



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
CAMPUS DE ITAJUBÁ
MESTRADO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Leandro Galvão de Oliveira

Caracterização de Resíduos de Coco Para Aplicações de Biomassa

Itajubá - MG

2024

Leandro Galvão de Oliveira

Caracterização de Resíduos de Coco Para Aplicações de Biomassa

Dissertação submetida ao mestrado de engenharia de energia pela Universidade Federal de Itajubá – campus de Itajubá, para a obtenção do título de mestre em engenharia de energia.

Orientador: Prof. Dr. Hugo Perazzini

Itajubá – MG

2024

Leandro Galvão de Oliveira

Caracterização de Resíduos de Coco Para Aplicações de Biomassa

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Hugo Perazzini

Instituição UNIFEI

Prof^a. Dra. Maria Luiza Grillo Reno

Instituição UNIFEI

Prof. Dr. Robson Costa de Sousa

Instituição UFES

Coordenação do Mestrado em Engenharia de Energia

Prof. Dr. Hugo Perazzini

Orientador

AGRADECIMENTOS

Em Primeiro lugar a Deus, por ter permitido que eu tivesse saúde e determinação para não desanimar durante a realização deste trabalho.

A minha esposa Patrícia, por todo o apoio e pela ajuda, que muito contribuíram para a realização deste trabalho.

Agradeço ao professor Prof. Dr. Hugo Perazzini, por ter sido meu orientador e ter desempenhado tal função com dedicação e amizade.

As alunas Carla Denise Machado e Renata de Aquino Brito Lima, que contribuíram imensamente durante todo o trabalho.

Agradecimentos ao laboratório do Professor David Bressler, Universidade de Alberta, Alberta, Canadá, pelas análises de caracterização química dos materiais estudados neste trabalho.

Agradecimentos ao laboratório do Professor Robson Costa de Sousa, Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, Brasil, pelas análises de caracterização térmica dos materiais estudados neste trabalho.

Agradeço a todos da Universidade federal de Itajubá, pelo fornecimento de dados e materiais que foram fundamentais para o desenvolvimento da pesquisa e que possibilitou a realização deste trabalho.

RESUMO

A conversão de resíduos agrícolas em energia e produtos químicos é benéfica para países em desenvolvimento, entre eles os resíduos de coco podem ser aproveitados de forma eficiente como biomassa para aplicações energéticas. O objetivo do presente trabalho é caracterizar o resíduo de coco em termos de propriedades físicas, químicas, térmica e de fluxo visando a geração de energia renovável. A casca de coco moída foi dividida em quatro frações principais de partículas constituído de fibra e pó de diâmetro médio Sauter. O endocarpo moído foi estudado como uma mistura de partículas de diferentes formatos e tamanhos. As propriedades físicas eram diferentes para diversos tamanhos e formatos de partículas, mas estão dentro da faixa relatada na literatura para biomassas. A compressibilidade das partículas foi maior para amostras com maior presença de fibras de baixa classificação de fluidez, grau de fluidez muito coesivo e velocidade terminal. Para a classificação de fluxo de partículas verificou-se grade coesão entre as partículas de CHI, CHII e CHIII, e para as partículas de CHIV e CS, foi verificado que as partículas apresentam coesão moderada, sendo que o grau mais coeso de fluidez foi encontrado para pó e amostras com menor presença de fibras, e com velocidade terminal baixa. Ambos os grupos de resíduos moídos A e B apresentaram baixa permeabilidade ao fluxo de fluido. Com relação a composição química dos grupos A e B, foi encontrado valores semelhantes as obtidas na literatura, sendo encontrados valores expressivos para os elementos Hidrogênio e Oxigênio. Os resultados obtidos para a massa também correspondem aos encontrados na literatura, variando entre as partículas de CHI com densidade mais baixa e as partículas do grupo CHIV apresentado densidade mais elevada. Para a densidade aparente dos grupos de partículas observou-se a mesma variação entre as partículas de CHI e CHIV respectivamente. Determinou-se ainda a capacidade térmica, condutividade térmica, teor de cinzas e análise termogravimétrica, para os grupos de partículas primários A e B, indicando que a biomassa possuir valores significativos para seu aproveitamento como fonte de bioenergia.

Palavras-chave: Separação aerodinâmica; fluidização; escoabilidade; propriedades físicas; propriedades químicas; propriedades termelétricas; pó; energia renovável.

ABSTRACT

Converting agricultural waste into energy and chemicals is beneficial for developing countries. Coconut waste can be efficiently used as biomass for energy applications. The objective of this work is to characterize coconut residue in terms of physical, chemical, thermal and flow properties with a view to generating renewable energy. The ground coconut shell was divided into four main particle fractions consisting of fiber and Sauter medium diameter powder. The ground endocarp was studied as a mixture of particles of different shapes and sizes. The physical properties were different for different particle sizes and shapes, but are within the range reported in the literature for biomasses. The compressibility of the particles was greater for samples with a greater presence of fibers with a low fluidity classification, a very cohesive degree of fluidity and terminal velocity. For the classification of particle flow, the cohesion between the CHI particles was verified, CHII and CHIII, and for CHIV and CS particles, it was found that the particles present moderate cohesion, with the most cohesive degree of fluidity being found for powder and samples with less presence of fibers, and with low terminal velocity. Both milled waste groups A and B showed low permeability to fluid flow. Regarding the chemical composition of groups A and B, values similar to those obtained in the literature were found, with significant values being found for the elements Hydrogen and Oxygen. The results obtained for the real specific mass also correspond to those found in the literature, varying between CHI particles with lower density and particles from the CHIV group with higher density. For the apparent density of the groups of particles, the same variation was observed between the CHI and CHIV particles respectively. The thermal capacity, thermal conductivity, ash content and thermogravimetric analysis were also determined for the primary particle groups A and B, indicating that the biomass has significant values for its use as a source of bioenergy.

Keywords: *Aerodynamic separation; fluidization; eco-ability; physical properties; chemical properties; thermoelectric properties; dust; renewable energy.*

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - SEGMENTOS DA CASCA DO COCO VERDE.....	22
FIGURA 2 - COMPOSIÇÃO DA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA SEGUNDO O BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL (BEM) PARA O ANO DE 2022.	25
FIGURA 3 - GRUPOS DE PARTÍCULAS ESTUDADOS NESTE TRABALHO: O GRUPO A REFERE-SE À CASCA DO COCO (EPICARPO E GRUPO B ENDOCARPO (ENDOCARPO E COPRA).....	31
FIGURA 4 - AMOSTRAS DO GRUPO A (CASCA DE COCO, CH) OBTIDAS APÓS MOAGEM: CHI (FIBRAS), CHII (PARTÍCULAS GROSSAS), CHIII (PARTÍCULAS FINAS), CHIV (PÓ).	32
FIGURA 5 - AMOSTRAS DO GRUPO B (ENDOCARPO, CS) OBTIDAS APÓS MOAGEM: IRREGULARES, GROSSAS E PARTÍCULAS FINAS.	32
FIGURA 6- DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS AMOSTRAS UTILIZADAS NESTE TRABALHO CONSIDERANDO AS PENEIRAS ABERTURA: CHI, CHII, CHIII, CHIV E CS.....	33
FIGURA 7 - IMAGENS SEGMENTADAS DAS AMOSTRAS CHI, CHII, CHIII, CHIV E CS, DURANTE A GERAÇÃO DA IMAGEM PROCEDIMENTO DE PROCESSAMENTO NO SOFTWARE IMAGEJ.....	36
FIGURA 8 - ESQUEMA DO APARELHO DESENVOLVIDO PARA MEDIR O ÂNGULO DE REPOUSO: D É O DIÂMETRO DA ABERTURA DO FUNIL, D O DIÂMETRO DA PILHA DE PARTÍCULAS E H A ALTURA DA PILHA.....	40
FIGURA 9 - APARATO EXPERIMENTAL UTILIZADO PARA OS ENSAIOS DE PERMEAMETRIA.....	41
FIGURA 10- ANALISADOR DE UMIDADE MODELO (HALOGEN MOISTURE ANALYZER HE53, METTLER TOLEDO).....	44
FIGURA 11 - ANALISADOR TERMO GRAVIMÉTRICO MODELO (TGA 8000, PERKIN ELMER).....	45
FIGURA 12- ESQUEMA DA CÉLULA PARA A DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA EFETIVA NA ESTAGNAÇÃO.....	47
FIGURA 13- DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DA BIOMASSA MOÍDA DA CASCA DE COCO (CH) E DA CASCA DE COCO (CS): FRAÇÃO DE MASSA RETIDA POR DIÂMETRO MÉDIO.	50
FIGURA 14 - FIGURA DE AMOSTRAS DE CASCA DE COCO MOÍDA (CH) E ENDOCARPO (CS), FEITAS ATRAVÉS DA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	55
FIGURA 15 - VARIAÇÃO DA DENSIDADE DO LEITO DE PARTÍCULAS À MEDIDA QUE A COMPACTAÇÃO AUMENTA DEVIDO OS SUCESSIVOS TOQUES, PARA AS PARTÍCULAS DO GRUPO A (CH) E GRUPO B (CS).....	57

FIGURA 16 - ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE MASSA PELA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA, SENDO CONSIDERADAS A AMOSTRA DE CH, (GRUPO A), VARIANDO-SE A TEMPERATURA DE 5 °C, 10 °C, 15 °C E 40 °C NO INTERVALO DE 1 MINUTO.	64
FIGURA 17 - ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE MASSA PELA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA, SENDO CONSIDERADAS A AMOSTRA DE CS, (GRUPO A), VARIANDO-SE A TEMPERATURA DE 5 °C, 10 °C, 15 °C E 40 °C NO INTERVALO DE 1 MINUTO.	64
FIGURA 18 - AJUSTE LINEAR PARA AS AMOSTRAS DE CH (GRUPO A) E CS (GRUPO B), COM DADOS OBTIDOS NO PROCESSO DE DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA, ONDE ANALISOU-SE A VARIAÇÃO DE TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO DESCOLAMENTO.	66
FIGURA 2 - MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA 2022.	25
FIGURA 3 - GRUPOS DE PARTÍCULAS ESTUDADOS NESTE TRABALHO: O GRUPO A REFERE-SE À CASCA DO COCO (EPICARPO E GRUPO B ENDOCARPO (ENDOCARPO E COPRA).	31
FIGURA 4 - AMOSTRAS DO GRUPO A (CASCA DE COCO, CH) OBTIDAS APÓS MOAGEM: CHI (FIBRAS), CHII (PARTÍCULAS GROSSAS), CHIII (PARTÍCULAS FINAS), CHIV (PÓ).	32
FIGURA 5 - AMOSTRAS DO GRUPO B (ENDOCARPO, CS) OBTIDAS APÓS MOAGEM: IRREGULARES, GROSSAS E PARTÍCULAS FINAS.	32
FIGURA 6 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS AMOSTRAS UTILIZADAS NESTE TRABALHO CONSIDERANDO AS PENEIRAS ABERTURA: CHI, CHII, CHIII, CHIV E CS.	33
FIGURA 7 - IMAGENS SEGMENTADAS DAS AMOSTRAS CHI, CHII, CHIII, CHIV E CS, DURANTE A GERAÇÃO DA IMAGEM PROCEDIMENTO DE PROCESSAMENTO NO SOFTWARE IMAGEJ.	36
FIGURA 8 - ESQUEMA DO APARELHO DESENVOLVIDO PARA MEDIR O ÂNGULO DE REPOUSO: D É O DIÂMETRO DA ABERTURA DO FUNIL, D O DIÂMETRO DA PILHA DE PARTÍCULAS E H A ALTURA DA PILHA.	40
FIGURA 9 - APARATO EXPERIMENTAL UTILIZADO PARA OS ENSAIOS DE PERMEAMETRIA.	41
FIGURA 10 - ANALISADOR DE UMIDADE MODELO (HALOGEN MOISTURE ANALYZER HE53, METTLER TOLEDO, MISSISSAUGA, CANADÁ)	44
FIGURA 11 - ANALISADOR TERMO GRAVIMÉTRICO MODELO (TGA 8000, PERKIN ELMER, MISSISSAUGA, CANADÁ).	45
FIGURA 12 - ESQUEMA DA CÉLULA PARA A DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA EFETIVA NA ESTAGNAÇÃO.	47
FIGURA 13 - DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DA BIOMASSA MOÍDA DA CASCA DE COCO (CH) E DA CASCA DE COCO (CS): FRAÇÃO DE MASSA RETIDA POR DIÂMETRO MÉDIO.	50

FIGURA 14 - FIGURA DE AMOSTRAS DE CASCA DE COCO MOÍDA (CH) E ENDOCARPO (CS), FEITAS ATRAVÉS DA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	55
FIGURA 15 - VARIAÇÃO DA DENSIDADE DO LEITO DE PARTÍCULAS À MEDIDA QUE A COMPACTAÇÃO AUMENTA DEVIDO OS SUCESSIVOS TOQUES, PARA AS PARTÍCULAS DO GRUPO A (CH) E GRUPO B(CS).....	57
FIGURA 16 - ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE MASSA PELA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA, SENDO CONSIDERADAS A AMOSTRA DE CH, (GRUPO A), VARIANDO-SE A TEMPERATURA DE 5 °C, 10 °C, 15 °C E 40 °C NO INTERVALO DE 1 MINUTO.	64
FIGURA 17 - ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE MASSA PELA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA, SENDO CONSIDERADAS A AMOSTRA DE CS, (GRUPO A), VARIANDO-SE A TEMPERATURA DE 5 °C, 10 °C, 15 °C E 40 °C NO INTERVALO DE 1 MINUTO.	64
FIGURA 18- AJUSTE LINEAR PARA AS AMOSTRAS DE CH (GRUPO A) E CS (GRUPO B), COM DADOS OBTIDOS NO PROCESSO DE DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA, ONDE ANALISOU-SE A VARIAÇÃO DE TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO DECOLAMENTO.....	66

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 : CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA, QUÍMICA E FÍSICA DA BIOMASSA DE COCO VERDE E SUA COMPOSIÇÃO.....	26
TABELA 2: PROPRIEDADES FÍSICAS E CLASSIFICAÇÃO DO GRUPO GELDART CORRESPONDENTE DO COCO MOÍDO CASCA (CH, GRUPO A) E ENDOCARPO (CS, GRUPO B).....	51
TABELA 3: FATORES DE FORMA E DIMENSÕES DAS PARTÍCULAS DA CASCA DE COCO MOÍDA (CH, GRUPO A) E ENDOCARPO (CS, GRUPO B).....	52
TABELA 4: ANÁLISE DOS PRINCIPAIS FATORES ESTÁTICOS APRESENTADOS PELA AMOSTRA DE PARTÍCULAS DA CASCA MOÍDA (CHIV, GRUPO A).....	52
TABELA 5: ANÁLISE DOS PRINCIPAIS FATORES ESTÁTICOS APRESENTADOS PELA AMOSTRA DE PARTÍCULAS DA CASCA MOÍDA (CHIII, GRUPO A).....	52
TABELA 6: ANÁLISE DOS PRINCIPAIS FATORES ESTÁTICOS APRESENTADOS PELA AMOSTRA DE PARTÍCULAS DA CASCA MOÍDA (CHII, GRUPO A).....	53
TABELA 7: ANÁLISE DOS PRINCIPAIS FATORES ESTÁTICOS APRESENTADOS PELA AMOSTRA DE PARTÍCULAS DA CASCA MOÍDA (CHI, GRUPO A).....	53
TABELA 8: ANÁLISE DOS PRINCIPAIS FATORES ESTÁTICOS APRESENTADOS PELA AMOSTRA DE PARTÍCULAS DA ENDOCARPO (CS, GRUPO B).....	53
TABELA 9: DENSIDADE APARENTE E POROSIDADE SOLTA E COMPACTADA PARA CARACTERIZAÇÃO DO FLUXO DA CASCA DE COCO (CH, GRUPO A) E CASCA (CS, GRUPO B).....	56
TABELA 10: RAZÃO DE HAUSNER, ÍNDICE DE COMPRESSIBILIDADE DE CARR E ÂNGULO DE REPOUSO DA CASCA DE COCO MOÍDA (CH, GRUPO A) E ENDOCARPO (CS, GRUPO B).....	58
TABELA 11: CLASSIFICAÇÃO DO FLUXO E GRAU DE FLUIDEZ EM RELAÇÃO AO ÂNGULO DE REPOUSO E À AMPLITUDE DE RAZÃO DE HAUSNER, ÍNDICE DE COMPRESSIBILIDADE DE CARR E ÂNGULO DE REPOUSO FORNECIDOS PELA LITERATURA PARA OS RESULTADOS OBTIDOS A PARTIR DA CASCA DE COCO MOÍDA (CH, GRUPO A) E DO ENDOCARPO (CS, GRUPO B).....	59
TABELA 12: DADOS EXPERIMENTAIS DE PERMEAMETRIA E VALORES PREVISTOS PARA CASCA DE COCO MOÍDA (CH, GRUPO A) E ENDOCARPO (CS, GRUPO B).....	60
TABELA 13: VELOCIDADE TERMINAL E COEFICIENTE DE ARRASTO PARA DIFERENTES TIPOS DE CASCA DE COCO MOÍDA (CH, GRUPO A) E ENDOCARPO (CS, GRUPO B).....	60
TABELA 14: DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA PRESENTE EM BASE ÚMIDA E SECA, PARA AS AMOSTRAS DO GRUPO A (CH) E GRUPO B (CS).....	61

