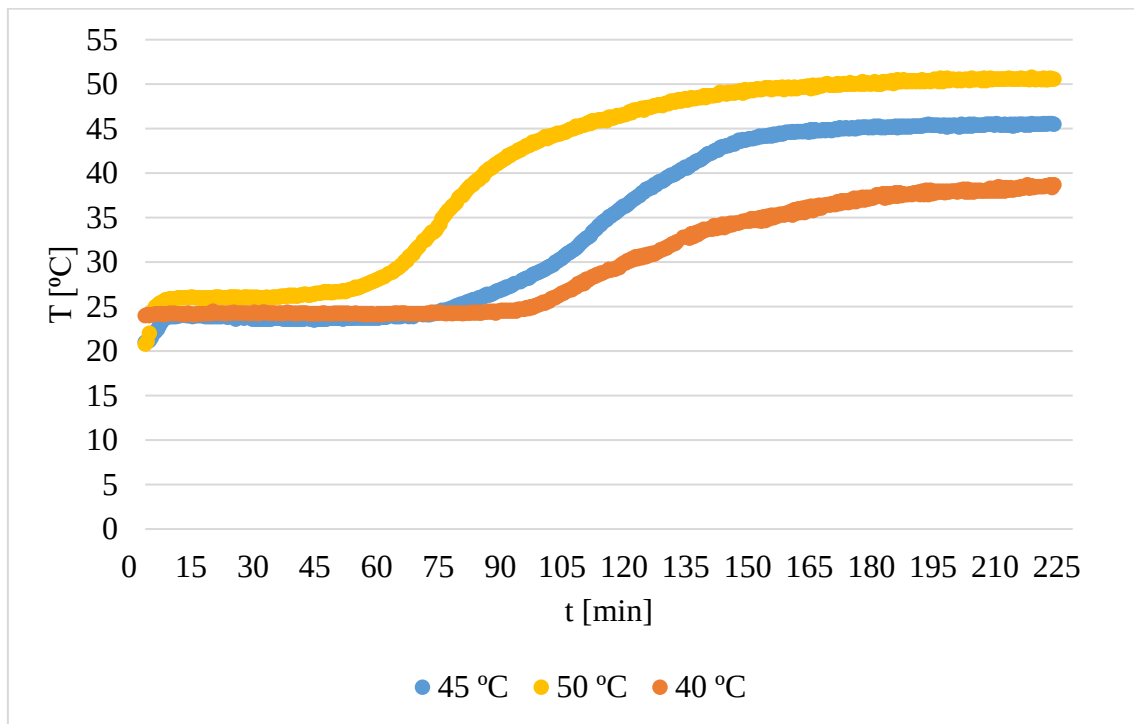
Figura 23 – Umidade em Base Seca em Função do Tempo.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 24 mostra o comportamento da temperatura do bagaço de malte ao longo do tempo de secagem para as três condições experimentais, $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. O fato da temperatura do sólido atingir rapidamente a temperatura do ar de secagem justifica o controle do processo de secagem pela difusão da umidade no sólido, o que significa que o efeito da termodifusão no material pode ser considerado pouco significativo. De acordo com a literatura, esta é uma característica dos grãos, materiais que possuem uma considerável presença de água ligada e taxas de secagem baixas, como arroz (BEHERA; SUTAR, 2018), trigo (GINER, 2019) e milho (SILVA et al., 2021). A temperatura inicial média do bagaço de malte foi de $21,2\pm 1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, a umidade relativa média do ar ambiente foi de $47,68\pm 5,11\%$ e a umidade média do ar de secagem, para $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, foi igual a $33,35\pm 4,70\%$, $22,48\pm 0,18\%$ e $17,81\pm 0,53\%$, respectivamente.

Figura 24 – Temperatura em Função do Tempo.



Fonte: Autoria própria.

5. Conclusões

Foram realizadas as análises de caracterização química, física e de escoabilidade do bagaço de malte. Na etapa de caracterização química foram obtidos os teores de extrativos, celulose, hemicelulose, lignina e cinzas iguais a $15,99 \pm 2,33\%$, $18,63 \pm 0,59\%$, $18,90 \pm 2,35\%$, $22,61 \pm 1,14\%$ e $4,03 \pm 0,03\%$, respectivamente. Já nas análises de caracterização física foi determinado o diâmetro médio de Sauter da amostra igual a 1,92 mm, e foi verificado que o modelo de distribuição acumulativa que melhor se ajustava aos dados experimentais era o de Rosin, Rammler and Bennett (RRB), com $R^2 = 0,9965$.

Foram calculadas as massas específicas real, *bulk* e aparente (com os solventes hexano e querosene) do material, cujos valores obtidos foram $1327,8 \pm 3,7 \text{ kg/m}^3$, $164,0\text{-}300,4 \text{ kg/m}^3$, $401,8\text{-}460,4 \text{ kg/m}^3$ e $256,81\text{-}304,79 \text{ kg/m}^3$, respectivamente. Os valores da porosidade da partícula e do leito determinados foram iguais a 0,67 e 0,29-0,50, respectivamente. Com relação aos formatos característicos na amostra, constatou-se que a partícula do tipo BSG4 foi a mais representativa contando com, aproximadamente, 54% da massa total, seguida das partículas do tipo BSG2 (20%), BSG3 (15%) e BSG1 (10%). A análise de forma e morfologia indicou a forma irregular da partícula de bagaço de malte e a heterogeneidade do material, características que tornam a caracterização da biomassa complexa.

A esfericidade foi determinada por dois métodos distintos e os valores divergentes entre a amostra total (0,41 e 0,63) e as partículas BSG1 (0,48 e 0,67), BSG2 (0,21 e 0,45), BSG3 (0,70 e 0,69), e BSG4 (0,82 e 0,82) indicam a heterogeneidade do material estudado. Para o coeficiente de permeabilidade e de arraste os valores encontrados foram próximos aos apresentados para outras biomassas na literatura, porém notou-se um desvio significativo entre os valores desses parâmetros experimentais e os estimados por correlações empíricas, o que pode ser explicado pela dificuldade na caracterização de materiais heterogêneos e pelas limitações dos métodos empregados. Além disso, a análise morfológica dos formatos característicos na amostra mostrou que as partículas BSG1 e BSG2 possuem superfícies mais rugosas do que BSG4, enquanto as partículas do tipo BSG3 apresentaram uma estrutura mais porosa. Em relação à caracterização de escoabilidade, os parâmetros *HR*, *CCI* e *AOR* mostraram que o bagaço de malte apresenta boa fluidez, o que interfere na armazenagem e manuseio dos grãos.