TABELA 15: ANÁLISE DA UMIDADE RELATIVA CONTIDAS NAS PARTÍCULAS DOS GRUPOS A(CH) E B(CS), EM BASE SECA E ÚMIDA.....	62
TABELA 16: MASSA INICIAL DA AMOSTRA (M_A), MASSA FINAL DA AMOSTRA (M_F) E TEOR DE CINZAS OBTIDOS PARA AS AMOSTRAS DO GRUPO A MOÍDAS (CH) E PARA AS AMOSTRAS DO GRUPO B (CS), TAMBÉM MOÍDAS.	63
TABELA 17-CONDUTIVIDADE TÉRMICA OBTIDAS PARA AS AMOSTRAS DO GRUPO A (CH) E PARA A AMOSTRA DO GRUPO B (CS).	65
TABELA 18: RESULTADOS PARA AS AMOSTRAS DE GRUPO A (CH) E PARA AS AMOSTRAS DO GRUPO B (CS), DO PODER CALORÍFICO DAS PARTÍCULAS EM ESTUDO.	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIR- Associação Brasileira das Indústrias de Refrigerantes

BEN - Balanço Energético Nacional

EMBRAPA - Brasileira de Pesquisa Agropecuária Embrapa

EPE- Empresa de Pesquisa Energética

FAO - Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

CEASAS - Centrais de Abastecimento

NOMENCLATURA

- A - Área lateral do cilindro, [m²]
 A_m - Amostra
 AR - Razão de aspecto, [mm]
 A_p - Área projetada da partícula, [mm²]
 C - Circularidade
 C_D - Coeficiente de arrasto
 CCI - Índice de compressibilidade de Carr
 c - Parâmetro de ajuste
 D - Diâmetro do montículo de resíduo, [mm]
 d - Diâmetro do Funil, [mm]
 d_p^2 - Correção do diâmetro da partícula
 d_{eq} - Diâmetro esférico equivalente bidimensional, [mm]
 d_i - Diâmetro médio, [mm]
 d_{pI} - Diâmetros circunscrito, [mm]
 d_{pII} - Diâmetros inscrito, [mm]
 d_{sv} - Diâmetro de Sauter, [mm]
 E_l - Grau de alongamento
 F_E - Fator estatístico
 g - Aceleração gravitacional, [m s⁻²]
 G_p - Grupo
 H - Altura do montículo de resíduo, [mm]
 HR - Razão de Hausner
 k - Permeabilidade
 k - Condutividade térmica, [W/m K]
 k_{eff} - Condutividade térmica efetiva, [W/m K]
 k_g - Condutividade térmica do gás, [W/m K]
 k_s - Condutividade térmica do sólido, [W/m K]
 L - Comprimento, [mm]
 m_a - Massa da Amostra, [g]
 m_{fa} - Massa final da Amostra, [g]

m_s - Massa de sólido, [kg]
 m_p - Massa das partículas, [Kg]
 m_s - Massa total de sólidos, [Kg]
 P - Potência dissipada, [W]
 P - Perímetro da partícula, [mm]
 Q - Taxa de transferência de calor, [W]
 q - Fluxo de calor, [W/m²]
 r - Posição radial, [m]
 r_l - Raio de referência, [m]
 T - Temperatura, [°C]
 T_c - Teor de cinzas, [%]
 T_l - Temperatura de referência (em r_l), [°C]
 t - Tempo, [s]
 V_m - Volume do meio poroso, [m³]
 V_p - Volume total da partícula, [mm³]
 V_{pores} - Volume dos poros fechados e abertos das partículas, [mm³]
 V_r - Volume real do sólido, [mm³]
 V_s - Volume real da partícula, [mm³]
 V_{lb} - Volume de amostra solta, [mm³]
 V_{tb} - Volume das partículas compactadas, [mm³]
 v - Velocidade superficial do ar, [m s⁻¹]
 v_t - Velocidade terminal, [m s⁻¹]
 x_i - Fração de massa, [%]
 y_i - Frequência cumulativa
 W - Largura, [mm]
 β - Parâmetro estrutural associado à tortuosidade
 ε_b - Porosidade da Aparente, [%]
 ε_p - Porosidade da partícula, [%]
 ε_{tb} - Porosidade do leito vazado, [%]
 ε_{lb} - Porosidade leito solto, [%]
 μ - Viscosidade do ar, [m s⁻¹]

θ - Ângulo de repouso, [°]

ρ_p - Densidade Aparente de partículas, [Kg m⁻³]

ρ_{lb} - Densidade aparente solta, [Kg m⁻³]

ρ - Densidade do ar, [Kg m⁻³]

ρ_r - Densidade real das partículas, [Kg m⁻³]

φ - Esfericidade

ΔP - Queda de pressão

Tc [%] - Teor de cinzas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
2 REVISÃO BIBLIOFÁGICA	20
2.1 PANORAMA DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS NO BRASIL	20
2.2 GENERALIDADES DO COCO	21
2.3 RESÍDUOS DE COCO	23
2.4 ENERGIA RENOVÁVEL NO BRASIL	24
2.5 RESÍDUOS DE COCO PARA ENERGIA RENOVÁVEL.....	25
2.5.1 Briquetes a partir dos resíduos de coco	27
2.5.2 Caracterização do Resíduo de Coco	28
3 MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS DE COCO E PREPARAÇÃO DE AMOSTRA.....	30
3.2 DIÂMETRO MÉDIO DAS PARTÍCULAS E DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DA FREQUÊNCIA	33
3.3 FATORES DE FORMA	34
3.4 MORFOLOGIA DAS PARTÍCULAS	36
3.5 DENSIDADE	36
3.6 POROSIDADE.....	38
3.7 COMPRESSÃO EM MASSA.....	38
3.8 ÂNGULO DE REPOUSO.....	39
3.9 PERMEABILIDADE.....	40
3.10 VELOCIDADE TERMINAL.....	42
3.11 ANÁLISE QUÍMICA.....	43
3.12 TEOR DE UMIDADE.....	43
3.13 ANÁLISE TERMO GRAVIMÉTRICA (TGA).....	44
3.14 CONDUTIVIDADE TÉRMICA EFETIVA	45
3.15 APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO RESÍDUO DE COCO.....	47
4 RESULTADOS	49
4.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....	49

4.2 PROPRIEDADES DE FLUIDEZ.....	55
4.3 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DAS AMOSTRAS.....	61
4.3.1 Composição Química	61
4.3.2 Teor de Umidade.....	62
4.3.3 A análise Termo gravimétrica (TGA).....	62
4.3.4 Determinação da Condutividade térmica efetiva	65
4.3.5 Poder calorífico para o resíduo de coco	66
5 CONCLUSÃO.....	67
6 TRABALHOS FUTUROS.....	69
7 REFERÊNCIAS.....	70

1 INTRODUÇÃO

A utilização de resíduos agroindustriais para geração de energia renovável e produção de biocombustíveis é uma alternativa ambientalmente favorável e economicamente viável, dada a abundância de biomassa de baixo custo e relativamente fácil de obter. Portanto, há um esforço significativo para identificar métodos alternativos de agregação de energia e reaproveitamento de resíduos sólidos com foco na minimização do impacto ambiental dos processos agroindustriais (Barrozo et al., 2019). A colheita e o processamento de produtos agrícolas geram grande quantidade de resíduos sólidos com diferentes características e propriedades, incluindo sementes, grãos, caroços, cascas, folhas, fibras, galhos e caules; todos considerados fontes potenciais de biomassa. Disponíveis em abundância, os resíduos agroindustriais podem ser utilizados como matéria-prima para a geração eficiente de energia verde, desde que seja empregada tecnologia adequada (Mishra et al., 2023). Portanto, a utilização de toda a biomassa disponível para a produção de energia de forma sustentável é um desafio fundamental na redução dos níveis de emissões e deve ser foco de estudo. Para utilizar eficientemente os resíduos agroindustriais na produção de energia renovável do ponto de vista ambiental, social e econômico, a biomassa gerada deve provir de uma cultura com baixos custos de manutenção e estar disponível durante todo o ano, garantindo um abastecimento constante, assim como o caso da produção de coco.

O coco é uma fruta tropical amplamente cultivada em países que se beneficiam de luz solar e água abundantes, principalmente áreas costeiras e ilhas tropicais da África, Ásia e América Latina (Araújo et al., 2024). É uma cultura versátil e vital que desempenha um papel significativo nas economias e culturas dos países produtores (Worldstats, 2024). A produção global anual de coco é de aproximadamente 62,4 milhões de toneladas em 2022, demonstrando a importância da cultura na agricultura global (Worldstats, 2024). No mesmo ano, o coco foi o 1,584º produto mais comercializado no mundo, com um comércio total de 1,82 mil milhões de dólares (OEC, 2024). Porém, como 85% do peso bruto total do coco é resíduo, o volume gerado é bastante significativo (Nunes et al., 2020). Só em 2022, foram geradas 53,04 toneladas de resíduos de coco em todo o mundo. Esses resíduos criam problemas para o meio ambiente porque são difíceis de se decompor ou degradar naturalmente (Sa'diyah et al., 2018). Nesse sentido, utilizar resíduos da cadeia produtiva do coco como biomassa para energia renovável,

além de favorecer a preservação ambiental, pode gerar empregos e renda, visando contribuir para o desenvolvimento regional. Isto é especialmente atrativo dado o baixo custo e a disponibilidade de grandes quantidades de matéria-prima para este material (Nunes et al., 2020). Embora a digestão anaeróbica possa ser uma alternativa ao uso de resíduos de coco como biocombustível (Azeta et al., 2021), a geração de energia térmica a partir de processos de pirólise pode ser considerada uma alternativa viável e interessante para abastecer e diversificar a cadeia energética dos países geradores desse resíduo (Azeta et al., 2021; Ashwini et al., 2024). Ahmad et al. (2022) constataram que a biomassa de casca de coco apresenta desempenho superior em relação a outras biomassas em termos de teor de energia e carbono, o que torna o processo de pirólise atrativo, bem como as qualidades do bio-óleo (Figueiredo et al., 2022) e do biochar (Ajien et al., 2022) como combustíveis com excelentes características para combustão. Por outro lado, as diferentes características físicas e químicas de cada constituinte dos resíduos do cultivo do coco, como casca, endocarpo, folhas e copra, representam desafios para o uso eficaz e, tradicionalmente, têm se mostrado muito difíceis de serem superados (Marafon et al., 2020). A casca de coco verde e o endocarpo são os principais constituintes viáveis para aplicações de biomassa devido ao atrativo conteúdo de lignina, celulose e hemicelulose (Azeta et al., 2021; Ighalo et al., 2023).

Para o processo de pelletização, a caracterização das partículas é importante, pois esse processo homogeneiza as propriedades do material em tamanho de partícula e teor de umidade e facilita o manuseio e fluidez do material (Rezaei et al., 2020).

A caracterização do pellet de biomassa é crucial para garantir condições ótimas de combustão da biomassa (Rezaei et al., 2024). Isto levou a maioria dos investigadores a envidar esforços consideráveis na caracterização física dos resíduos para a sua utilização como combustível, tais como madeira, folhas, cascas e resíduos de vagens de *Prosopis africana* (Uzogba et al., 2024), bagaço de cana-de-açúcar, palha de cana-de-açúcar, bambu e galhos de mandioca (Ramirez-Quintero e Bizzo, 2023), biomassa de seringueira (Beh et al., 2021), casca moída e madeira moída chips (Rezaei e Sokhansanj, 2018), por exemplo. Segundo os autores, dependendo de sua origem, morfologia, natureza e heterogeneidade, as partículas de biomassa diferem umas das outras, levando a um desafio significativo no uso prático de resíduos como combustível de biomassa. As diferentes características físicas das partículas para um mesmo tipo de biomassa impactam diretamente na forma como ela é processada, transportada e

armazenada, bem como na quantidade de energia fornecida por unidade de massa e nas substâncias liberadas durante o processo termoquímico (Ahmad et al., 2022).

Neste contexto, a caracterização das partículas é essencial para garantir uma etapa de pré-tratamento segura, eficaz, controlada e otimizada integrada ao processo de conversão. A caracterização de partículas de biomassa permite um conhecimento profundo das propriedades físicas e de fluidez, aspectos fundamentais para o projeto, simulação e otimização dos processos de pré-tratamento de biomassa, especialmente considerando aplicações em larga escala e geração eficiente de energia verde. Por outro lado, existe uma lacuna notável na caracterização fundamental das propriedades físicas e de fluxo dos principais resíduos de coco (casca e endocarpo) numa abordagem de energia renovável. Até muito recentemente, o valor intrínseco das propriedades físicas da casca de coco e da casca endocarpo como fonte de combustível ou como fonte de energia não foi totalmente desenvolvido ou explorado, em parte devido às características complexas e variadas dos resíduos de coco (DP Clean Tech, 2024).

Assim, o objetivo principal deste trabalho foi realizar uma caracterização dos resíduos de coco verde, com ênfase na identificação das propriedades físicas, químicas, de fluxo e térmicas que influenciam sua utilidade como biomassa para energias renováveis. Esta análise permitirá uma compreensão mais profunda da estrutura, composição e aplicações da casca do coco verde para o desenvolvimento de tecnologias práticas de processamento e conversão, bem como para a otimização de seu aproveitamento em outras diversas aplicações.

Com essa pesquisa, busca-se contribuir para o avanço do conhecimento na área de biomassa e para a promoção de práticas mais conscientes de gestão de resíduos, alinhando-se com os objetivos globais de sustentabilidade e redução das emissões de gases de efeito estufa. Ao longo deste trabalho, serão abordados métodos de caracterização que abordarão análises microscópicas e técnicas de análise química, por fim de garantir uma compreensão completa da composição da casca de coco verde.

2 REVISÃO BIBLIOFÁGICA

2.1 PANORAMA DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS NO BRASIL

A busca por fontes de energias renováveis tem contribuído com a diversificação da matriz energética Brasileira, direcionando a utilização de recursos naturais que promovam o uso de forma sustentável destas fontes e contribuindo para o desenvolvimento social, ambiental e econômico. Em sua vasta extensão, o Brasil se destaca pela grande utilização das fontes de energia renováveis, destacando-se a fonte hídrica, que corresponde a 64% da matriz elétrica nacional, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2023), apontando para o ano de 2023 uma utilização 58,9% deste recurso, sendo que esta fonte compõem a oferta interna de energia renovável, que corresponde a 49,1% destes recursos, como Biomassa da cana de açúcar (16,9%), Eólica (2,6%), Lenha e carvão vegetal (8,6%), licor preto e outras renováveis (7,2%) e a solar (1,7%). No entanto, a geração de energia através das hidrelétricas está sujeita a intermitência do regime sazonal de chuvas, que afetam diretamente a geração de energia (Caldeira et al., 2023). fazendo-se necessária a compra de energia de países vizinhos e os acionamentos das termelétricas, uma vez que a geração de energia elétrica pelas hidrelétricas é insuficiente neste cenário (ANEEL, 2022), promovendo a emissão de CO₂ para a atmosfera, o que justifica a busca por fontes renováveis de energia que possam compor a matriz elétrica Brasileira, como a biomassa.

O Brasil é um país que possui uma grande atividade agrícola que vem aumentando ao longo dos anos, onde cerca de 24,31% correspondem ao aumento do agronegócio no país, o colocando como um grande gerador de resíduos, pela população Brasileira (Costa et al., 2022), destacando-se como fonte de resíduos a produção de cana de açúcar, que atingiu entre os anos de 2019 e 2020, 35 milhões de m³ de caldo de cana, gerando para isso uma grande quantidade de bagaço de cana (Boschiero et al., 2023), sendo está uma valiosa fonte de biomassa que pode ser aproveitada de forma sustentável para a geração de energia, uma vez que biomassa possui grande potencial para contribuir com a geração de energia renovável na matriz elétrica Brasileira, considerando a grande quantidade de resíduos gerados pelo setor agrícola (Ferreira et al., 2018). Isso tem levado a uma atenção crescente para o aproveitamento de biomassa

proveniente de resíduos orgânicos como uma alternativa viável aos combustíveis fósseis (Azeta et al., 2021a; Ayeni et al., 2021). Em paralelo a geração de resíduos como o bagaço, outros resíduos como a casca de coco verde se mostram como uma fonte de biomassa promissora, que também pode contribuir para a redução da dependência de recursos não renováveis, mitigando os impactos ambientais associados à geração desses resíduos (Agrizzi et al., 2024).

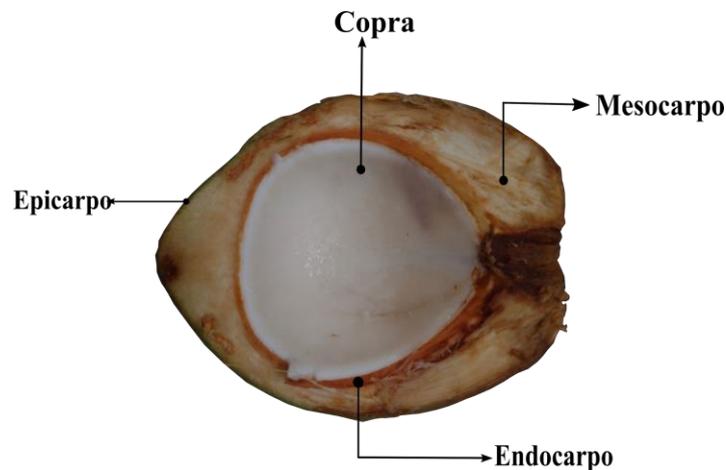
O Resíduo de coco, amplamente gerada como subproduto da indústria do coco, apresenta potencial para a produção de bioenergia, além de uma variedade de produtos de alto valor agregado. No entanto, a casca de coco verde, uma parte substancial do coco, muitas vezes é subutilizada ou descartada de maneira irregular (Wang, 2020; Nunes et al., 2020). Esse desperdício representa um problema ambiental significativo, uma vez que a disposição da casca de coco em aterros sanitários gera emissões de metano, um poderoso gás de efeito estufa (Adeniyi et al., 2021; Corradini et al., 2009a).

O Resíduo de coco é composta por uma matriz complexa de partículas orgânicas e inorgânicas, incluindo fibras, lignina, celulose e minerais (Moura et al., 2019). Essa composição única torna os resíduos de coco uma biomassa ambientalmente significativa, com aplicação no setor energético (Lopes e Tannous, 2022). No entanto, para explorar plenamente o potencial da casca do coco verde e do endocarpo como biomassa, é fundamental realizar uma caracterização na qual propriedades químicas, físicas e térmicas podem ser conhecidas para aplicações de bioenergia. A caracterização do resíduo de coco é um passo fundamental para a valorização do potencial dessa biomassa como uma fonte versátil e sustentável de energia e subprodutos de alto valor.

2.2 GENERALIDADES DO COCO

O coco é uma fruta constituída por epicarpo caracterizado como a parte de coloração verde do fruto e mesocarpo composto por fibras e pó correspondendo a 70% do volume do fruto e 30% correspondendo ao endocarpo (Marafon et.al., 2020), que é caracterizado pela parte mais rígida, a copra caracterizada pela parte branca interna do fruto, embrião e água de coco Figura 1.

Figura 1 - Segmentos da casca do coco verde.



Fonte: Autoria própria

Os dados apresentados demonstram um aumento significativo na produção de coco verde nos últimos anos, impulsionado principalmente pela crescente demanda por água de coco sendo a indústria de envase responsável por grande parte desse consumo. Nas CEASAS (Centrais de Abastecimento) dos estados nacionais foram comercializados no total de 218,3 mil toneladas de coco em 2020, mesmo sendo uma quantidade relativamente menor do que em 2019, devido a interrupção no fornecimento por causa da pandemia que prejudicou o mercado. Já para o mercado externo, em 2019, as exportações mundiais somaram US\$ 3,6 bilhões. Para janeiro de 2021 o Brasil exportou 688 toneladas de coco correspondendo ao valor de US\$ 927 mil, sendo que para o mesmo período os volumes foram 11 vezes maiores, sendo as regiões Nordeste e Sudeste responsáveis pelas maiores transações (Brainer, 2021), embora o uso do coco não se restrinja apenas a esse setor.

No entanto, muitas vezes esses resíduos são descartados em lixões, aterros ou locais inapropriados, muitas vezes pela população, sendo o consumo per capita do mercado brasileiro de água de coco do ano 2021 correspondendo a 0,74 litros por habitantes ao ano, sendo ainda estimado um crescimento de 6% para o consumo de água de coco, segundo dados da Associação Brasileira das Indústrias de Refrigerantes (ABIR, 2023), o que tem um impacto significativo no meio ambiente (Miloa et al., 2020).

2.3 RESÍDUOS DE COCO

A biomassa proveniente do coco verde é gerada em grande quantidade, sendo produzida em diversos países em todo mundo, onde o consumo do coco promove um grande impacto ambiental devido ao seu longo período de decomposição, (Miola et al., 2020). Isso ocorre devido à natureza volumosa e fibrosa desses resíduos, o que acelera a saturação dos aterros sanitários e dificulta a gestão ambiental, (Dias et al., 2019). Esses resíduos incluem a casca de coco, e o endocarpo.

No entanto, os resíduos de coco verde composto por casca descartadas após a retirada da água podem ser utilizados de diversas maneiras (Azeta et al., 2021). Elas podem ser utilizadas como fertilizantes, substrato para compostagem, complemento na produção de concreto ecológico e até mesmo na fabricação de tijolos ecológicos. Além disso, podem ser uma fonte de energia alternativa, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis (Azeta et al., 2021). Isso é particularmente importante devido aos impactos negativos dos combustíveis fósseis na qualidade do ar, na emissão de gases de efeito estufa e no agravamento do aquecimento global, que afetam também à saúde pública as esferas econômicas e sociais.

É crucial avaliar os impactos resultantes das extensas áreas de cultivo e o destino dados aos diferentes tipos de resíduos, com foco especial nos descartes originados da produção de coco (Marafon et al., 2019). A utilização de cocos pela indústria gera uma quantidade substancial de resíduos, sendo que cerca de 80% a 85% do volume do fruto corresponde a casca descartada, gerando um grande número de resíduos proveniente do consumo de água de coco (Padilla, 2018).

Isso evidencia que o descarte do fruto tem tendência a aumentar, sendo que a demanda por água de coco está em crescimento, principalmente nas cidades litorâneas, que respondem pela maior parte do consumo, mesmo fora da alta temporada, devido também à adoção de hábitos saudáveis pela população brasileira (Dias et al., 2019).

Portanto, destacando-se a quantidade específica de resíduos gerados pelo consumo do coco verde, conforme apontado por Padilla et al. (2018), isso se torna uma preocupação significativa quando esses resíduos são descartados de maneiras incorretas no meio ambiente, como em lixões clandestinos ou mesmo nas vias urbanas das cidades litorâneas, chegando a corresponder de 70% a 80% do lixo coletado nesses locais (Oliveira, 2017). A maior parte

desses resíduos acaba sendo encaminhada para aterros sanitários, o que resulta na redução do tempo de vida útil nesses locais uma vez que a casca de coco possui um período de decomposição bastante longo, o que contribui para a contaminação do solo e da água (Costa, 2022). No entanto, a geração de resíduos provenientes do consumo da água de coco é em muitas vezes inestimável, considerando o descarte de maneira descontrolada, sendo estimado que três milhões de toneladas de coco verde não são aproveitadas por ano (Nunes et al., 2020).

2.4 ENERGIA RENOVÁVEL NO BRASIL

Os usos potenciais dos resíduos do coco verde e a utilização desses resíduos na geração de energia, apresentando-se como uma alternativa à dependência de combustíveis fósseis (Azeta et al., 2021). Isso se deve a pontos cruciais, como a poluição do ar, a emissão de gases que contribuem para o agravamento do efeito estufa e, conseqüentemente, o aquecimento global, que têm impactos significativos tanto no meio ambiente quanto na saúde da população, afetando em diversos aspectos, especialmente nas esferas econômicas e sociais.

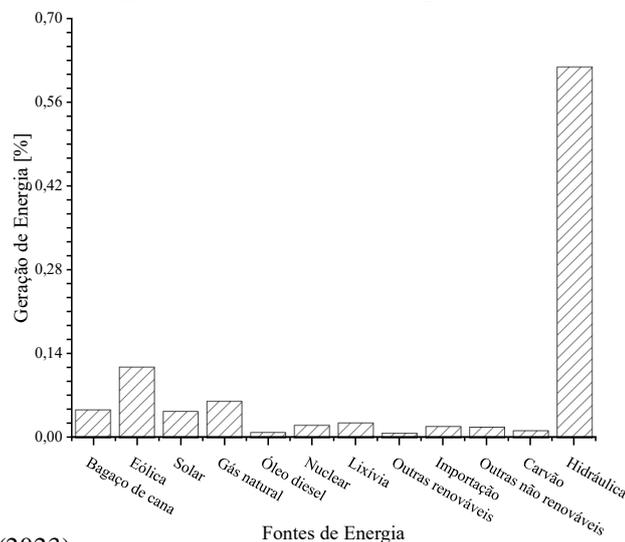
A utilização de fontes não renováveis de energia é responsável pelas emissões de gases que afetam o agravamento do efeito estufa. Essas emissões resultam do consumo de fontes não renováveis de energia, o que realça a preocupação crescente em buscar alternativas onde o uso de biomassa como os resíduos de coco verde possam ser uma alternativa para a para a geração de energia (Esteves; Abud; Barcellos, 2015).

Nesse contexto, em que as alternativas para um desenvolvimento sustentável se tornam cada vez mais cruciais, soluções como a utilização de resíduos orgânicos como biomassa se destacam como promissoras. Isso se deve à crescente geração desses resíduos pelo setor alimentar e pelo agronegócio, impulsionado pelo aumento do consumo, em uma população em crescimento (Lopes e Tannous, 2020). Essa população, ao consumir uma quantidade expressiva de alimentos, gera uma quantidade elevada de resíduos sólidos, enquanto também demanda uma quantidade elevada de energia.

Segundo o Balanço Energético Brasileiro Figura 2, em 2022, 82,8% da geração de energia no Brasil tinha origem em fontes renováveis, com destaque para a energia hidrelétrica, representando 61,9%, e a biomassa de cana-de-açúcar, contribuindo com 4,7%, juntamente com

a eólica e solar com respectivamente 11,8% e 4,4% (EPE, 2022). A reutilização dos resíduos gerados tanto pelo agronegócio quanto pelo descarte urbano, além do setor industrial, faz surgir possibilidades de fortalecer a matriz energética brasileira com base em uma maior contribuição de resíduos sólidos como biomassa. Essa abordagem se mostra promissora não apenas na redução do descarte inadequado de resíduos, mas também na integração desses resíduos na geração de energia renovável (Aslan et al., 2018). Dentro desse contexto, os resíduos do coco, com uma produção anual de 2,3 milhões de toneladas, representam uma fonte valiosa de biomassa (Lopes e Tannous, 2020).

Figura 2 – Composição da matriz elétrica Brasileira segundo o balanço energético nacional (BEM) para o ano de 2022.



Fonte: BEN (2023)

2.5 RESÍDUOS DE COCO PARA ENERGIA RENOVÁVEL

A reutilização da biomassa proveniente dos resíduos de coco aponta para a possibilidade de contribuir com a preservação do meio ambiente e também com a solução dos problemas relacionados à remoção desses resíduos de aterros sanitários, vias urbanas e locais inadequados frequentemente usados para o descarte irregular, que atingiu 70% do lixo acumulado em cidades litorâneas, contribuindo para evitar doenças, odores e contaminação do solo (Mattos et al., 2009).

Os resíduos de coco possuem uma composição de aproximadamente 39,31% de alfa celulose, 16,15% de hemicelulose, 29,79% de lignina. Além disso, os resíduos de coco se mostram ricos em celulose, polifenóis e proteínas que podem ser exploradas para a produção de enzimas, bicomustíveis e ainda catalisadores e biocarvão, onde ao observar a Tabela 1, é possível notar a presença significativa de celulose, hemicelulose, lignina e baixo teor de cinzas, o que torna a casca de coco promissora para finalidades energéticas. (Marafon et al., 2019) contribuindo para a produção de bioenergia, reforçado ainda quando se observa aos valores de PCS e PCI onde o endocarpo com (4,784 kcal kg⁻¹) apresentou valores superiores aos da casca de coco (4,358 kcal kg⁻¹) e teor de cinzas relativamente baixo para o endocarpo de (1,31%), que é menor em comparação a casca de coco, apresentado um teor de cinzas de (7,70%), o que corrobora para utilização desta biomassa para aplicações em energia.

Tabela 1 - Caracterização térmica, química e física da biomassa de coco verde e sua composição.

Característica	Casca	Endocarpo
Carbono (%)	43,3	48,7
Hidrogênio (%)	5,35	5,56
Nitrogênio (%)	0,46	0,34
Relação C/N	94,3	143,2
Celulose (%)	35,52	42,91
Hemicelulose (%)	33,41	16,76
Lignina (%)	22,28	30,95
Cinzas (%)	7,7	1,31
PCS (kcal kg ⁻¹)	4,36	4,78
PCI (kcal kg ⁻¹)	4,06	4,48
Densidade básica (g/cm ⁻³)	0,19	0,92
Densidade energética (Mcal m ⁻³)	811	4,41

Fonte: (Marafon et al., 2019)

2.5.1 Briquetes a partir dos resíduos de coco

A reutilização de resíduos de coco não se limita apenas a resíduos agrícolas como palhas, cascas e caules, podem ser aproveitados como matéria-prima para a produção de briquetes, ou que não apenas valorizam a biomassa, mas também melhoram suas propriedades (Bot et al., 2022). Os briquetes podem ser produzidos pela compactação da biomassa, o que garante vantagens em relação a outros combustíveis sólidos, como menor teor de cinzas (2% a 10% nos briquetes em comparação com 20% a 40% no carvão) e uma combustão mais eficiente (Ifa et al., 2020).

A utilização de briquetes como fonte de bioenergia surge como uma alternativa para reutilizar resíduos descartados na natureza, principalmente em países em desenvolvimento, onde a matéria prima para esta biomassa é produzida em grande escala nas áreas rurais (Promde et al., 2017). Esses briquetes são amplamente consumidos em áreas rurais e urbanas, bem como em aplicações residenciais e industriais, incluindo produção de vapor para geração de energia, fabricação de telhas e tijolos (Yusuf et al., 2020; Barcellos et al., 2015). Isso demonstra o grande potencial de uso em diversos setores, tornando-se uma fonte de energia limpa amplamente disponível para uso como combustível renovável (Raj; Tirkey; Jena, 2023).

No entanto, estudos que investigam a análise energética e econômica da produção de briquetes para diferentes tipos de biomassa, incluindo a biomassa de coco, são ainda escassos ou praticamente inexistentes. Isso é notável, considerando que a biomassa de coco está presente em diversos países, muitas vezes descartada de maneira incorreta promovendo a poluição e a degradação ambiental. Assim, essa biomassa tem potencial para a produção de briquetes de alta qualidade como apresentado por Bot et al. (2021), estimando que 1000 kg de resíduos de de coco podem produzir aproximadamente 198,5 kg de briquetes, gerando um potencial energético de 16 TJ para os briquetes produzidos a partir da biomassa do coco, demonstrando que o potencial para a utilização deste resíduo como fonte de energia é realmente promissor.

2.5.2 Caracterização do Resíduo de Coco

A caracterização da biomassa é fundamental para entender como será o comportamento durante sua utilização como fonte de energia renovável, uma vez que a dinâmica da partícula pode contribuir para perdas tanto de material como também no valor agregado, prevenindo entupimento de tubulações, saídas de silos e alimentação (Sousa; Ferreira, 2019), (Miguel et al., 2012). Isso inclui a análise de várias propriedades, como morfologia das partículas, teor de umidade, densidade, teor de cinzas, análise de imagens, ângulo de repouso e composição química, incluindo os teores de lignina, celulose e hemicelulose como apresentados em trabalhos como os de (Marafon et al., 2019), (Wang; Wang., 2019) e (Raj; Tirkey; Jena, 2023) entre outros.

Estudos de caracterização permitem identificar as características-chave que influenciam a eficiência dos processos de conversão e a qualidade da biomassa. Essas informações são essenciais para melhorar os métodos de aproveitamento da casca do coco verde e promover uma gestão mais sustentável dos resíduos, onde a caracterização da biomassa de coco de forma a destacar suas propriedades físicas vem a contribuir para uma utilização mais eficiente e economicamente viável, corroborando com estudos acerca da caracterização para um manuseio mais eficiente (Quintero e Bizzo, 2023).

Neste contexto pode-se citar alguns trabalhos relevantes para a caracterização da biomassa de coco como Miola et al. (2020), onde realizou-se estudos com a biomassa de coco in natura e para a produção de briquetes, sendo encontrados o poder calorífico de 13,6 MJ/kg para a biomassa in natura e para os briquetes, com aglutinantes água e amido, 15,6 e 11,7 MJ/kg, respectivamente.

Marafon et al. (2020) realizou trabalho similar com objetivos de utilizar o resíduo de coco para geração de energia através produção de briquetes e carvão vegetal, onde para isso verificou-se a presença expressiva para os segmentos da casca de coco e do endocarpo em quantidade de celulose, hemicelulose, lignina teores de cinzas, PCS, PCI e das demais características do fruto de coco como carbono, hidrogênio e relação de C/N.