O estudo da secagem do bagaço de malte foi feito a partir da análise do comportamento da umidade em base seca e da temperatura do material com o tempo. Para isso, foi utilizado um secador do tipo túnel de escala laboratorial, a partir de uma camada fina de biomassa, tendo em vista três condições de temperatura do ar (40 °C, 45 °C e 50 °C). Comparando os dados, verificou-se uma redução no tempo de secagem com a elevação da temperatura do ar. Além disso, observou-se que a temperatura do sólido atingiu rapidamente a temperatura do ar de secagem, o que justifica o controle do processo de secagem pela difusão da umidade no sólido. Com isso, o efeito da termodifusão no material pode ser considerado pouco significativo.

Embora a caracterização da biomassa seja desafiadora devido à heterogeneidade das partículas, há diversos benefícios em se utilizar o bagaço de malte como matéria-prima, incluindo a redução de resíduos da indústria cervejeira e a criação de valor para resíduos agroindustriais. Os resultados obtidos mostram o enorme potencial do bagaço de malte para a produção de biocombustíveis e outros produtos. As propriedades físicas, químicas e de escoabilidade, além dos estudos de secagem, podem ser utilizados em trabalhos futuros para avaliar a performance da biomassa em aplicações industriais, facilitando o manuseio e o transporte, otimizando processos e aumentando a eficiência.

APÊNDICE A

Tabela 22 – Resultado da Análise de Imagens através do Software ImageJ – *Area*, *Perimeter*, *Major*, *Minor*, *Angle*, *Circularity* e *Feret* (100 Partículas).

Identificação da Partícula	<i>Area</i>	<i>Perimeter</i>	<i>Major</i>	<i>Minor</i>	<i>Angle</i>	<i>Circularity</i>	<i>Feret</i>
1	0,143	1,625	0,634	0,288	101,439	0,683	0,689
2	0,101	1,615	0,615	0,209	69,870	0,486	0,703
3	0,162	1,756	0,636	0,324	2,758	0,660	0,687
4	0,192	1,859	0,696	0,351	42,740	0,698	0,725
5	0,264	2,080	0,763	0,441	71,003	0,767	0,810
6	0,076	1,335	0,413	0,235	3,390	0,537	0,511
7	0,092	1,529	0,654	0,179	140,249	0,493	0,672
8	0,169	1,790	0,585	0,368	133,776	0,663	0,632
9	0,149	1,613	0,549	0,345	144,516	0,718	0,607
10	0,155	1,634	0,488	0,403	164,893	0,728	0,568
11	0,165	2,153	0,675	0,311	108,938	0,446	0,849
12	0,209	1,901	0,744	0,357	57,492	0,725	0,778
13	0,133	1,610	0,558	0,303	15,333	0,643	0,624
14	0,098	1,785	0,524	0,238	69,044	0,386	0,610
15	0,099	1,805	0,581	0,218	31,285	0,384	0,684
16	0,096	1,695	0,732	0,167	20,905	0,420	0,760
17	0,166	2,295	0,793	0,267	144,990	0,396	0,904
18	0,089	1,439	0,466	0,242	51,639	0,538	0,533
19	0,055	1,155	0,486	0,144	30,556	0,520	0,495
20	0,047	1,001	0,419	0,144	173,715	0,592	0,420
21	0,125	2,084	0,439	0,362	113,186	0,362	0,633
22	0,085	1,117	0,372	0,293	20,348	0,861	0,396
23	0,169	2,048	0,733	0,293	120,716	0,505	0,824
24	0,085	1,617	0,607	0,178	25,622	0,408	0,679
25	0,213	2,237	0,595	0,456	4,080	0,535	0,687
26	0,080	1,387	0,494	0,206	174,463	0,522	0,525
27	0,042	1,083	0,483	0,111	7,364	0,451	0,490
28	0,055	1,678	0,745	0,095	11,916	0,248	0,775
29	0,146	1,722	0,652	0,285	116,216	0,619	0,689
30	0,129	1,527	0,514	0,318	15,066	0,693	0,585
31	0,063	1,407	0,586	0,138	146,515	0,403	0,614
32	0,033	1,155	0,402	0,103	35,987	0,306	0,447
33	0,206	2,362	0,711	0,369	149,578	0,464	0,848
34	0,053	1,133	0,434	0,154	172,013	0,515	0,458
35	0,129	1,575	0,514	0,318	41,015	0,651	0,552
36	0,081	1,455	0,436	0,236	79,921	0,479	0,559