Com foco na geração sustentável de energia a partir da pirólise da biomassa de coco Azeta et al. (2021) caracteriza a biomassa de coco como possuindo um alto teor de lignina, em média 20 MJ/kg, o que é significativamente maior do que a maioria das biomassas, indicando

ser uma biomassa com uma qualidade superior a outras biomassas agrícolas, como bagaço, casca de arroz, folha de coco.

No entanto os demais trabalhos tratam da importância da caracterização da biomassa, onde tamanhos e formas, densidades, porosidade se mostram importantes para conhecer o comportamento da partícula como apontado por Rezaei et al. (2016), aonde apontam resultados acerca da caracterização de partículas de madeira moída e cascas de madeira destacando as propriedades físicas, tamanho e forma, fluidez, secagem das partículas, concluindo que os fatores de forma das partículas influenciam em sua utilização de forma mais eficiente.

Por fim pode-se citar o trabalho realizado por Sousa e Ferreira (2019), que utilizaram como fonte de biomassa a borra de café com o objetivo de avaliar índices de fluxo de pós de café já utilizados, como tantos outros estudo caracterizações foram determinadas seguintes características, densidades da partícula, morfologia, porosidade, ângulo de repouso e razão de Hausner, concluindo que os valores obtidos para os diâmetros partículas (d_s) entre 225 a 550 μ_m , mostraram baixa fluidez para borra de café gasta com $d_s < 350 \mu_m$ e para misturas com mais de 40% de finos os valores para o ângulo de repouso das misturas da borra de café gasta foram influenciados pela distribuições de tamanho de partículas, onde maiores diâmetros apresentaram valores mais elevados para o ângulo de repouso. Contudo os valores para a razão de Hausner (HR) das misturas tiveram um significativo aumento à medida que o conteúdo mais fino e coeso aumentou.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

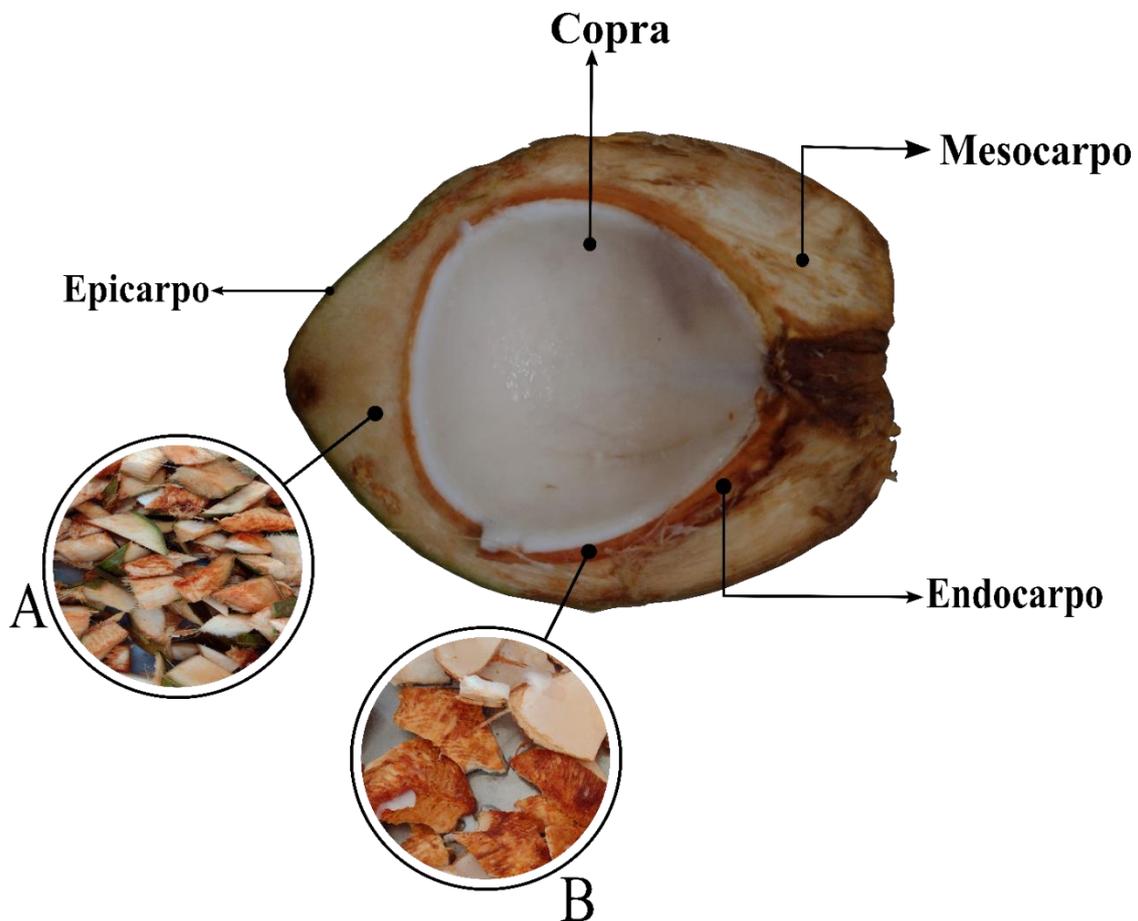
O presente estudo teve como base a caracterização do resíduo de coco para obtenção de aplicação de biomassa. As propriedades físicas, químicas, de fluxo e térmicas obtidas de acordo com a metodologia apresentada nesta seção foram a densidade, caracterização química, tamanho, forma e porosidade, sendo estes fatores importantes para utilização do resíduo. O ângulo de repouso, velocidade terminal, permeabilidade e compressibilidade do resíduo de coco foram determinadas para caracterizar as propriedades de fluxo de acordo com metodologia consolidada na literatura e a ainda a determinação da condutibilidade térmica e poder calorífico de todas as amostras.

3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS DE COCO E PREPARAÇÃO DE AMOSTRA

Cocos maduros (*Cocos nucifera*) com maturação entre seis e oito meses foram comprados no mercado local. Após a extração da água, os cocos foram cortados ao meio e os Endocarpos separados da casca. Depois, a casca e o endocarpo foram segmentados em pequenos pedaços de cerca de 0,05 m de comprimento e colocados em estufa durante 24 h a 105 ± 3 °C para reduzir a umidade inicial. As amostras secas foram divididas em dois principais grupos, sendo grupo A constituído pela casca (epicarpo e mesocarpo) e o grupo B pelo endocarpo (endocarpo e copra), conforme mostrado na Figura 3. Uma vez definidos os grupos principais, o próximo passo foi moer as amostras de cada grupo para reduzir o tamanho das amostras e facilitar os procedimentos de caracterização. Outra razão é o crescente interesse em utilizar pós de biomassa residual provenientes de resíduos agrícolas ou industriais processados para produção de energia renovável e combustíveis (Sousa et al., 2021). A moagem foi realizada usando um moedor em escala de laboratório com lâminas rotativas de alta velocidade de 400 W de potência. Após a moagem, um alto grau de heterogeneidade e partículas de formas e tamanhos variados do Grupo A foram observadas. Para explicar esse fato em ambas propriedades físicas e de fluxo, quatro grupos secundários da casca de coco (CH) foram propostos para serem estudados, nomeadamente CHI, CHII, CHIII e CHIV Figura 4. CHI é

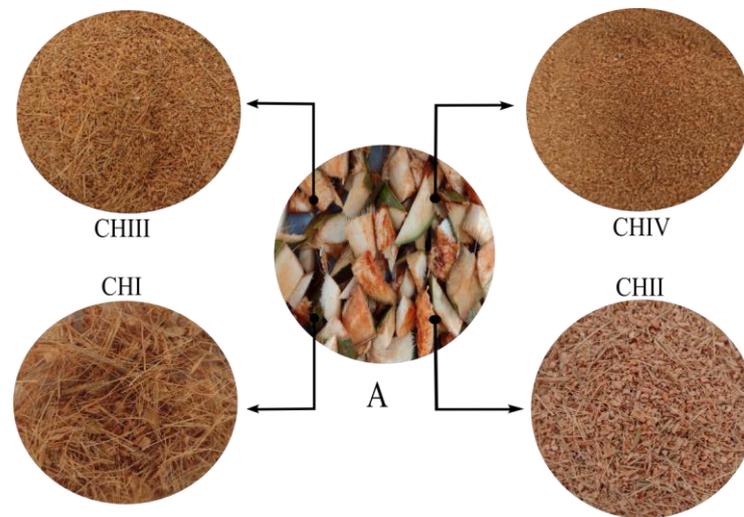
composto principalmente por partículas finas e partículas alongadas (fibras) com diâmetros relativamente maiores do que as apresentadas em outras amostras; CHII consistia em matéria particulada grosseira e fibras menos alongadas e quebradas; CHIII apresenta partículas finas de diâmetro reduzido, compondo uma mistura de fibras finas quebradas de menor diâmetro. Finalmente, as partículas do grupo CHIV são compostas principalmente por partículas finas de teor muito reduzido diâmetro em forma de pó. O material originário do Grupo B é composto por partículas irregulares e partículas finas de diferentes diâmetros obtidas da casca do coco (CS) Figura 3.

Figura 3 - Grupos de partículas estudados neste trabalho: O grupo A refere-se à casca do coco (epicarpo e Grupo B endocarpo (endocarpo e copra).



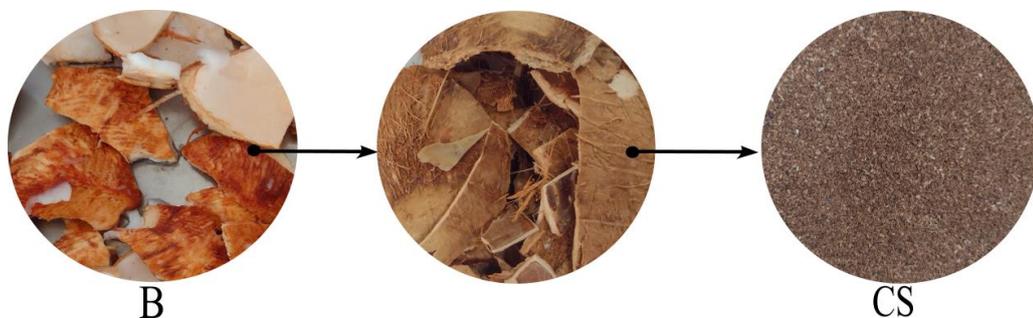
Fonte: Autoria própria

Figura 4 - Amostras do Grupo A (casca de coco, CH) obtidas após moagem: CHI (fibras), CHII (partículas grossas), CHIII (partículas finas), CHIV (pó).



Fonte: Autorial própria

Figura 5 - Amostras do Grupo B (endocarpo, CS) obtidas após moagem: irregulares, grossas e partículas finas.

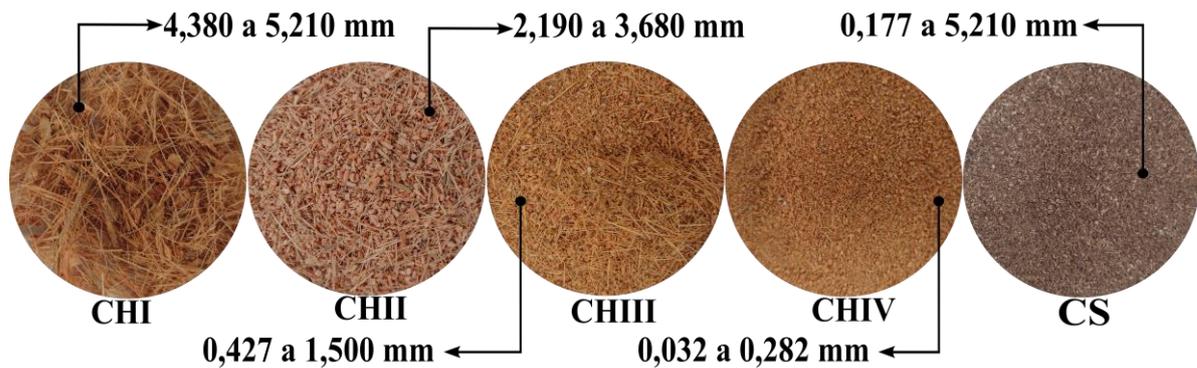


Fonte: Autorial própria

As amostras de cada grupo foram classificadas de acordo com a distribuição do tamanho das partículas. Para tanto, foi realizada análise granulométrica seguindo o procedimento descrito na norma ASABE ANSI S319. Cerca de 0,1 kg de cada grupo principal (A e B) foi colocado em um agitador de peneira (Filtra, modelo IRIS FLT - 0200) montada com peneiras de malha 4, 5, 6, 7, 8, 10, 18, 35, 45, 70, 100, 140, 230 e as fundo (abertura zero). O tempo do ciclo de vibração foi de 10 min. Após o processo de peneiramento, a massa

retida em cada peneira foi pesada em uma balança (BEL, modelo S2202). O tamanho das partículas variou de 4,75 a 0,063 mm e o fundo. A Figura 6 apresenta a distribuição de tamanho de partícula correspondente para cada amostra estudada neste trabalho.

Figura 6: Distribuição granulométrica das amostras utilizadas neste trabalho considerando as peneiras abertura: CHI, CHII, CHIII, CHIV e CS.



Fonte: autoria própria

3.2 DIÂMETRO MÉDIO DAS PARTÍCULAS E DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DA FREQUÊNCIA

O diâmetro médio das partículas para toda a população de partículas dos Grupos A e B foi determinado de acordo com o diâmetro médio de Sauter, Equação (1) (Massarani, 2002).

$$d_{sv} = \frac{1}{\int_0^1 \frac{dx}{d}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{d_i} \right)} \quad (1)$$

onde d_{sv} é o diâmetro de Sauter, x_i a fração de massa de partículas retidas no i -ésimo intervalo de diâmetro médio d_i entre duas peneiras.

3.3 FATORES DE FORMA

Os principais fatores de forma a serem determinados na caracterização da biomassa são a esfericidade, diâmetro equivalente, circularidade e proporção, que podem ser conhecidos usando a técnica de análise de digital de imagens. A esfericidade é um parâmetro difícil de se determinar e possui diversas definições que levam a resultados discrepantes (Tannous et al., 2013). Uma aproximação razoável para obter a esfericidade ao usar a análise de imagem bidimensional é a relação do grau de alongamento (E_l) com o grau de esfericidade (φ) Equação (2) (Cremasco, 2012).

$$\varphi = \frac{1}{E_l} \quad (2)$$

E_l mede a razão entre o eixo maior e o eixo menor do objeto. Uma vez inscrito e os diâmetros circunscritos de uma partícula são conhecidos projetando a sombra dessa partícula em um fundo usando a técnica de análise de imagem, o alongamento pode ser obtido pela Equação 3.

$$E_l = \frac{\text{Eixo maior}}{\text{Eixo Menor}} = \frac{d_{pI}}{d_{pII}} \quad (3)$$

Onde d_{pI} e d_{pII} são os diâmetros circunscrito e inscrito, respectivamente. A razão de aspecto (AR) é uma alternativa para descrever a forma da partícula em vez do fator de esfericidade (Tannous et al., 2013). Pelos eixos maior e menor da elipse ajustados as partículas que são representativas da largura (W) e comprimento (L) das partículas e, AR pode ser obtido por Equação 4 (Igathinathane et al., 2008; Guo et al., 2012; Perez et al., 2019).

$$AR = \frac{L}{W} \quad (4)$$

O diâmetro equivalente é outro fator de forma que indica o diâmetro de uma esfera que tem a mesma relação volume-área de superfície que a partícula de interesse (Rezaei et al., 2014). O diâmetro esférico equivalente bidimensional (d_{eq}) foi obtido de acordo com a Equação 5 (Rezaei et al., 2014).

$$d_{eq} = (LW^2)^{1/3} \quad (5)$$

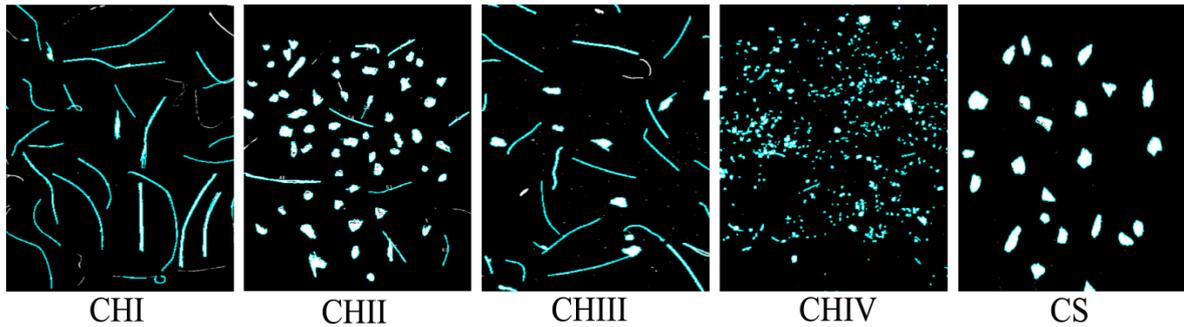
A circularidade (C) é uma medida que compara a superfície do objeto com a superfície de uma circunferência do mesmo perímetro, conforme mostrado na Equação 6 (Cremasco., 2012).