37	0,058	1,362	0,587	0,125	169,788	0,391	0,624
38	0,213	2,065	0,770	0,352	100,868	0,628	0,849
39	0,076	1,085	0,378	0,256	155,903	0,813	0,416
40	0,048	0,928	0,321	0,191	111,334	0,703	0,343
41	0,141	1,744	0,719	0,250	36,501	0,583	0,768
42	0,095	1,373	0,536	0,226	147,338	0,633	0,565
43	0,124	1,542	0,458	0,346	10,356	0,658	0,550
44	0,173	1,901	0,728	0,302	156,389	0,600	0,776
45	0,085	1,274	0,391	0,275	149,836	0,654	0,467
46	0,187	1,829	0,665	0,358	89,574	0,702	0,697
47	0,138	1,931	0,566	0,311	64,099	0,465	0,621
48	0,095	1,687	0,473	0,256	42,955	0,421	0,622
49	0,078	1,316	0,579	0,171	178,357	0,565	0,576
50	0,161	2,191	0,888	0,231	81,556	0,422	0,866
51	0,196	2,086	0,884	0,283	157,973	0,566	0,915
52	0,103	1,625	0,530	0,247	12,618	0,489	0,621
53	0,118	1,344	0,408	0,369	31,600	0,823	0,446
54	0,095	1,293	0,430	0,281	107,610	0,711	0,481
55	0,181	1,962	0,670	0,345	37,335	0,592	0,750
56	0,057	1,152	0,320	0,228	35,472	0,543	0,392
57	0,201	2,143	0,860	0,297	42,175	0,550	0,923
58	0,100	1,335	0,444	0,288	109,487	0,708	0,496
59	0,153	1,811	0,520	0,374	81,759	0,585	0,587
60	0,121	1,451	0,517	0,297	51,085	0,719	0,558
61	0,246	2,065	0,808	0,387	64,071	0,725	0,833
62	0,106	1,838	0,766	0,177	166,623	0,395	0,813
63	0,129	1,884	0,656	0,250	14,291	0,456	0,727
64	0,138	1,558	0,579	0,305	74,538	0,716	0,585
65	0,143	1,926	0,610	0,298	100,739	0,484	0,696
66	0,096	1,460	0,456	0,267	34,227	0,564	0,533
67	0,127	1,350	0,439	0,368	72,778	0,875	0,464
68	0,151	2,302	0,665	0,288	85,750	0,357	0,842
69	0,084	1,400	0,534	0,199	156,084	0,535	0,585
70	0,111	1,378	0,495	0,286	42,820	0,737	0,515
71	0,134	1,668	0,604	0,283	137,722	0,606	0,684
72	0,183	1,960	0,643	0,362	147,574	0,598	0,718
73	0,071	1,403	0,451	0,200	46,058	0,452	0,533
74	0,064	1,569	0,572	0,143	17,296	0,327	0,650
75	0,118	1,373	0,442	0,340	122,937	0,786	0,504
76	0,190	2,061	0,789	0,307	126,059	0,563	0,832
77	0,076	1,444	0,577	0,167	85,408	0,457	0,611
78	0,045	1,117	0,496	0,115	17,744	0,453	0,488
79	0,050	1,266	0,585	0,108	101,665	0,390	0,568

80	0,165	1,884	0,733	0,288	2,498	0,586	0,793
81	0,315	2,332	0,877	0,457	122,032	0,727	0,937
82	0,148	2,112	0,794	0,237	130,834	0,417	0,901
83	0,081	1,350	0,548	0,188	108,795	0,559	0,565
84	0,069	1,056	0,339	0,259	108,303	0,777	0,392
85	0,209	1,998	0,645	0,413	123,090	0,659	0,758
86	0,142	2,109	0,798	0,227	101,056	0,402	0,937
87	0,068	1,524	0,592	0,146	100,687	0,367	0,676
88	0,216	1,907	0,653	0,421	168,356	0,747	0,698
89	0,078	1,505	0,648	0,154	9,215	0,435	0,645
90	0,111	1,542	0,607	0,233	129,487	0,589	0,647
91	0,155	1,662	0,479	0,412	85,009	0,705	0,533
92	0,149	1,819	0,705	0,269	124,970	0,565	0,754
93	0,331	2,475	0,837	0,503	103,345	0,678	0,879
94	0,240	2,189	0,736	0,415	121,497	0,629	0,816
95	0,167	1,760	0,520	0,410	31,997	0,679	0,594
96	0,185	1,933	0,697	0,338	161,908	0,622	0,725
97	0,121	1,510	0,448	0,345	134,718	0,669	0,514
98	0,094	1,289	0,435	0,275	81,615	0,711	0,452
99	0,073	1,060	0,393	0,237	57,973	0,817	0,421
100	0,129	1,902	0,878	0,187	0,407	0,447	0,860

Fonte: Autoria própria.

Tabela 23 – Resultado da Análise de Imagens através do Software ImageJ – *Feret X*, *Feret Y*, *FeretAngle*, *MinFeret*, *AR*, *Round*, *Solidity* (100 Partículas)

Identificação da Partícula	<i>FeretX</i>	<i>FeretY</i>	<i>FeretAngle</i>	<i>MinFeret</i>	<i>AR</i>	<i>Round</i>	<i>Solidity</i>
1	1,170	0,029	106,557	0,304	2,201	0,454	0,931
2	0,912	0,066	66,038	0,245	2,949	0,339	0,866
3	1,028	0,037	171,027	0,357	1,964	0,509	0,893
4	0,548	0,067	52,001	0,379	1,984	0,504	0,923
5	0,066	0,082	75,964	0,464	1,732	0,577	0,945
6	0,777	0,055	12,095	0,277	1,762	0,568	0,785
7	0,661	0,042	140,389	0,206	3,652	0,274	0,858
8	0,283	0,044	132,709	0,417	1,589	0,629	0,906
9	0,411	0,047	155,695	0,385	1,590	0,629	0,906
10	0,154	0,070	12,724	0,429	1,211	0,826	0,898
11	1,035	0,108	104,621	0,410	2,172	0,460	0,763
12	0,903	0,153	58,134	0,399	2,085	0,480	0,930
13	1,160	0,131	23,629	0,350	1,843	0,543	0,913
14	0,770	0,149	69,444	0,297	2,199	0,455	0,806
15	0,536	0,152	40,764	0,275	2,669	0,375	0,821

16	0,649	0,144	23,552	0,192	4,384	0,228	0,889
17	0,392	0,133	142,224	0,375	2,974	0,336	0,752
18	0,060	0,171	50,440	0,325	1,923	0,520	0,782
19	0,292	0,163	25,641	0,171	3,366	0,297	0,836
20	0,167	0,156	167,735	0,153	2,915	0,343	0,871
21	1,026	0,191	130,426	0,446	1,213	0,824	0,708
22	1,169	0,209	35,838	0,304	1,271	0,787	0,935
23	0,901	0,215	119,899	0,336	2,502	0,400	0,887
24	0,279	0,236	26,565	0,215	3,416	0,293	0,835
25	0,399	0,234	171,027	0,482	1,304	0,767	0,855
26	0,532	0,231	9,782	0,232	2,395	0,418	0,882
27	0,760	0,229	10,491	0,125	4,351	0,230	0,889
28	0,642	0,238	14,676	0,129	7,851	0,127	0,758
29	0,165	0,233	121,218	0,343	2,286	0,437	0,899
30	0,046	0,261	12,339	0,350	1,613	0,620	0,895
31	0,758	0,291	144,462	0,173	4,248	0,235	0,799
32	1,161	0,310	28,610	0,141	3,907	0,256	0,671
33	0,529	0,309	149,657	0,440	1,927	0,519	0,832
34	0,648	0,309	159,444	0,176	2,812	0,356	0,835
35	1,013	0,335	29,055	0,365	1,618	0,618	0,858
36	0,306	0,348	73,301	0,295	1,848	0,541	0,746
37	0,405	0,319	166,759	0,158	4,688	0,213	0,819
38	0,175	0,324	98,471	0,399	2,187	0,457	0,911
39	0,037	0,335	149,036	0,277	1,475	0,678	0,919
40	0,899	0,344	117,897	0,211	1,683	0,594	0,856
41	1,151	0,399	35,538	0,282	2,877	0,348	0,910
42	1,014	0,399	145,305	0,272	2,376	0,421	0,894
43	0,409	0,418	13,134	0,388	1,326	0,754	0,885
44	0,753	0,407	156,975	0,340	2,415	0,414	0,891
45	0,537	0,409	133,452	0,311	1,423	0,703	0,822
46	0,295	0,448	76,675	0,393	1,858	0,538	0,930
47	0,653	0,445	71,565	0,365	1,821	0,549	0,854
48	0,034	0,439	50,826	0,300	1,847	0,541	0,731
49	0,882	0,417	172,875	0,179	3,379	0,296	0,912
50	0,169	0,480	81,703	0,270	3,843	0,260	0,849
51	1,142	0,468	159,444	0,333	3,128	0,320	0,916
52	1,008	0,508	18,435	0,270	2,149	0,465	0,821
53	0,884	0,515	36,870	0,383	1,107	0,903	0,924
54	0,299	0,510	111,801	0,317	1,530	0,654	0,888
55	0,027	0,543	38,234	0,399	1,943	0,515	0,880
56	0,755	0,532	46,848	0,263	1,400	0,714	0,857
57	0,398	0,553	42,647	0,341	2,891	0,346	0,896
58	0,542	0,522	127,694	0,335	1,541	0,649	0,889

59	0,174	0,558	70,463	0,406	1,391	0,719	0,834
60	0,643	0,557	39,806	0,321	1,743	0,574	0,914
61	1,015	0,611	59,036	0,435	2,088	0,479	0,936
62	1,140	0,572	160,769	0,218	4,339	0,230	0,798
63	0,876	0,625	24,677	0,286	2,625	0,381	0,850
64	0,035	0,644	77,661	0,332	1,900	0,526	0,919
65	0,287	0,614	112,620	0,320	2,047	0,489	0,865
66	0,536	0,644	50,440	0,303	1,705	0,586	0,794
67	0,761	0,645	67,380	0,375	1,192	0,839	0,941
68	0,652	0,671	85,135	0,339	2,311	0,433	0,734
69	0,409	0,629	148,736	0,224	2,683	0,373	0,851
70	0,200	0,655	33,690	0,316	1,727	0,579	0,898
71	1,021	0,678	130,764	0,314	2,135	0,468	0,887
72	1,141	0,683	145,125	0,435	1,774	0,564	0,866
73	0,886	0,705	39,560	0,253	2,258	0,443	0,799
74	0,747	0,722	20,925	0,210	4,013	0,249	0,747
75	0,027	0,715	112,932	0,376	1,301	0,769	0,898
76	0,530	0,722	125,395	0,354	2,567	0,390	0,900
77	0,185	0,757	83,290	0,196	3,450	0,290	0,877
78	0,643	0,740	23,749	0,142	4,297	0,233	0,822
79	0,297	0,735	102,724	0,126	5,410	0,185	0,846
80	0,400	0,749	7,765	0,321	2,548	0,393	0,913
81	0,888	0,797	120,964	0,505	1,921	0,521	0,939
82	1,013	0,797	129,369	0,279	3,344	0,299	0,820
83	1,163	0,806	108,435	0,209	2,908	0,344	0,891
84	0,753	0,814	120,069	0,294	1,308	0,765	0,906
85	0,644	0,824	124,439	0,471	1,564	0,639	0,885
86	0,419	0,826	97,667	0,269	3,520	0,284	0,816
87	0,547	0,826	102,200	0,182	4,052	0,247	0,777
88	0,143	0,854	175,601	0,455	1,551	0,645	0,914
89	0,016	0,851	14,421	0,182	4,201	0,238	0,862
90	0,281	0,841	129,401	0,275	2,602	0,384	0,877
91	1,155	0,910	103,570	0,429	1,162	0,861	0,892
92	0,639	0,928	126,327	0,302	2,618	0,382	0,904
93	0,147	0,931	102,907	0,536	1,665	0,600	0,925
94	0,740	0,934	113,199	0,481	1,772	0,564	0,887
95	0,998	0,960	32,735	0,482	1,268	0,789	0,889
96	0,875	0,939	170,074	0,356	2,061	0,485	0,925
97	0,537	0,942	110,323	0,386	1,299	0,770	0,849
98	0,039	0,972	71,565	0,286	1,583	0,632	0,889
99	0,404	0,970	53,616	0,259	1,658	0,603	0,914
100	0,265	0,960	4,764	0,196	4,698	0,213	0,907

Fonte: Autoria própria.