$$C = \frac{4\pi A_p}{P^2} \quad (6)$$

Onde A_p e P são a área projetada e o perímetro da partícula, respectivamente. Parâmetros d_{pI} , d_{pII} , W , L , A_p e P , usados para determinar os fatores de forma apresentados na Equação 2 a 6, foram obtidos por análise de imagens digitais das amostras utilizando o software ImageJ, versão 1,52t (Wayne Rasband, Instituto Nacional de Saúde, EUA). Um número representativo entre 60 e 120 partículas obtidas pelo método de quarteamento foram espalhadas sobre uma superfície opaca e iluminada por luz branca para evitar a formação de sombras. As fotos foram tiradas por uma alto-câmera de alta resolução (Sony, modelo DSC-F707) conectada a um computador. As fotos digitais foram armazenadas e posteriormente analisadas e processadas no software ImageJ. O procedimento consistiu na segmentação das imagens digitais originais das partículas (Souza et al., 2021). O primeiro passo após a aquisição das imagens foi o pré-processamento das imagens digitais, utilizado para melhorar a imagem original para garantir bons resultados dos passos posteriores. No pré-processamento, alguns defeitos da aquisição da imagem original foram corrigidos, como correção de brilho, sombra remoção e realce dos cantos e bordas das partículas. O próximo passo foi a segmentação, em que o objeto de interesse foi separado do fundo, convertendo a imagem digital original para uma imagem binária, onde imagens coloridas foram convertidas em imagens em escalas de cinza. A separação do fundo das partículas foi feita com o auxílio da ferramenta chamada “threshold”, que permitiu a separação dos diferentes grupos de pixels existentes na imagem com base na decomposição da imagem das partículas na cor branca sobre o fundo preto. Após calibrada a imagem de pixel para comprimento unitário em mm com o auxílio de uma imagem de uma escala, a imagem foi filtrada (pós-processamento). Nesta etapa foi feita uma discriminação dos objetos, ou seja, foi selecionar os objetos desejados a serem analisados, variando seus tamanhos e aplicando ferramentas apropriadas, como, como “overlay” e “include holes” para garantir a seleção do objeto desejado. Em seguida, foram feitas medições na imagem pós-processada segmentada. Por meio dessas medições, os grupos de pixels foram descritos por atributos característicos,

gerando dados quantitativos para o resultado final objetivo, onde as partículas foram contadas e os fatores geométricos e de forma determinados usando o comando “set measurements”. A Figura 7 mostra um exemplo das imagens segmentadas das amostras.

Figura 7 - Imagens segmentadas das amostras CHI, CHII, CHIII, CHIV e CS, durante a geração da imagem procedimento de processamento no software ImageJ.



Fonte: Autoria própria

3.4 MORFOLOGIA DAS PARTÍCULAS

A característica da estrutura e da superfície das partículas de biomassa foi analisada de acordo com Imagens SEM (microscópio eletrônico de varredura) obtidas em microscópio de alta definição (Zeiss, EVO MA 15; EDS, Bruker) em diferentes ampliações. As partículas foram revestidas com pó de ouro sob vácuo e com uma tensão de aceleração de 15 kV. As ampliações foram ajustadas para verificar adequadamente a morfologia das partículas.

3.5 DENSIDADE

A densidade Aparente de partículas (ρ_p) foi determinada usando picnometria líquida, sendo utilizada cerca de 2,5 g de resíduo adicionados a um picnômetro de 50 cm³, sendo aferida sua massa previamente. Posteriormente adicionou-se Metanol PA a 25 °C até a metade do volume do picnômetro. Uma vareta de vidro foi usada para remover bolhas de ar... Após decantar o sólido, o volume restante do picnômetro foi completado com o solvente e pesado...

Os experimentos foram repetidos quatro vezes para cada amostra. Com base na massa das amostras adicionadas o picnômetro e o volume de partículas, a densidade foi determinada de acordo com a Equação 7.

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_s + V_{pores}} = \frac{m_p}{V_p} \quad (7)$$

Onde ρ_p é a densidade (densidade aparente) das partículas (m_p), a massa das partículas adicionadas ao picnômetro e (V_p) o volume total da partícula, que é a soma do volume real da partícula (V^s) e o volume dos poros fechados e abertos das partículas (V_{pores}). A densidade real de partículas (ρ_r) foi determinada usando um picnômetro de gás hélio (Micrometrics, modelo Accupyc 1331), onde é difundido no leito do material e também nos poros das partículas. O volume total do esqueleto da partícula e dos poros fechados é calculado usando a pressão diferença de medida (Rezaei et al., 2016). A sensibilidade da medição correspondeu a $0,1 \text{ kg m}^{-3}$. Cinco testes foram realizados para cada amostra, e o resultado final foi a média e o desvio desses testes. Uma vez conhecida a massa das partículas adicionadas ao picnômetro, a densidade real é determinada pela Equação 8.

$$\rho_r = \frac{m_s}{V_p - V_{pores}} = \frac{m_s}{V_r} \quad (8)$$

Onde ρ_r é a densidade real das partículas, m_s a massa total de sólidos utilizados no picnômetro de gás, e (V_r) o volume real do sólido.

A densidade aparente solta (ρ_{lb}) foi determinada experimentalmente por análise volumétrica, onde 50 g de cada amostra foram adicionados a um cilindro graduado de 50 cm^3 , até completar o volume total do cilindro, sendo o sistema pesado e a massa do sistema aferida. Posteriormente, o cilindro foi elevado a uma altura de 10 cm e abandonado para que se chocasse a bancada em diferentes momentos (Rezaei et al., 2016) e se compactasse o volume de partículas, registrando-se este volume. Este procedimento foi repetido até que a compactação das partículas não fosse mais observada (V_{lb}). A densidade do leito descompactado (V_{lb}) foi determinada pela Equação 9 e a densidade do leito compactado Equação 10.

$$\rho_{lb} = \frac{m_b}{V_{lb}} \quad (9)$$

$$\rho_{tb} = \frac{m_b}{V_{tb}} \quad (10)$$

3.6 POROSIDADE

Uma vez conhecidas as densidades aparente e real das amostras, a porosidade da partícula ε_p e a aparente ε_b foram determinadas de acordo com as equações (11) e (12), respectivamente.

$$\varepsilon_p = \left(1 - \frac{\rho_p}{\rho_r}\right) \times 100 \quad (11)$$

$$\varepsilon_b = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_p}\right) \times 100 \quad (12)$$

Onde ρ_b é a densidade sem compactação de partículas (ρ_{lb}) e densidade compactada de partículas (ρ_{tb}) do leito.

3.7 COMPRESSÃO EM MASSA

A razão de Hausner (HR) e o índice de compressibilidade de Carr (CCI) foram obtidos com base na Equação 13 e 14, respectivamente (Tannous et al., 2013). Esses índices descrevem a dinâmica da partícula durante o transporte ou armazenamento, impactando diretamente nos custos e manutenção dos equipamentos (Düsenberg et al., 2023), e representam uma mudança na densidade aparente de sua condição inicial solta ao bater (Tannous et al., 2013).

$$HR = \frac{\rho_{tb}}{\rho_{lb}} \quad (13)$$

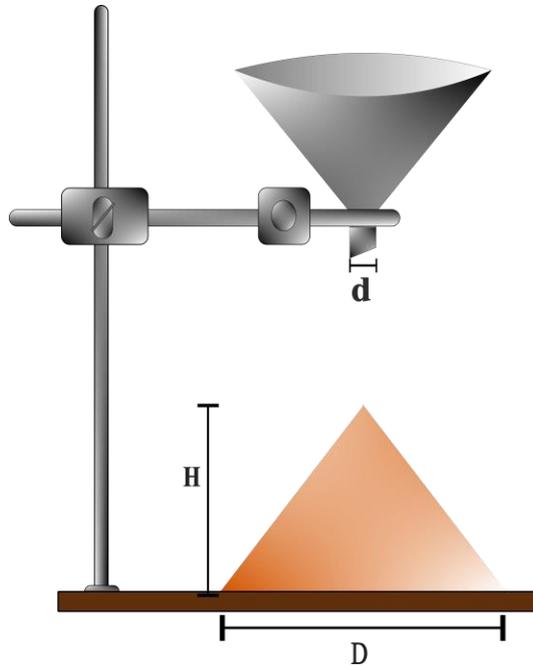
$$CCI = \left(1 - \frac{\rho_{lb}}{\rho_{tb}}\right) \times 100 \quad (14)$$

3.8 ÂNGULO DE REPOUSO

O ângulo de repouso, segundo a norma BS EN 1991-1-1 (Norma Europeia, 2010), é o maior ângulo com a horizontal naturalmente formado pela superfície inclinada de uma pilha de partículas, quando despejado de uma altura designada. Para este propósito, foi desenvolvido o aparelho mostrado na Figura 8 para aplicar o método de funil de acordo com ASTM C1444-00. Cerca de 255 g de partículas foram inseridas em um funil de 18,78 mm de diâmetro (d), vibrado manualmente suavemente, que permitiu o fluxo natural sobre uma superfície graduada, formando um montículo em forma de cone com altura (H) e diâmetro (D). Para cada amostra foram tiradas imagens para medir a circunferência formada pelas partículas depositados sob a superfície graduada. Para garantir a reprodutibilidade, os experimentos foram repetidos três vezes, e os valores de (H) e (D) foram calculados para obter valores representativos do ângulo de repouso (θ) obtidos da Equação 15.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{2H}{D - d} \right) \quad (15)$$

Figura 8 - Esquema do aparelho desenvolvido para medir o ângulo de repouso: d é o diâmetro da abertura do funil, D o diâmetro da pilha de partículas e H a altura da pilha.



Fonte: Autoria própria

3.9 PERMEABILIDADE

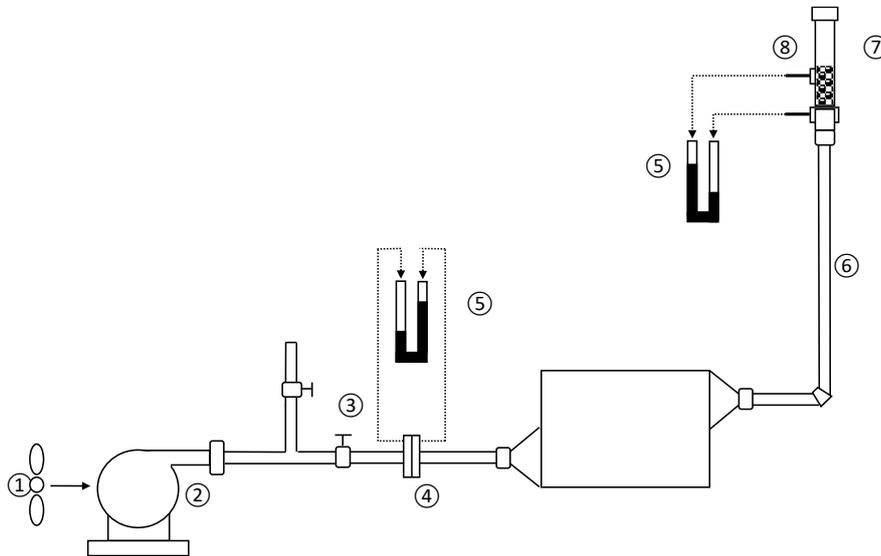
Para determinar o coeficiente de permeabilidade experimental das amostras, foi realizada a permeamtria, sendo utilizada a técnica que consistiu em avaliar a queda de pressão em um leito de 0,1 m de espessura durante diferentes níveis de velocidade superficial do ar à temperatura ambiente (27 °C). Para este propósito foi utilizado uma coluna de diâmetro interno e altura de 0,6 m, acoplada a um tubo vertical de estabilização do fluxo de ar feito de ferro galvanizado, com 0,05 m de diâmetro e 1 m de comprimento. O tubo de estabilização foi conectado a uma seção reta de um tubo horizontal de 2 m de comprimento e 0,05 m de diâmetro, cuja extremidade foi acoplada a um compressor centrífugo de 4 HP (Ibram, modelo CR). A queda de pressão no leito foi lida em um U-manômetro de pressão conectado a duas tomadas de pressão nas extremidades da coluna. A velocidade do ar foi obtida indiretamente a partir de uma placa de orifício instalada entre as duas seções retas do tubo e conectado a um manômetro. O aparelho usado nos experimentos de permeamtria é mostrado esquematicamente na Figura

9. Uma vez que a relação entre a queda de pressão e a velocidade superficial do foi obtida, os dados foram linearizados para aplicação do modelo de Forchheimer, Equação 16 e obteve-se o coeficiente de permeabilidade (Massarani, 2002).

$$\frac{-\Delta P}{Lv} = \frac{\mu}{k} + \left[\left(\frac{c\rho}{\sqrt{k}} \right) v \right] \quad (16)$$

Onde (ΔP) é a queda de pressão, (L) a espessura do leito, v a velocidade superficial do ar (μ), a viscosidade do ar, (k) a permeabilidade, (ρ) a densidade do ar e (c) um parâmetro de ajuste.

Figura 9: Aparato experimental utilizado para os ensaios de permeamtria.



Fonte: (Perazzini., 2024)

Esquema do aparato experimental para ensaios de permeamtria: (1) ventilador; (2) soprador centrífugo; (3) sistema de válvula de desvio; (4) placa de orifício; (5) manômetro tipo U; (6) tubo de estabilização; (7) célula de medição; (8) torneiras de pressão.

Com os valores dos coeficientes lineares e angulares da reta ajustada conhecidos do gráfico de $\frac{\Delta P}{Lv} \times v$, foram calculados os valores de c . Os valores de k e c , obtidos experimentalmente por permeamtria e na condição de porosidade solta, foram comparados com os valores estimado pelo modelo capilar de Kozeny-Carman (Massarani, 2002) Equação 17 e 18.

$$k = \frac{d_{sv}^2 \varphi^2 \varepsilon_{lb}^3}{36\beta(1 - \varepsilon_{lb})^2} \quad (17)$$

$$c = \varepsilon_{lb}^{-3/2} \left\{ \left[0.13 \left(\frac{1 \times 10^{-10}}{k} \right)^{0.37} \right] + \left[0.10 \left(\frac{1 \times 10^{-10}}{k} \right)^{0.01} \right] \right\}^{0.98} \quad (18)$$

Onde β é um parâmetro estrutural associado à tortuosidade dos canais considerados na modelagem do escoamento, calculado segundo a Equação de Happel Equação 19 (d'Ávila e Sampaio Filho, 1980).

$$\beta = \frac{\varepsilon_{lb}^3 \left[1 + \frac{2}{3} (1 - \varepsilon_{lb})^{\frac{5}{3}} \right]}{2(1 - \varepsilon_{lb}) \left[1 - \frac{3}{2} (1 - \varepsilon_{lb})^{\frac{1}{3}} + \frac{3}{2} (1 - \varepsilon_{lb})^{\frac{5}{3}} - (1 - \varepsilon_{lb})^2 \right]} \quad (19)$$

3.10 VELOCIDADE TERMINAL

Para determinar a velocidade terminal das partículas de cada grupo estudado neste trabalho, as partículas foram suspensas a uma altura de 30 cm e abandonadas do repouso em um ambiente controlado, sem a presença de corrente de ar ou qualquer perturbação. Nebra e Macedo (1988) empregou um procedimento semelhante para o bagaço de cana-de-açúcar. A queda da partícula da referida altura até a superfície plana foi registrada com uma câmera com resolução de 48 MP. O vídeo digital foi carregado e processado no software Tracker (Versão 6.2.0, Douglas Brown, Cabrillo College, Califórnia, EUA), uma ferramenta gratuita de análise e modelagem de imagens dinâmicas desenvolvida em Java Open Source (OSP). O software divide o vídeo em vários quadros, possibilitando a definição do início e o fim do movimento da partícula em torno de vários dados de posição como uma função de tempo. Na tela do software, há uma tabela com dados de posição referentes ao tempo e um gráfico de valores onde a velocidade das partículas pode ser estimada a partir do deslocamento das partículas em diferentes intervalos de tempo. A partir dos valores da velocidade terminal (v_t), o coeficiente de arrasto (C_D) foi estimado a partir da Equação 20 (Rasul et al., 1999).

$$C_D = \frac{1}{v_t^2} \left[\frac{4d_p^2(\rho_p - \rho)g}{3\rho} \right] \quad (20)$$

Onde g é a aceleração gravitacional e d_p^2 é uma correção do diâmetro da partícula Equação 21.

$$d_p^2 = d_{sv} \left[\frac{\mu^2}{\rho} (\rho_p - \rho)g \right]^{1/3} \quad (21)$$

3.11 ANÁLISE QUÍMICA

As amostras de CHI, CHII, CHIII, CHIV e CS foram trituradas em moinho universal (M 20 Universal Mill, IKA-WERKE, Wilmington, Estados Unidos) e peneiradas em peneira com diâmetro de 0,500 mm. As amostras processadas foram armazenadas em frascos de vidro de 350 cm³ dentro da sala analítica, mantendo as condições de 20°C e 20% de umidade relativa, protegidas da luz solar e de fontes de calor. Essas amostras foram utilizadas para análises posteriores, abrangendo avaliações como teor de umidade, teor de cinzas, Análise Termogravimétrica (TGA) e composição elementar.