Referências

- ALAO, M.A.; POPOOLA, O.M.; AYODELE, T.R. A novel fuzzy integrated MCDM model for optimal selection of waste-to-energy-based-distributed generation under uncertainty: A case of the City of Cape Town, South Africa. **Journal of Cleaner Production**, 343, p. 130824., 2022.
- ARRANZ, J. I. et al. Analysis of Drying of Brewers' Spent Grain. p. 1467, 2018.
- ARRANZ, J. I. et al. Feasibility analysis of brewers' spent grain for energy use: Waste and experimental pellets. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 11, n. 6, 2021.
- BALAT, M. Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: A review. **Energy Conversion and Management**, 52, p. 858–875, 2011.
- BARROZO, M. A. S. et al. Fluid dynamics analysis and pyrolysis of brewer's spent grain in a spouted bed reactor. **Particuology**, v. 42, p. 199–207, 2019.
- BEHERA, G.; SUTAR, P. P. A comprehensive review of mathematical modeling of paddy parboiling and drying: Effects of modern techniques on process kinetics and rice quality. **Trends in Food Science and Technology**, v. 75, n. February, p. 206–230, 2018.
- BITRA, V. S. P.; WOMAC, A. R.; YANG, Y. T.; MIU, P. I.; IGATHINATHANE, C.; CHEVANAN, N.; SOKHANSANJ, S. Characterization of wheat straw particle size distributions as affected by knife mill operating factors. **Biomass and Bioenergy**, 35(8), p. 3674-3686, 2011.
- BOCHMANN, G.; DROSG, B.; FUCHS, W. Anaerobic digestion of thermal pretreated brewers' spent grain. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, 34 (4), p. 1092–1096, 2015.
- CARDOSO, C. R.; OLIVEIRA, T. J. P.; JUNIOR, J.A.S.; ATAÍDE, C. H. Physical characterization of sweet sorghum bagasse, tobacco residue, soy hull and fiber sorghum bagasse particles: Density, particle size and shape distributions. **Powder Technology**, 245, p. 105–114, 2013.
- CASTRO, L.E.N.; COLPINI, L.M.S. All-around characterization of brewers' spent grain. **Eur. Food Res. Technol.**, 247, p. 3013–3021, 2021.
- CASTRO, L. E. .; MEURER, F.; COLPINI, L. M. . Study of the application of brewers' spent grains as an adsorbent for the removal of lubricating oil in an aqueous medium. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 12, p. 120522–120527, 2021.
- CELAYA, A.M.; LADE, A.T.; GOLDFARB, J.L. Co-combustion of brewer's spent grains and Illinois No. 6 coal: Impact of blend ratio on pyrolysis and oxidation behavior. **Fuel Processing Technology**, v. 129, p. 39–51, 2015.

CERVBRASIL. Dados do Setor. 2023. Disponível em:
<http://www.cervbrasil.org.br/novo_site/dados-do-setor/> Acesso em 03 de out. de 2023.

CHABANNES, M.; BECQUART, F.; DIAZ, E.G.; ABRIAK, N.E.; CLERC, L. Experimental investigation of the shear behavior of hemp and rice husk-based concretes using triaxial compression. **Constr. Build. Mater**, 143, p. 621–632, 2017.

CHEN, R.; YUAN, S.; CHEN, S.; CI, H.; DAI, X.; WANG, X.; LI, C.; WANG, D.; DONG, B. Life-cycle assessment of two sewage sludge-to-energy systems based on different sewage sludge characteristics: energy balance and greenhouse gas-emission footprint analysis. **Journal of Environmental Sciences**, 111, p. 380–391, 2022.

CHU, J.; ZHAO, H.; LU, Z.; LU, F.; BIE, X.; ZHANG, C. Improved physicochemical and functional properties of dietary fiber from millet bran fermented by *Bacillus natto*. **Food Chemistry**, 294, p. 79–86, 2019.

CORONADO, M. A.; MONTERO, G.; MONTES, D. G.; VALDEZ-SALAS, B.; AYALA, J. R.; GARCÍA, C.; CARRILLO, M.; LEÓN, J. A.; MORENO, A. Physicochemical characterization and SEM-EDX analysis of brewer's spent grain from the craft brewery industry. **Sustainability**, 12, 2020.
<https://doi.org/10.3390/su12187744>.

COSTA, L. P.; MASSARANI, G. **Analysis of a resistive force in a fluid flow through porous media**. Proceedings of the 10th Meeting on Flow in Porous Media. **Anais**.1982.

D'ÁVILA, J. S.; FILHO, R. S. **Sistemas particulados**: Tecnologia das operações sólido-fluido. 1. ed. Sergipe: Universidade Federal de Sergipe, 1980.

DÁVILA, J.; ROSENBERG, M.; CARDONA, C. A biorefinery approach for the production of xylitol, ethanol and polyhydroxybutyrate from brewer's spent grain. **AIMS Agriculture and Food**, 1 (1), p. 52–66, 2016.

DEHGHANNYA, J. et al. Influence of foam thickness on production of lime juice powder during foam-mat drying: Experimental and numerical investigation. **Powder Technology**, v. 328, p. 470–484, 2018.

DHANALAKSHMI, C.S.; MADHU, P.; KARTHICK, A.; MATHEW, M., KUMAR, R.V. A comprehensive MCDM-based approach using TOPSIS and EDAS as an auxiliary tool for pyrolysis material selection and its application. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 12, p. 5845-5860, 2022.

ELIOPOULOS, C.; ARAPOGLOU, D.; CHORIANOPOULOS, N.; MARKOU, G.; HAROUTOUNIAN, S.A. Conversion of brewers' spent grain into proteinaceous animal feed using solid state fermentation. **Environmental Science and Pollution Research**, 29 (20), p. 29562-29569, 2022, doi: 10.1007/s11356-021-15495-w.

ELMAZ, F.; YÜCEL, Ö.; MUTLU, A. Y. Predictive modeling of biomass gasification with machine learning-based regression methods. **Energy**, v. 191, 116541, 2020.

EPE. BEN - Relatório Síntese: Ano base 2022. 2023. Acesso em 15 de nov. de 2023.

ERGUN, S. Fluid flow through packed columns. **Chemical engineering progress**, v. 48, p. 89–94, 1952.

ERIC, A.; DAKIĆ, D.; NEMODA, S.; KOMATINA, M.; REPIĆ, B. Experimental method for determining Forchheimer equation coefficients related to flow of air through the bales of soy straw. **Int. J. Heat. Mass Transf**, 54 (19–20), p. 4300–4306, 2011.

ESPINO, E.; CAKIR, M.; DOMENEK, S.; ROMÁN-GUTIÉRREZ, A.D.; BELGACEM, N.; BRAS, J. Isolation and characterization of cellulose nanocrystals from industrial byproducts of *Agave tequilana* and barley. **Industrial Crops and Products**, 62, p. 552–559, 2014.

FÄRÇAŞ, A. et al. Brewers ' spent grain – A new potential ingredient for functional foods. 2014.