3.12 TEOR DE UMIDADE

O teor de umidade das amostras foi avaliado utilizando ASTM E1756 (método B) Figura 10, com um analisador de umidade (Halogen Moisture Analyzer HE53, Mettler Toledo, Mississauga, Canadá). Cerca de 1g de cada amostra foi pesado meticulosamente em panela de alumínio, com precisão de 1 mg. A análise seguiu o método padrão e foi concluída quando o peso estabilizou em 105 °C. Todo o procedimento foi realizado em triplicata e os resultados foram apresentados como teor de sólidos e teor de umidade em bases úmidas e secas, com valores relatados como médias \pm desvios padrão.

Figura 10- Analisador de umidade modelo (Halogen Moisture Analyzer HE53, Mettler Toledo).



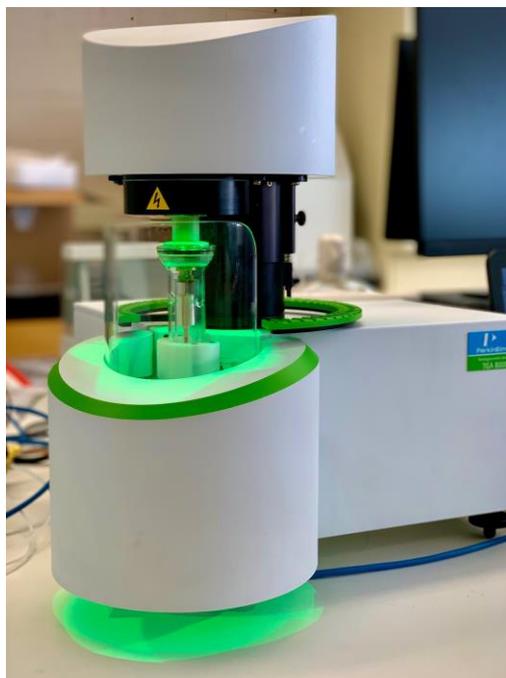
Fonte: David Bressler Laborato

3.13 ANÁLISE TERMO GRAVIMÉTRICA (TGA)

A análise TGA foi realizada utilizando um analisador termogravimétrico (TGA 8000, Perkin Elmer) com forme apresentado na Figura 11. Para cada análise foi utilizado um recipiente de cerâmica e 3-5 mg da amostra. A purga da amostra foi obtida usando nitrogênio de alta pureza (4,8, 99,998%, Linde Canada, Mississauga, Canadá) ou ar comprimido extra seco (uma mistura de 19,5% a 23,5% de oxigênio, com o restante sendo nitrogênio, Linde Canada, Mississauga, Canadá) a uma taxa de 40 cm³/min. A purga do equilíbrio (sistema) foi ajustada para 40 cm³/min com nitrogênio.

A análise inicial envolveu uma taxa de rampa de 40 °C/min, variando de 30 °C a 1000 °C até que a temperatura de estabilização fosse determinada. Foram realizadas análises subsequentes a taxas de 20, 15, 10 e 5 °C/min, cada uma com um limite de alta temperatura de 700 °C. Todas as análises foram realizadas em singletos e o software relatou os resultados conforme fornecido.

Figura 11 - Analisador termo gravimétrico modelo (TGA 8000, Perkin Elmer).



Fonte: David Bressler Laborato

3.14 CONDUTIVIDADE TÉRMICA EFETIVA

O estudo da transferência de calor em meios porosos tem por objetivo determinar a distribuição de temperatura do meio, uma vez conhecidas as propriedades termo físicas do corpo, tais como porosidade, condutividade térmica, diâmetro, forma e tamanho das partículas. A descrição da transferência de calor em meios porosos é feita, basicamente, segundo duas abordagens principais: a abordagem a uma fase e a abordagem a duas fases.

No modelo a uma fase, as temperaturas das fases sólida e fluida são consideradas iguais em qualquer ponto do sistema. Neste enfoque, todos os mecanismos de transferência de calor existentes são englobados em um único parâmetro térmico: a condutividade térmica efetiva. Logo, o meio poroso é considerado como pseudo-homogêneo e a transferência de calor, em regime permanente, pode ser representada matematicamente pela equação de condução de calor de Fourier Equação 22, utilizada como equação constitutiva. O modelo a duas fases, por sua vez, é mais realista, pois considera o meio poroso como um sistema heterogêneo quanto ao número de fases. Nesse enfoque, em cada ponto do sistema há uma fase sólida e uma fase fluida

com temperaturas próprias que trocam energia entre si. Cada fase é representada matematicamente por uma equação diferencial de energia associadas a elas um parâmetro térmico global. A principal desvantagem deste modelo está na dificuldade em se obter experimentalmente as temperaturas da fase fluida e da fase sólida separadamente (FREIRE, 1979). Nesta prática será abordada a formulação pseudo-homogênea (modelo a uma fase).

$$\vec{q} = -k_{\text{eff}} \cdot \nabla T \quad (22)$$

Sendo k_{eff} a condutibilidade térmica e ∇T o gradiente da temperatura,

Se em condição de regime permanente, a taxa de transferência de calor gerada no interior do corpo transfere-se apenas na direção radial, a equação da condução de calor toma a forma:

$$Q = -k_{\text{eff}} A \frac{dT}{dr} \quad (23)$$

Realizando a integração da Equação 23.

$$T_1 - T = \frac{Q}{2\pi k_{\text{eff}} L} \ln\left(\frac{r}{r_1}\right) \quad (24)$$

A condutividade térmica efetiva pode ser determinada apenas com o conhecimento da potência dissipada no meio e do perfil radial de temperatura, pela equação:

$$k_{\text{eff}} = \frac{P \ln(r/r_1)}{2\pi L (T_1 - T)} \quad (25)$$

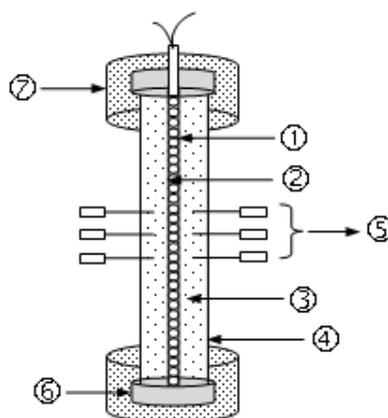
Com base no coeficiente angular da reta no gráfico monolog de $T_1 - T$ em função da posição radial, encontra-se o valor de keff:

$$\alpha = \frac{P}{2\pi k_{\text{eff}} L} \quad (26)$$

Para os estudos de transferência de calor em meios porosos, a condutividade térmica efetiva na estagnação será determinada utilizando-se o aparato experimental esquematizado na Figura 12. O método clássico de medida utiliza-se de uma célula de medidas constituída de dois

cilindros concêntricos de metal (aço inox) com 60 cm de altura, cujas extremidades são vedadas e isoladas termicamente. No cilindro interno (1), de menor diâmetro ($r_1 = 0,65$ cm), uma resistência (2) bobinada homogeneamente promove o aquecimento ao longo do eixo. A resistência está conectada a uma fonte elétrica. O meio poroso (3), por sua vez, ocupa um volume anular do cilindro externo (4), de maior diâmetro ($r_2 = 5$ cm). Um conjunto de 8 termopares tipo T (5) estão inseridos em diferentes posições radiais sendo em cm as distancias de 0,65, 2,00, 2,50, 3,00, 4,00, 4,50, 4,90, no meio poroso, permitindo a determinação de sua temperatura. Os termopares estão conectados a uma chave seletora, a qual está conectada a um mostrador digital de temperatura. Anéis de vedação fabricados em nylon (6) promovem a vedação da célula, bem como a fixação e estabilização do cilindro interno na célula. Os anéis de vedação são revestidos com poliestireno expandido (7), a fim de minimizar a perda de energia pelas pontas. Um termômetro deverá ser utilizado para a determinação da temperatura ambiente.

Figura 12-Esquema da célula para a determinação da condutividade térmica efetiva na estagnação.



Fonte: (Perazzini., 2024)

3.15 APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO RESÍDUO DE COCO

Com relação a utilização do resíduo de coco para fins energéticos, se consolida sua utilização nas indústrias através de processos de queima para a geração de energia térmica, onde pode-se citar o aproveitamento desta biomassa em combustão direta em fornos ou ainda em

caldeiras, sendo aproveitado como combustível sólido, transformado em briquetes, carvão vegetal ou bioóleo, sendo uma alternativa promissora para geração de energia térmica, uma vez que os altos teores de lignina e fibras conferem a esta biomassa um alto poder calorífico, cerca de 4,358 Kcal Kg⁻¹ para o poder calorífico superior para casca de coco e 4,484 Kcal Kg⁻¹ para o Endocarpo (Marafon et al., 2020). Para a determinação do poder calorífico as amostras já desidratadas foram trituradas para que se pudesse aferir a energia liberada. O poder calorífico das amostras de CHI, CHII, CHIII, CHIV e CS foram determinadas com a utilização um calorímetro, aferindo-se a energia liberada na combustão dos resíduos em estudo, sendo realizado triplicadas da experimentação para que se pudesse ter um maior grau de precisão.

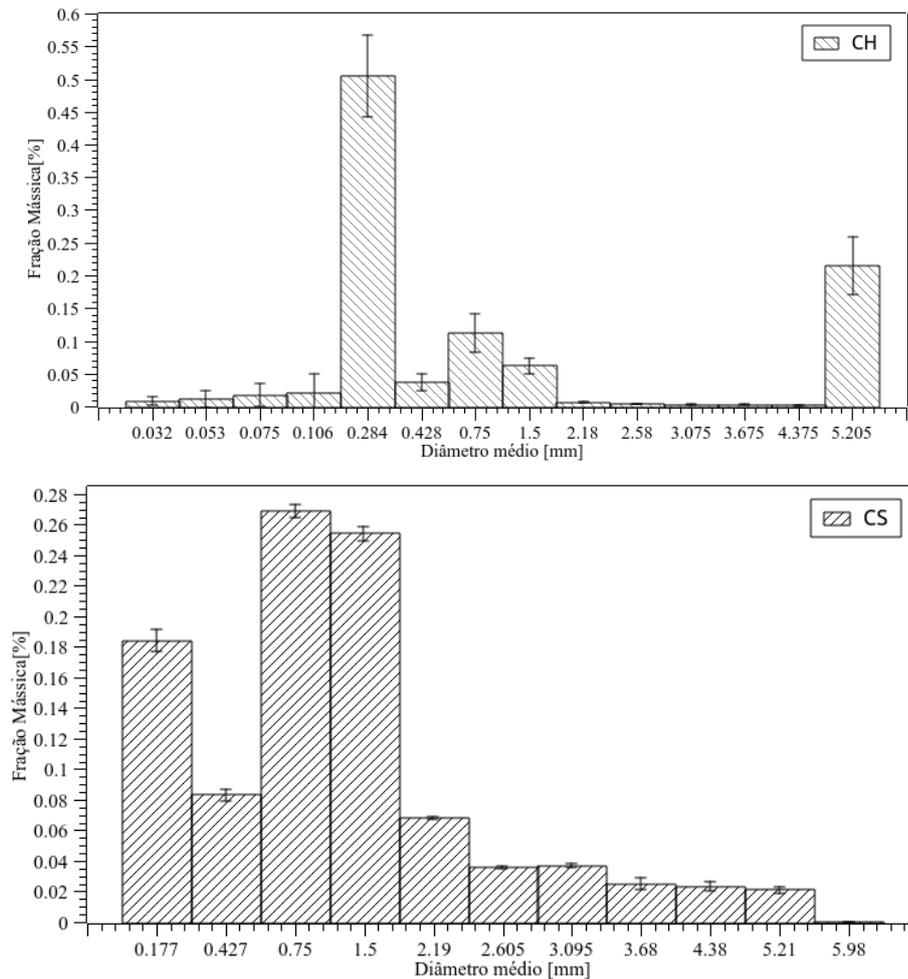
4 RESULTADOS

A metodologia experimental empregada e descrita na seção anterior deste trabalho, apresentou os resultados da caracterização das partículas em relação às características físicas, de fluxo e Químicas apresentados nos tópicos 3,1 a 3,5, 3,6 a 3,10 e 3,11 a 3,13, respectivamente.

4.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A distribuição do tamanho das partículas da casca do coco moído (Grupo A) e do Endocarpo (Grupo B) é apresentado na Figura 13. Nota-se que a distribuição é irregular, uma vez que uma abordagem de curva gaussiana não foram detectados, principalmente para o Grupo A. A análise granulométrica indica que as partículas do Grupo A foram retidos principalmente na peneira de 5,21 mm de abertura média, que corresponde ao CHI da amostra, e na peneira de abertura de 0,282 mm, correspondente à amostra CHIV. Este tamanho de partícula está dentro da faixa de diâmetro (de 0,25 a 0,5 mm) de cavacos e pellets moídos (Rezaei e Sokhansanj, 2018). Identificamos dois tipos principais de partículas apresentadas, fibra e pó, conforme identificado para bagaço de cana (Nebra e Macedo, 1988; Rasul et al., 1999; Perez et al., 2019; Lenço et al., 2020). Em aplicações práticas, este resultado sugere armazenamento e procedimentos de transporte de fibras e pó, bem como triagem do resíduo de coco após moagem, considerando as particularidades de cada constituinte do resíduo como será mostrado mais adiante. O tamanho das partículas do Grupo B é melhor distribuído, com a maioria das partículas com diâmetros variando de 0,17 mm a 2,19 mm. A fração cumulativa indica que 77% CH e 79% CS partículas têm diâmetro menor que 2,19 mm. Este é um resultado interessante porque quase 80% do total resíduo de coco (casca e Endocarpo) pode ser processado em uma partícula de corte de 2,19 mm. A porcentagem de cada amostra no Grupo A foi de 21,56% CHI, 1,23% CHII, 21,08% CHIII e 56,14% (CHIV).

Figura 13-Distribuição do tamanho da biomassa moída da casca de coco (CH) e da casca de coco (CS): fração de massa retida por diâmetro médio.



Fonte: Autoria própria

A Tabela 2 resume os resultados do diâmetro médio de Sauter, densidade e porosidade das partículas, bem como a classificação dos grupos Geldard. O diâmetro médio de Sauter variou de 0,23 mm a 5,54 mm para o Grupo A, com a mistura de partículas do Grupo B tendo um valor de 0,54 mm. Os valores de densidade aparente de CHI, CHII e CHIII são próximos aos da água devido à alta presença de fibras. Para as amostras com tamanhos de partículas menores e caracterizadas como um pó (CHIV e amostras de CS), por sua vez, a densidade de partículas é maior, o que é típico de partículas dessa natureza. Como esperado, a densidade real é maior que a densidade de partículas, pois representa o sólido volume. Esses resultados são consistentes com os valores obtidos por Sousa et al. (2021) e Ramirez-Quintero et al. (2023) para serragem e bambu com densidade de partículas variando de 900 a 1180 kg.m⁻³ e de 700 a

1500 kg.m⁻³, respectivamente, e Sousa e Ferreira (2019). As amostras CHI, CHII, CHIII e CHIV correspondem a Geldart Grupo D e Grupo B, e amostra CS Geldart Grupo B, realizando a gama de partículas suscetível à fluidização e à formação de jorros (Richardson et al., 1996), que são as técnicas comuns usadas na conversão termoquímica. A porosidade média das partículas do Grupo A foi de 0,21 ($\pm 0,03$) e Grupo B, 0,2 ($\pm 0,03$)

Tabela 2: Propriedades físicas e classificação do grupo Geldart correspondente do coco moído casca (CH, Grupo A) e endocarpo (CS, Grupo B).