FENG, Y. et al. Mechanical pretreatment of typical agricultural biomass on shape characterization and NO emissions during combustion. **Bioresource Technology**, v. 397, n. January, p. 130477, 2024.

FIGUEIREDO, Aneliése Lunguinho. **Pirólise termoquímica de pós da fibra de coco seco em um reator de cilindro rotativo para a produção de bio-óleo**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Petróleo) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

FOONG, S. Y.; LIEW, R.K.; YANG, Y.; CHENG, Y.W.; YEK, P.N.Y.; MAHARI, W.A.W.; LEE, X.Y.; HAN, C.S.; VO, D.V.N.; LE, Q.V.; AGHBASHLO, M.; TABATABAEI, M.; SONNE, C.; PENG, W.; LAM, S.S. Valorization of biomass waste to engineered activated biochar by microwave pyrolysis: Progress, challenges, and future directions. **Chemical Engineering Journal**, v. 389, 124401, 2020.

FUFA, D. D. et al. Drying kinetic models, thermodynamics, physicochemical qualities, and bioactive compounds of avocado (*Persea americana* Mill. Hass variety) seeds dried using various drying methods. **Heliyon**, v. 11, n. 1, p. e41058, 2025.

GIL-LOPEZ, D.I.L.; LOIS-CORREA, J. A.; SANCHEZ-PARDO, M. E.; DOMÍNGUEZ-CRESPO, M. A.; TORRES-HUERTA, A. M.; RODRÍGUEZ-SALAZAR, A. E.; ORTA-GUZMÁN, V.N. Production of dietary fibers from sugarcane bagasse and sugarcane tops using microwave-assisted alkaline treatments. **Industrial Crops and Products**, 135, p. 159–169, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.04.042>.

GINER, S. A. Estimation of the influence of variable boundary conditions when using thin layer equations for grain dryer simulation. **Biosystems Engineering**, v. 186, p. 228–233, 2019.

GNANASEKARAN, L.; PRIYA, A.K.; THANIGAIVEL, S.; HOANG, T.K.A.; SOTO-MOSCOSO, M. The conversion of biomass to fuels via cutting-edge technologies: Explorations from natural utilization systems. **Fuel**, v. 331, p.125668, 2023.

GOLDONI, A. G. et al. Evaluation of a method based on image analysis to obtain shape parameters in crushed sand grains Avaliação de um método baseado em análise de. v. 8, n. 5, p. 577–583, 2015.

GOVERNO DO BRASIL. Mercado cervejeiro cresce no Brasil e aumenta interesse pela produção nacional de lúpulo e cevada. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/agricultura-e-pecuaria/2021/08/mercado-cervejeiro-cresce-no-brasil-e-aumenta-interesse-pela-producao-nacional-de-lupulo-e-cevada>. Acesso em 03 de out. de 2023.

GUPTA, M.; ABU-GHANNAM, N.; GALLAGHAR, E. Barley for brewing: Characteristic changes during malting, brewing and applications of its by-products. **Comprehensive reviews in food science and food safety**, 9 (3), p. 318–328, 2010.

HUIGE, N. J. Brewery by-products and effluents. **Food Science and Technology**, p. 501, 1995.

JIMOH, K. A. et al. Recent Advances in the Drying Process of Grains. **Food Engineering Reviews**, v. 15, n. 3, p. 548–576, 2023.

KHAN, M.; NAQVI, S. R.; ULLAH, Z.; TAQVI, S.A.A.; KHAN, M.N.A.; FAROOQ, W.; MEHRAN, M.T.; JUCHELKOVÁ, D.; ŠTĚPANEK, L. Applications of machine learning in thermochemical conversion of biomass-A review. **Fuel**, v. 332, n. 126055, 2023.

KISSEL, L.T.; PRENTICE, N. Protein and fiber enrichment of cookie flour with brewers' spent grain. **Cereal Chemistry**, 56, p. 261–266, 1979.

KOSAKOWSKI, W.; BRYSEWSKA, M.A.; DZIUGAN, P. Biochars from Post-Production Biomass and Waste from Wood Management: Analysis of Carbonization Products. **Materials**, 13, 4971, 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13214971>.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. [s.l.] Butterworth-Heinemann, 1991.

KUNZE, W. **Technology Brewing and Malting**. 3. ed. Berlin: VLB Berlin, 2004.

LI, S.; CHEN, G.; QIANG, S.; TANG, D.; CHEN, Y.; ZHANG, Z.; LEI, Z.; CHEN, Y. Intensifying soluble dietary fiber production and properties of soybean curd residue via autoclaving treatment. **Bioresource Technology Reports**, 7, 100203, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100203>.

LIGUORI, R.; SOCCOL, C.R.; VANDENBERGHE, L.P.S.; WOICIECHOWSKI, A.L.; FARACO, V. Second Generation Bioethanol Production from Brewers' Spent Grain. **Energies**, 8, p. 2575–2586, 2015.

LYNCH, K. M.; STEFFEN, E. J.; ARENDT, E. K. Brewers' spent grain: a review with an emphasis on food and health. **Journal of the Institute of Brewing**, v. 122, n. 4, p. 553–568, 2016.

- MACLEOD, A.M. The physiology of malting. **Brewing Science**, New York, v. 1, p. 145–232, 1979.
- MAHMOOD, A.S.N.; BRAMMER, J.G.; HORNUNG, A.; STEELE, A.; POULSTON, S. The intermediate pyrolysis and catalytic steam reforming of brewers spent grain. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, 103, p. 328–342, 2013.
- MAIONE, N. R. **Pré-Tratamento Hidrotérmico Do Bagaço De Malte (Bsg) Visando a Produção De Etanol De Segunda Geração**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Goiás, Goiania, 2019.
- MALLEN, E.; NAJDANOVIC-VISAK, V. Bioresource Technology Reports Brewers ' spent grains : Drying kinetics and biodiesel production. **Bioresource Technology Reports**, v. 1, p. 16–23, 2018.
- MALLET, J. M. **A Practical Guide from Field to Brewhouse**. 1. ed. Boulder: Brewers Publications, 2014, p. 100–120.
- MAPA. Anuário da cerveja 2020. 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/com-crescimento-de-14-4-em-2020-numero-de-cervejarias-registradas-no-brasil-passa-de-1-3-mil/anuariocerveja2.pdf>> Acesso em 03 de out. de 2023.
- MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em Sistemas Particulados**. Rio de Janeiro: E-papers, 2002.
- MASSARDI, M. M.; MASSINI, R. M. M.; SILVA, D. J. Caracterização química do bagaço de malte e avaliação do seu potencial para obtenção de produtos de valor agregado. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, 6(1), p. 0083-0091, 2020.
- MENEZES, Ligia Cristina Micheleti De Azevedo Oliveira; YAMASHITA, Mariana. **Produção de Tijolos Ecológicos com Cinzas de Caldeira e Bagaço De Malte**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.
- MORSI, S. A.; ALEXANDER, A. J. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 55, n. 2, p. 193–208, 1972.
- MOSCHINI, R. et al. Determination of properties of pinhão starch : Analysis of its applicability as pharmaceutical excipient. **Industrial Crops & Products**, v. 52, p. 420–429, 2014.
- MUSSATTO, S.I.; DRAGONE, G.; ROBERTO, I.C. Brewers' spent grain: generation, characteristics and potential applications. **J. Cereal Sci.**, 43 (1), p. 1–14, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2005.06.001>.
- NAIBAHO, J.; KORZENIOWSKA, M. The variability of physico-chemical properties of brewery spent grain from 8 different breweries. **Heliyon**, v. 7, n. 3, 2021.

- NUTRIAGRO. Malte de Cevada. 2023. Disponível em:
<<https://nutriagro.weebly.com/malte-de-cevada.html>> Acesso em 25 de out. de 2023.
- OKAMOTO, K.; UCHII, A.; KANAWAKU, R.; YANASE, H. Bioconversion of xylose, hexoses and biomass to ethanol by a new isolate of the white rot basidiomycete *Trametes versicolor*. **Springer Plus**, 3, p. 1–9, 2014.
- ORTIZ, I.; TORREIRO, Y.; MOLINA, G.; MAROÑO, M.; SÁNCHEZ, J.M. A Feasible Application of Circular Economy: Spent Grain Energy Recovery in the Beer Industry. **Waste and Biomass Valorization**, 10 (12), p. 3809-3819, 2019, doi: 10.1007/s12649-019-00677-y.
- PABBATHI, N.P.P.; VELIDANDI, A.; POGULA, S.; GANDAM, P.K.; BAADHE, R. R.; SHARMA, M.; SIROHI, R.; THAKUR, V.K.; GUPTA, V.K. Brewer's spent grains-based biorefineries: a critical review. **Fuel**, 317, Article 123435, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123435>.
- PALMER, J.J. **How to Brew**: Everything You Need to Know to Brew Beer Right the First Time. 1. ed. Boulder: Brewers Publications, 2006, p. 1–347.
- PANWAR, N.L.; PAUL, A.S. An overview of recent development in bio-oil upgrading and separation techniques. **Environmental Engineering Research**, 26 (5), n. 200382, 2021, doi: 10.4491/eer.2020.382.
- PEÇANHA, R. P. **Sistemas Particulados: Operações unitárias envolvendo partículas e fluidos**. [s.l.] Elsevier Brasil, 2014.
- PERAZZINI, H. et al. Thermal Treatment of Solid Wastes Using Drying Technologies: A Review. **Drying Technology**, v. 34, n. 1, p. 39–52, 2016.
- PERAZZINI, H.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T. Prediction of Residence Time Distribution of Solid Wastes in a Rotary Dryer. **Drying Technology**, v. 32, n. 4, p. 428–436, 2014.
- PÉREZ, N.P.; PEDROSO, D.T.; MACHIN, E.B.; ANTUNES, J.S.; RAMOS, R.A.V.; SILVEIRA, J.L. Prediction of the minimum fluidization velocity of particles of sugarcane bagasse. **Biomass Bioenergy**, 109, p. 249–256, 2018, <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.12.004>.
- PINTO, G. H. A. et al. Drying of orange juice waste in a mechanically stirred spouted bed. **Food and Bioproducts Processing**, v. 150, n. December 2024, p. 89–97, 2025.
- POURKARIMI, S.; HALLAJISANI, A.; ALIZADEHDAKHEL, A.; NOURALISHAHI, A. Biofuel production through micro- and macroalgae pyrolysis – A review of pyrolysis methods and process parameters. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 142, 104599, 2019.
- QIN, F.; JOHANSEN, A.Z.; MUSSATTO, S.I. Evaluation of different pretreatment strategies for protein extraction from brewer's spent grains. **Ind. Crop. Prod.**, 125, p. 443–453, 2018.

RASUL, M. G.; RUDOLPH, V.; CARSKY, M. Physical properties of bagasse. **Fuel**, v. 78, n. 8, p. 905–910, 1999.

RAVINDRAN, R.; JAISWAL, S.; ABU-GHANNAM, N.; JAISWAL, A. K. A comparative analysis of pretreatment strategies on the properties and hydrolysis of brewers' spent grain. **Bioresource Technology**, 248, p. 272–279, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.039>.

REZAEI, H.; LIM, C. J.; LAU, A.; SOKHANSANJ, S. Size, shape and flow characterization of ground wood chip and ground wood pellet particles. **Powder Technology**, 301, p. 737-746, 2016.

REZAEI, H.; SOKHANSANJ, S. Physical and thermal characterization of ground bark and ground wood particles. **Renewable Energy**, 129, p. 583-590, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.038>.

ROCHA, A. A.; STOPPE, A. C. R.; SILVÉRIO, B. C.; SANTOS, K. G.; NETO, J. L. V. Drying of malt residues in a solar greenhouse and in a fixed bed solar dryer. **Research, Society and Development**, 9(7), p. 1-27, 2020.

SANNA, A.; LI, S.; LINFORTH, R.; SMART, K.A.; ANDRÉSEN, J.M. Bio-oil and bio-char from low temperature pyrolysis of spent grains using activated alumina. **Bioresource Technology**, 102, p. 10695–10703, 2011.

SANTOS, M.; JIMÉNEZ, J.J.; BARTOLOMÉ, B.; GÓMEZ-CORDOVÉS, C.; DEL NOZAL, M.J. Variability of brewers' spent grain within a brewery. **Food Chemistry**, 80, p. 17–21, 2003.