Grupo	Amostra	d_{sv} [mm]	ρ_p [kg.m ⁻³]	ρ_r [kg.m ⁻³]	ε_p (%)	Geldart
A	CHI	5,24	0,94 \pm 0,05	1,13 \pm 0,01	0,16 \pm 0,02	D-Grupo
A	CHII	2,57	1,00 \pm 0,03	1,34 \pm 0,02	0,25 \pm 0,01	D-Grupo
A	CHIII	1,13	0,95 \pm 0,03	1,20 \pm 0,02	0,21 \pm 0,01	B-Grupo
A	CHIV	0,23	1,12 \pm 0,09	1,39 \pm 0,01	0,19 \pm 0,04	B-Grupo
B	CS	0,54	1,11 \pm 0,05	1,38 \pm 0,01	0,20 \pm 0,02	B-Grupo

Fonte: Autoria própria

Os valores médios dos fatores de forma e das dimensões de cada grupo de partículas (G_p) para cada amostras de partículas (A_m) são apresentados na Tabela 3 e seus respectivos fatores estatísticos nas Tabelas de 4 a 8, onde são apresentados o grau de liberdade (G_L), desvio padrão (D_p), variância (V_r) e intervalo de confiança (I_c). em geral, o material particulado é heterogêneo em termos de tamanho e forma, mas para partículas irregulares materiais, apenas um valor médio muito aproximado do tamanho das partículas pode ser obtido (Souza et al., 2021). Tanto o comprimento (L) quanto a largura (W) das partículas foram maiores que o diâmetro médio de Sauter, bem como a abertura média da peneira de cada grupo (ver Figura 6). Este fato pode resultar em incerteza na previsão de d_{sv} (Tannous et al., 2013; Perez et al., 2019), mas é importante destacar a importância das partículas características heterogêneas que podem contribuir para os resultados obtidos. Souto et al. (2021) encontraram valores de esfericidade e circularidade da biomassa do açaí muito próximos da unidade. Por outro lado, os valores de φ e C muito distantes da unidade para caracterizar as partículas como uma esfera perfeita e regular revelam a forma irregular da casca e casca do coco moído. A baixa esfericidade de CHI e CHIII deve ser destacado, o que evidencia a elevada presença de fibras nestas amostras (ver Figura 6 e 7), característico de materiais fibrosos como bambu, bagaço e palha, que possuem uma densidade média esfericidade variando de 0,17 a 0,67 (Ramirez-Quintero et al., 2023). O alto fator de alongamento (E_l) de CHI e CHIII corrobora. Na maioria das amostras, AR é maior que a unidade, indicando uma partícula em forma de elipse inclinada e retângulo reto (Igathinathane

et al., 2008), mas menor que os valores relatados por El-sayed e Mostafa (2014) para o bagaço ($AR = 2,56$) e Guo et al. (2012) para pinho ($2,5 \leq AR \leq 3,01$). Na forma de pó, partículas com menor d_{eq} , A_p e P , φ aumentaram de 0,18 (CHI) a 0,64 (CHIV), indicando maior presença de partículas menos alongadas e uma aproximação a uma esfera. Aumento da esfericidade significa uma menor área de contato entre um conjunto de partículas, uma vez que que o formato esférico possibilita apenas poucos pontos de contato entre partículas de mesmo formato, o que pode afetar o desempenho e as condições operacionais dos sistemas de transferência de calor e massa quando é necessária uma área de alto contato.

Tabela 3: Fatores de forma e dimensões das partículas da casca de coco moída (CH, Grupo A) e endocarpo (CS, Grupo B).

G_P	A_m	d_{eq} [mm]	A_p [mm ²]	P [mm]	W [mm]	L [mm]	E_l	φ	AR	C
A	CHI	4,39	7,46	45,02	8,99	13,72	5,56	0,18	1,53	0,07
A	CHII	1,95	3,73	10,43	3,01	2,93	1,76	0,57	0,97	0,57
A	CHIII	2,66	2,65	16,63	4,69	5,04	3,71	0,27	1,07	0,26
A	CHIV	0,41	71	965	0,28	0,29	1,56	0,64	1,04	0,80
B	CS	3,33	24,53	213,84	6,16	6,21	1,49	0,67	1,01	0,57

Sendo G_P o grupo de partículas, A_m Amostra das partículas.

Fonte: Autoria própria

Tabela 4: Análise dos principais fatores estáticos apresentados pela amostra de partículas da casca moída (CHIV, Grupo A).

G_P	A_m	F_E	d_{eq} [mm]	A_p [mm ²]	P [mm]	W [mm]	L [mm]	E_l	φ	AR	C	
A	CHIV	G_L	119	119	119	119	119	119	119	119	119	
		D_P	0,15	0,12	0,59	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,54	0,16
		V_R	0,02	0,02	0,18	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,38	0,03
		I_C	0,03	0,02	0,11	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,10	0,03

Sendo G_P o grupo de partículas, A_m Amostra das partículas, G_L grau de liberdade, D_P desvio padrão, V_R variância, I_C Intervalo de confiança.

Fonte: Autoria própria

Tabela 5: Análise dos principais fatores estáticos apresentados pela amostra de partículas da casca moída (CHIII, Grupo A).

G_P	A_m	F_E	d_{eq} [mm]	A_p [mm ²]	P [mm]	W [mm]	L [mm]	E_l	φ	AR	C
A	CHIII	G_L	42	42	42	42	42	42	42	42	42
		D_P	0,92	1,22	8,26	3,25	3	0,26	0,26	8,22	0,28
		V_R	0,84	1,48	68,2	10,56	9	0,07	0,07	67,54	0,08
		I_C	0,27	0,36	2,47	0,97	0,9	0,08	0,08	2,46	0,09

Sendo G_P o grupo de partículas, A_m Amostra das partículas, G_L grau de liberdade, D_P desvio padrão, V_R variância, I_C Intervalo de confiança.

Fonte: Autoria própria

Tabela 6: Análise dos principais fatores estáticos apresentados pela amostra de partículas da casca moída (CHII, Grupo A).

G_P	A_m	F_E	d_{eq} [mm]	A_p [mm ²]	P [mm]	W [mm]	L [mm]	E_l	φ	AR	C
A	CHII	G_L	66	66	66	66	66	66	66	66	66
		D_P	0,58	2,33	7,44	1,66	3,02	0,23	0,23	3,19	0,23
		V_R	0,29	3,45	32,81	1,99	5,67	0,06	0,06	24,02	0,06
		I_C	0,14	0,56	1,78	0,4	0,72	0,06	0,06	0,77	0,06

Sendo G_P o grupo de partículas, A_m Amostra das partículas, G_L grau de liberdade, D_P desvio padrão, V_R variância, I_C Intervalo de confiança.

Fonte: Autoria própria

Tabela 7: Análise dos principais fatores estáticos apresentados pela amostra de partículas da casca moída (CHI, Grupo A).

G_P	A_m	F_E	d_{eq} [mm]	A_p [mm ²]	P [mm]	W [mm]	L [mm]	E_l	φ	AR	C
A	CHI	G_L	28	28	28	28	28	28	28	28	28
		D_P	1,84	6,02	21,62	9,3	6,61	0,29	0,16	7,16	0,07
		V_R	3,39	36,29	467,59	86,48	43,71	0,08	0,03	51,28	0,01
		I_C	0,67	2,19	7,87	3,39	2,41	0,1	0,06	2,61	0,03

Sendo G_P o grupo de partículas, A_m Amostra das partículas, G_L grau de liberdade, D_P desvio padrão, V_R variância, I_C Intervalo de confiança.

Fonte: Autoria própria

Tabela 8: Análise dos principais fatores estáticos apresentados pela amostra de partículas da Emdocarpo (CS, Grupo B).

G_P	A_m	F_E	d_{eq} [mm]	A_p [mm ²]	P [mm]	W [mm]	L [mm]	E_l	φ	AR	C
B	CS	G_L	28	28	28	28	28	28	28	28	28
		D_P	0,39	7,64	6,42	1,65	1,17	0,16	0,16	0,43	0,13
		V_R	0,15	58,32	41,15	2,73	1,36	0,02	0,03	0,18	0,02
		I_C	0,14	2,78	2,34	0,6	0,43	1,49	0,06	0,16	0,05

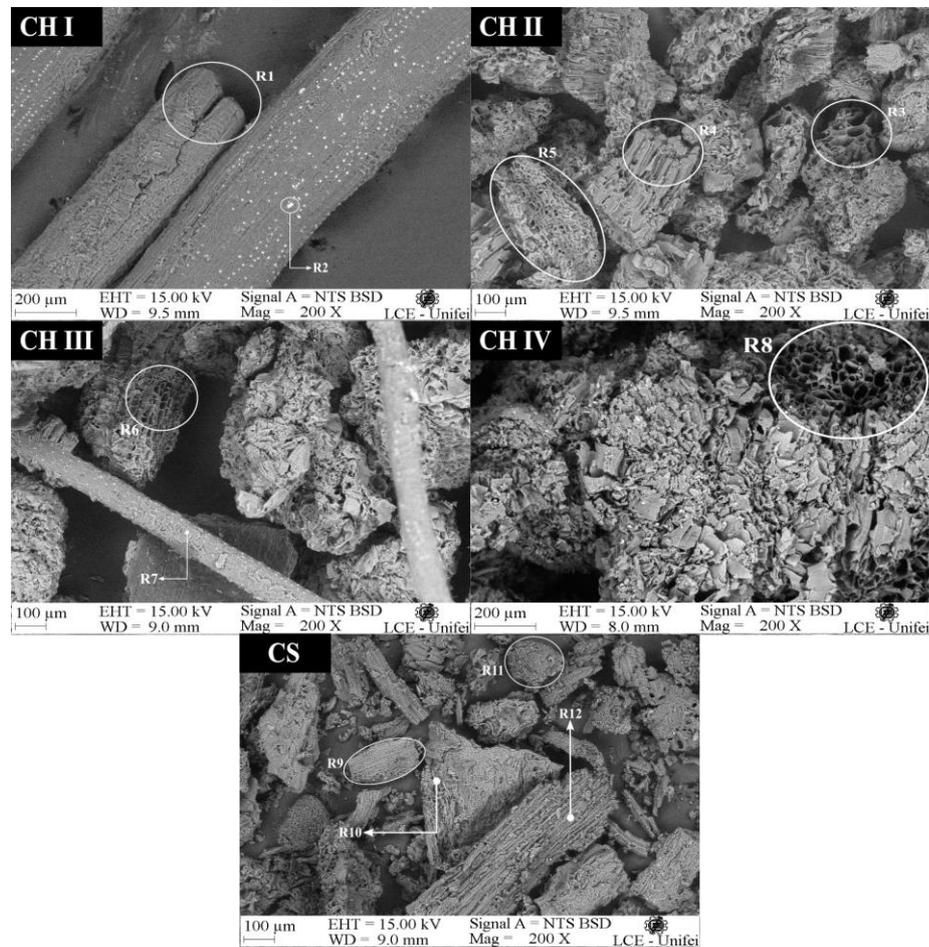
Sendo G_P o grupo de partículas, A_m Amostra das partículas, G_L grau de liberdade, D_P desvio padrão, V_R variância, I_C Intervalo de confiança.

Fonte: Autoria própria

As imagens feitas por microscopia eletrônica de varredura são apresentadas na Figura 14. A micrografia da amostra CH1 mostra a formato cilíndrico da fibra presente na casca do coco, o que corrobora os resultados obtidos para esfericidade. Contornos irregulares e formato alongado das fibras de diferentes tamanhos são observados. A estrutura entre duas fibras conectadas é destacada (região R1), indicando que a estrutura como um todo é composto por feixes de fibras com diâmetros diferentes e, ao lado dessas fibras, as presenças de cristais de silício (região R2), que possivelmente se formaram após o processo de secagem em estufa. Na

micrografia da amostra CHII, é detectada uma presença significativa de vazios na estrutura da partícula e uma superfície substancialmente áspera e irregular, semelhante a uma esponja. As regiões R3 e R5 destacam a matriz sólida porosa que se assemelha a um favo de mel formada por dutos de diferentes diâmetros. O R4 região apresenta um segmento de material fibroso com superfície irregular. Na composição do Amostra CHIII, presença de fibras (região R7) de diâmetro relativamente menor que CHI e porosas partículas (região R6) podem ser notadas. As pequenas fibras nestas amostras são devidas à peneiração, uma vez que as partículas fibrosas desta amostra têm um diâmetro menor e são menos alongadas, o que lhes permite passar de uma peneira para outra. A presença significativa de poros (região R8) também pode ser notada em a amostra CHIV. Para este grupo de partículas, a morfologia é caracterizada por uma matriz formada por uma distribuição irregular de poros de diferentes diâmetros. Esta característica porosa pode facilitar adsorção de umidade quando os resíduos de coco são armazenados em um ambiente de alta umidade, revelando alta higroscopicidade. Isso deve ser levado em consideração no projeto da operação de adsorção, armazenamento e etapa de secagem dos resíduos de coco. Na amostra de CS, que representa o endocarpo e copra (Grupo B), fica evidente a característica heterogênea e polidispersa do material (regiões R9, R10, R11 e R12), consistindo em partículas de diferentes formas e tamanhos, mas não é possível identificar com precisão partículas fibrosas alongadas e finas como no Grupo A. Um irregular área externa pode ser observada para todos os casos, bem como uma estrutura porosa. A presença de fibras e pó (medula esponjosa) em uma mistura de amostras também foi relatado por Perez et al. (2019) e Lenço et al. (2020) para bagaço de cana-de-açúcar.

Figura 14: Figura de amostras de casca de coco moída (CH) e endocarpo (CS), feitas através da microscopia eletrônica de varredura.



Fonte: Autoria própria

4.2 PROPRIEDADES DE FLUIDEZ

A Tabela 9 lista os valores médios de densidade aparente solta ρ_{lb} e vazada ρ_{tb} , e das porosidades solta (ε_{lb}) e vazada (ε_{tb}). porosidade da casca e casca de coco moídas. Os valores experimentais são baseados na faixa de densidade aparente de diferentes matérias-primas de biomassa (de 15 a 480 kg m⁻³) apresentadas na revisão de Cai et al. (2017). Os altos valores de porosidade (ε_{lb} e $\varepsilon_{tb} > 0,8$) obtidos para o Grupo A também foram relatados por Tannous et al. (2013) para madeira. Considerando os erros experimentais Figura 15, os valores do Grupo B estão na faixa típica para pós de biomassa como borra de café ($262 \leq \rho_{lb} [\text{kg m}^{-3}] \leq 390$, $393 \leq$

ρ_{tb} [kg m⁻³] ≤ 471 , $0,65 \leq \varepsilon_{lb} \leq 0,77$ e $0,58 \leq \varepsilon_{tb} \leq 0,65$) estudados por Sousa e Ferreira (2019). Considerando os erros experimentais, há uma tendência de densidade sem compactação e compactada, conforme discutido por vários autores (Tannous et al., 2013; Rezaei et al., 2016; Sousa e Ferreira, 2019; Sousa et al., 2021). Por outro lado, a densidade aparente sem compactação e compactada diminuiu para a amostra CHIV. Além de atribuir esses resultados com relação aos valores encontrados para as densidades aparentes do leito a erros experimentais, algumas hipóteses podem ser feitas. Os pós são materiais muito coesos com dificuldade adicional de compactação (Sousa e Ferreira, 2019). Partículas menores e mais coesas limitam o rearranjo do leito compactado (Sousa e Ferreira, 2019) o que pode contribuir para um volume menor do leito. A presença de fibras em outras amostras pode contribuir para um maior volume em massa e, portanto, menor densidade do leito. Isso reforça o grau de heterogeneidade do resíduo quanto à forma e tamanho, sugerindo que o diâmetro e a esfericidade são variáveis importantes no processo de embalagem de este grupo de partículas e que a segregação e a interação físico-química entre elas devem ser levadas em consideração em aplicações práticas.

Tabela 9: Densidade aparente e porosidade solta e compactada para caracterização do fluxo da casca de coco (CH, Grupo A) e casca (CS, Grupo B).