SANTOS, R. G. D.; ALENCAR, A. C. Biomass-derived syngas production via gasification process and its catalytic conversion into fuels by Fischer Tropsch synthesis: A review. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 36, p. 18114-18132, 2020.

SIDRA. Produção Agrícola Municipal. 2022. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>> Acesso em 03 de out. de 2023.

SILVA, G. M. DA et al. Energy and exergy analysis of the drying of corn grains. **Renewable Energy**, v. 163, p. 1942–1950, 2021.

SILVA, M.A.; NEBRA, S.A.; SILVA, M.J.M; SANCHEZ, C.G. The use of biomass residues in the Brazilian soluble coffee industry. **Biomass and Bioenergy**, United Kingdom, v. 14, n. 5/6, p. 457-467, 1998, doi:10.1016/S0961-9534(97)10034-4.

SINDICERV. Brasil já é o 3º país que mais consome cerveja no mundo. 2021. Disponível em: <<https://www.sindicerv.com.br/noticias/brasil-ja-e-o-3o-pais-que-mais-consome-cerveja-no-mundo/>> Acesso em 03 de out. de 2023.

SINDICERV. O setor em números. 2023. Disponível em: <<https://www.sindicerv.com.br/o-setor-em-numeros/>> Acesso em 03 de out. de 2023.

SINGH, A. P. et al. Novel drying methods for sustainable upcycling of brewers' spent grains as a plant protein source. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 9, p. 1–17, 2020.

SOHNI, S. et al. Physicochemical characterization of Malaysian crop and agro-industrial biomass residues as renewable energy resources. **Industrial Crops and Products**, v. 111, n. June 2017, p. 642–650, 2018.

SOUSA, R. C. DE et al. Convective drying of black pepper: Experimental measurements and mathematical modeling of the process. **Food and Bioproducts Processing**, v. 143, n. October 2023, p. 102–116, 2024.

SOUTO, B. A. et al. Valorization of acai bio-residue as biomass for bioenergy: Determination of effective thermal conductivity by experimental approach, empirical correlations and artificial neural networks. **Journal of Cleaner Production**, v. 279, 2021.

SOUZA, T. C. A. et al. Drying of granular cellulosic fibers by-products: Material characterization, kinetics modeling, and costs analysis towards process optimization. **Bioresource Technology Reports**, v. 15, n. July, 2021.

TANG, Q.; CHEN, Y.; YANG, H.; LIU, M.; XIAO, H.; WU, Z.; CHEN, H.; NAQVI, S.R. Prediction of Bio-oil Yield and Hydrogen Contents Based on Machine Learning Method: Effect of Biomass Compositions and Pyrolysis Conditions. **Energy&Fuels**, 34, p. 11050-11060, 2020. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c01893>.

TANNOUS, K.; LAM, P. S.; SOKHANSANJ, S.; GRACE, J. R. Physical properties for flow characterization of ground biomass from douglas fir wood. **Particulate Science and Technology**, 31(3), p. 291-300, 2013.

THAI, S. et al. Influence of drying methods on health indicators of brewers spent grain for potential upcycling into food products. **Applied Food Research**, v. 2, n. 1, p. 100052, 2022.

TSCHOEKE, I. C. P. et al. Biogas production from malt bagasse from craft beer industry: kinetic modeling and process simulation. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 25, n. 5, p. 2809–2821, 2023.

TSYBINA, A.; WUENSCH, C. Analysis of sewage sludge thermal treatment methods in the context of circular economy. **Detritus**, 2(1), p. 3, 2018.

WANG, H.; EYK, P.J.V.; MEDWELL, P.R.; BIRZER, C.H.; TIAN, Z.F.; POSSELL, M.; HUANG, X. Air Permeability of the Litter Layer in Broadleaf Forests. **Front. Mech. Eng.** 5:53, 2019, doi: 10.3389/fmech.2019.00053.

WANG, H.; TAO, Y.; TERMUDO, M.; BIJL, H.; KLOEK, J.; REN, N.; VAN LIER, J.B.; DE KREUK, M. Biomethanation from enzymatically hydrolyzed brewer's spent grain: Impact of rapid increase in loadings. **Bioresource Technology**, v. 190, p. 167–174, 2015.

WHITE, J.S.; YOHANNAN, B.K.; WALKER, G.M. Bioconversion of brewer's spent grains to bioethanol. **FEMS Yeast Research**, v. 8, p. 1175–1184, 2008.

WILKINSON, S.; SMART, K.A.; COOK, D.J. A comparison of diluted acid- and alkalically catalyzed hydrothermal pretreatments for bioethanol production from brewers' spent grains. **J. Am. Soc. Brew. Chem.**, 72, p. 143–153, 2014, <https://doi.org/10.1094/ASBCJ-2014-0327-02>.

WILKINSON, S.; SMART, K.A.; JAMES, S.; COOK, D.J. Bioethanol production from brewers spent grains using a fungal consolidated bioprocessing (CBP) approach. **BioEnergy Research**, 10, p. 146–157, 2017.

YAO, Z.; REINMÖLLER, M.; ORTUÑO, N.; ZHOU, H.; JIN, M.; LIU, J.; LUQUE, R. Thermochemical conversion of waste printed circuit boards: Thermal behavior, reaction kinetics, pollutant evolution and corresponding controlling strategies. **Progress in Energy and Combustion Science**, 97, p. 101086, 2023.

YI, J. et al. Drying efficiency and product quality of biomass drying: a review. **Drying Technology**, v. 38, n. 15, p. 2039–2054, 2020.

ZHANG, J.; ZANG, L. Enhancement of biohydrogen production from brewer's spent grain by calcined-red mud pretreatment. **Bioresource Technology**, 209, p. 73–79, 2016.

ZHENG, Z.; LIN, X.; YANG, M.; HE, Z.; BAO, E.; ZHANG, H.; TIAN, Z. Progress in the Application of Machine Learning in Combustion Studies. **ES Energy & Environment**, 9 (2), p. 1-14, 2020. <https://dx.doi.org/10.30919/esee8c795>.