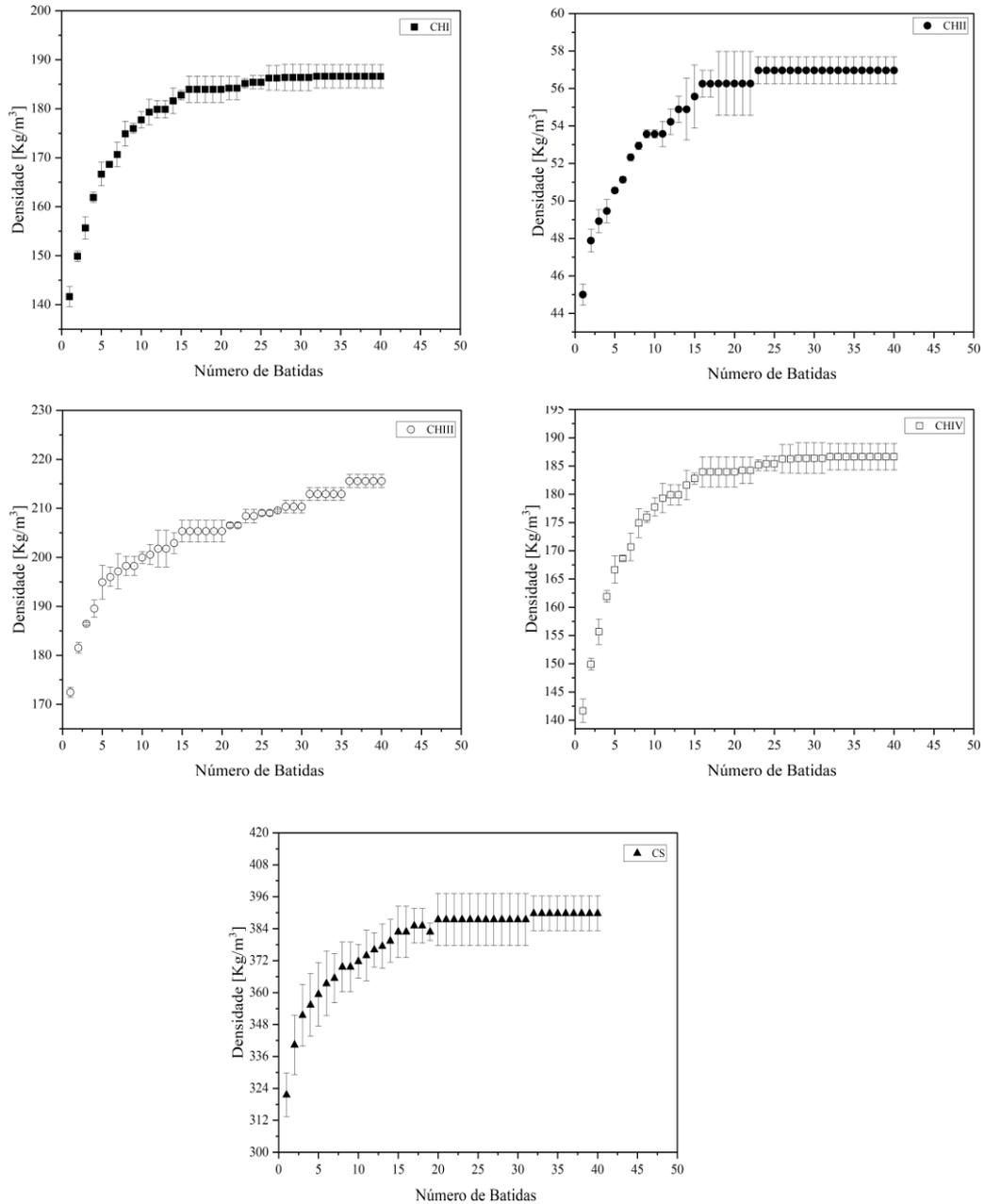
Grupo	Amostra	d_{sv} [mm]	ρ_{lb} [kg m ⁻³]	ρ_{tb} [kg m ⁻³]	ε_{lb} (%)	ε_{tb} (%)
A	CHI	5,24	39,00 ± 0,14	54,93 ± 0,20	96,01 ± 0,01	94,38 ± 0,02
A	CHII	2,57	45,00 ± 0,57	56,96 ± 0,72	88,48 ± 0,07	85,42 ± 0,09
A	CHIII	1,13	172,45 ± 1,06	215,56 ± 1,33	77,78 ± 0,14	72,23 ± 0,14
A	CHIV	0,23	141,65 ± 2,05	186,62 ± 2,35	86,01 ± 0,20	81,56 ± 0,20
B	CS	0,54	321,55 ± 8,13	389,73 ± 6,52	66,55 ± 0,85	59,46 ± 0,85

Fonte: Autoria própria

Os valores médios e os respectivos erros experimentais para a razão de Hausner, Car índice de compressibilidade e ângulo de repouso são apresentados na Tabela 10. Há uma diminuição do ângulo de repouso, índice de Carr e razão de Hausner com a diminuição do diâmetro das partículas para o Grupo A, como obtido por Rezaei et al. (2016) para partículas de cavacos moídos. Isso indica melhor fluidez de partículas com diâmetro reduzido e a necessidade prática de moer os resíduos de coco. É observada a relação intrínseca do ângulo de repouso com as amostras do mesmo grupo (Grupo A). Os resultados mostram valores menores do ângulo de repouso com partículas de menor tamanho, o que é consistente com o relato de Sousa e Ferreira (2019). Partículas de menor diâmetro apresentam uma acomodação melhor,

possibilitando uma menor taxa de espaços vazios, proporcionado assim uma compactação mais acentuada das partículas.

Figura 15: Variação da densidade do leito de partículas à medida que a compactação aumenta devido os sucessivos toques, para as partículas do grupo A (CH) e grupo B (CS).



Fonte: Autoria própria

Tabela 10: Razão de Hausner, índice de compressibilidade de Carr e ângulo de repouso da casca de coco moída (CH, Grupo A) e endocarpo (CS, Grupo B).

Group	Amostra	d_{sv} [mm]	HR	CCI (%)	θ [°]
A	CHI	5,24	$1,408 \pm 0,005$	$29,0 \pm 0,3$	$76,00 \pm 0,01$
A	CHII	2,57	$1,266 \pm 0,003$	$21,0 \pm 0,2$	$65,98 \pm 0,05$
A	CHIII	1,13	$1,250 \pm 0,011$	$20,0 \pm 0,8$	$59,90 \pm 0,04$
A	CHIV	0,23	$1,318 \pm 0,003$	$24,1 \pm 0,2$	$53,58 \pm 0,01$
B	CS	0,54	$1,212 \pm 0,005$	$17,5 \pm 0,7$	$54,09 \pm 0,03$

Fonte: Autoria própria

Os valores de HR , CCI e θ fornecem informações sobre os aspectos de fluxo do resíduo coco conforme mostrado na Tabela 11 em relação aos resultados do ângulo de repouso. Para o Grupo A, o pior fluxo a caracterização foi para fibras CH (amostra CHI) com $1,25 < HR < 1,4$ e $22 < CCI < 35$, indicando fluxo ruim uma vez que os valores obtidos experimentalmente se encontram nos intervalos descritos na literatura (Traina et al., 2013; Düsenberg et al., 2023). À medida que o diâmetro das partículas diminui, de acordo com o índice HR e CCI , a classificação do fluxo é boa e livre. O fluxo as características do Grupo B são boas e excelentes desde $1,1 < HR < 1,25$ (Düsenberg et al., 2023) e $5 < CCI < 15$ (Traina et al., 2013), respectivamente. No entanto, $\theta > 45$ indica má fluidez e coesividade das partículas da amostra CS e da amostra CHIV. Para as amostras CHI, CHII e CHIII, $\theta > 55$, indicando fluxo muito ruim e alto grau de coesão (Cai et al., 2017). Essa discrepância foi discutida por Düsenberg et al. (2023). Segundo os autores, é mais confiável analisar as características de fluidez somente do ângulo de repouso. Alta coesividade é encontrada para amostras CHI, CHII e CHIII. Os valores de HR e CCI mostram que a maioria das amostras de resíduos de coco flui facilmente em comparação com outras biomassas, como capim-rabo-de-raposa (Lam e Sokhansanj, 2014), solo casca (Rezaei et al., 2018) e partículas de abeto Douglas moídas com grandes diâmetros, mas com baixa fluindo para fibras (CHI) próximo aos relatados para partículas de cavacos e pellets moídos (Rezaei et al., 2016) e borra de café (Sousa e Ferreira, 2019). Quanto maior a presença de fibras na amostra, pior será a fluidez, o que dificulta o jorro ou a fluidização em condições termoquímicas processos de conversão.

Tabela 11: Classificação do fluxo e grau de fluidez em relação ao ângulo de repouso e à amplitude de Razão de Hausner, índice de compressibilidade de Carr e ângulo de repouso fornecidos pela literatura para os resultados obtidos a partir da casca de coco moída (CH, Grupo A) e do endocarpo (CS, Grupo B).

Grupo	Amostra	HR (Düsenberg et al., 2023)	CCI (%) (Traina et al., 2013)	θ [°] (Cai et al., 2017)	Classificação de Fluxo	Fluidez
A	CHI	$1,25 < HR < 1,4$	$22 < CCI < 35$	> 55	Pobre	Muito coeso
A	CHII	$1,1 < HR < 1,25$	$5 < CCI < 22$	> 55	Bom	Muito coeso
A	CHIII	$1,1 < HR < 1,25$	$5 < CCI < 22$	> 55	Livre	Muito coeso
A	CHIV	$1,1 < HR < 1,25$	$22 < CCI < 35$	$45 < \theta < 55$	Livre	Coeso
B	CS	$1,1 < HR < 1,25$	$5 < CCI < 15$	$45 < \theta < 55$	Bom	Coeso

Fonte: Autoria própria

Os resultados dos experimentos de permeamtria são apresentados na Tabela 12. Os resultados mostram que a queda de pressão aumenta com o aumento da velocidade do ar em um comportamento ligeiramente linear, caracterizando a região do leito fixo, na qual não há fluxo de ar suficiente para mover as partículas. Kung et al. (2021) apontaram que os desvios nos dados experimentais de o comportamento linear devem-se à limitação de um aparato experimental adequado que considere o tamanho das partículas e o diâmetro do leito. No caso dos resíduos de coco, a presença de materiais com diferentes tamanhos, densidades e formas (pó e fibra) criaram uma dificuldade adicional nas medições de queda de pressão devido à heterogeneidade das amostras, especialmente na amostra CHI, que é constituído principalmente por fibras de diferentes comprimentos e diâmetros. Os valores particulares de permeabilidade para cada amostra listada na Tabela 12 indicam a facilidade com que uma fase fluida pode mover-se através dos interstícios de um leito de resíduos de coco depende fortemente da estrutura e parâmetros físicos de sua matriz sólida porosa. Um leito com boa permeabilidade pode ser da ordem de 10^{-6} , ou seja, um leito menos denso que permite boa passagem de fluido através de seus interstícios. Os valores obtidos para CH e CS indicam uma resistência ao fluxo de fluido devido à baixa permeabilidade. Dos quais são a permeabilidade do Grupo A varia de 1,47 a $8,54 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ e do Grupo B $3,45 \times 10^{-9} \text{ m}$ dentro do intervalo obtido por Kung et al, (2021) para algumas biomassas como aparas de pinheiro ($1,5 \times 10^{-7} \text{ m}^2$), feno ($1 \times 10^{-7} \text{ m}^2$), casca de arroz ($8,6 \times 10^{-9} \text{ m}^2$) e serragem ($2,4 \times 10^{-10} \text{ m}^2$).

Tabela 12: Dados experimentais de permeamtria e valores previstos para casca de coco moída (CH, Grupo A) e endocarpo (CS, Grupo B).

Grupo	Amostra	β	k [m ²] (Experimental)	k [m ²] (Empírico)	c (Experimental)	c (Empírico)
A	CHI	1,48	$8,54 \times 10^{-8}$	$7,71 \times 10^{-6}$	0,07	0,12
A	CHII	1,9	$1,47 \times 10^{-9}$	$6,27 \times 10^{-7}$	0,13	0,2
A	CHIII	1,93	$8,52 \times 10^{-9}$	$3,61 \times 10^{-9}$	0,08	0,17
A	CHIV	1,77	$2,35 \times 10^{-8}$	$5,95 \times 10^{-9}$	0,02	0,16
B	CS	0,67	$3,45 \times 10^{-9}$	$1,65 \times 10^{-8}$	0,08	0,24

Fonte: autoria própria

Conforme demonstrado pelos resultados apresentados na Tabela 13, há um ligeiro efeito do diâmetro das partículas na velocidade terminal e, conseqüentemente, no coeficiente de arrasto. Em geral, partículas menores tendem a têm menor velocidade terminal e coeficiente de arrasto. Vale a pena notar que partículas mais alongadas com baixa esfericidade, como as fibras (CHI), apresentam menor resistência ao arrasto aerodinâmico do que as demais amostras. Este comportamento está de acordo com as discussões relatadas por Rasul et al. (2019) para bagaço de cana-de-açúcar. Conforme demonstrado anteriormente, há uma tendência de partículas menores apresentarem maior densidade. A diferença significativa entre os valores de CHI e CHIV sugere diferentes condições aerodinâmicas de operação nos processos de separação ou transporte dos componentes. Suarez e Beaton (2003) para cascas de café encontraram valores de velocidade terminal variando de 1,78 a 2,16 m s⁻¹. Nebra e Macedo (1988) relataram valores de v_t e C_D para bagaço de cana variando de 1,5 a 6 m s⁻¹ e 0,2 a 1, respectivamente.

Tabela 13: Velocidade terminal e coeficiente de arrasto para diferentes tipos de casca de coco moída (CH, Grupo A) e endocarpo (CS, Grupo B).

Grupo	Amostra	d_{sv} [mm]	v_t [m s ⁻¹]	C_D
A	CHI	5,24	$2,52 \pm 0,07$	$1,63 \pm 0,78$
A	CHII	2,57	$2,18 \pm 0,15$	$1,02 \pm 0,35$
A	CHIII	1,13	$1,71 \pm 0,15$	$0,78 \pm 0,08$
A	CHIV	0,23	$2,03 \pm 0,05$	$0,14 \pm 0,03$
B	CS	0,54	$2,15 \pm 0,07$	$0,28 \pm 0,06$

Fonte: autoria própria

4.3 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DAS AMOSTRAS

4.3.1 Composição Química

Para a análise da composição química foram utilizados a média de 2,18 g para CH (grupo A) composto por pelas e pós, uma vez que as partículas apenas diferem apenas por suas características físicas e 3,146g para CS (Grupo B) que diferente do grupo A, estas partículas se distinguem das demais partículas visualmente, sendo encontrados valores aproximados por Marafon et al. (2020), que obteve a porcentagem de 43,3% de Carbono para Grupo A de partículas e 48,7% para o grupo B, valores próximos aos encontrados neste trabalho. Também se obteve ainda segundo o mesmo autor valores de 5,35% de Hidrogênio para partículas do grupo A e 5,56% para as partículas do grupo B. Apresentando assim uma elevada concentração de de carbono juntamente com a concentração de Nitrogênio encontrada, cerca de $0,72 \pm 0,01$ para CH em base úmida e $0,78 \pm 0,01$ também em base úmida Tabela 14. Esta relação elevada entre Carbono e Nitrogênio justifica o elevando tempo de decomposição do resíduo de coco (Marafon et.al., 2020).

Tabela 14: Determinação da composição química presente em base úmida e seca, para as amostras do grupo A (CH) e grupo B(CS).

Base	Úmida [%]		Seca [%]	
Amostra	CH	CS	CH	CS
Carbono	$43,7 \pm 0,2$	$45,17 \pm 0,07$	$47,1 \pm 0,3$	$48,52 \pm 0,08$
Hidrogênio	$5,75 \pm 0,07$	$6,10 \pm 0,03$	$6,20 \pm 0,08$	$6,55 \pm 0,03$
Oxigênio	$37,7 \pm 0,5$	$35,7 \pm 0,3$	$40,6 \pm 0,5$	$38,4 \pm 0,4$
Nitrogênio	$0,72 \pm 0,01$	$1,42 \pm 0,06$	$0,78 \pm 0,01$	$1,53 \pm 0,06$
Enxofre	$0,87 \pm 0,04$	$0,90 \pm 0,01$	$0,94 \pm 0,04$	$0,97 \pm 0,01$

Fonte: autoria própria

4.3.2 Teor de Umidade

Para a análise da umidade foram utilizadas a massa média de 1,030g para o grupo A (CH) e 1,144g para o grupo B (CS), sendo realizadas triplicatas para obtenção dos dados, considerados em base úmida e seca respectivamente, sendo obtidos resultados relativamente baixos o que contribui para a utilização da biomassa como fonte de bioenergia, uma vez que o teor de umidade é um fator limitante para o potencial energético da biomassa (Silva et al., 2020). Em comparação aos resultados encontrados por Silva et al. (2020), que obteve para o pó de coco, partícula que compõe o grupo A e para fibra de coco também compondo o grupo A taxas de umidade de $15,10 \pm 0,20$ para o pó de coco e $13,00 \pm 0,60$ para a fibra, observa-se uma diferença significativa entre os resultados encontrados, uma vez que os partículas do presente estudo foram previamente desidratadas, restando apenas a umidade residual, o que corroborou para os resultados encontrados neste trabalho Tabela 15.

Tabela 15: Análise da umidade relativa contidas nas partículas dos grupos A(CH) e B(CS), em base seca e úmida.

Grupo	Amostra	Total de Sólidos [%]	Base Úmida [%]	Base Seca [%]
A	CH	$92,8 \pm 0,4$	$7,2 \pm 0,4$	$7,8 \pm 0,4$
B	CS	$93,1 \pm 0,6$	$6,9 \pm 0,6$	$7,5 \pm 0,7$

Fonte: autoria própria

4.3.3 A análise Termo gravimétrica (TGA)

O teor de cinzas que representa a fração de matéria restante da amostra desidratada de biomassa foi obtido através triplicata com a massa média de 1,805g para CH e 1,8807g para CS, apresentou resultados baixos tanto para as amostras do grupo A que obtiveram 4,93% de cinzas e 4,20% para as amostras do grupo B de partículas Tabela 16, apresentando uma variação com respeito a resultados obtidos anteriormente como os obtidos por Miola et al. (2020) que encontraram valores como 23,4% para o teor de cinzas para o resíduo de coco, Esteves, Abud e Barcellos (2015) que obtiveram valores próximos de $8,25 \pm 0,52$ também para

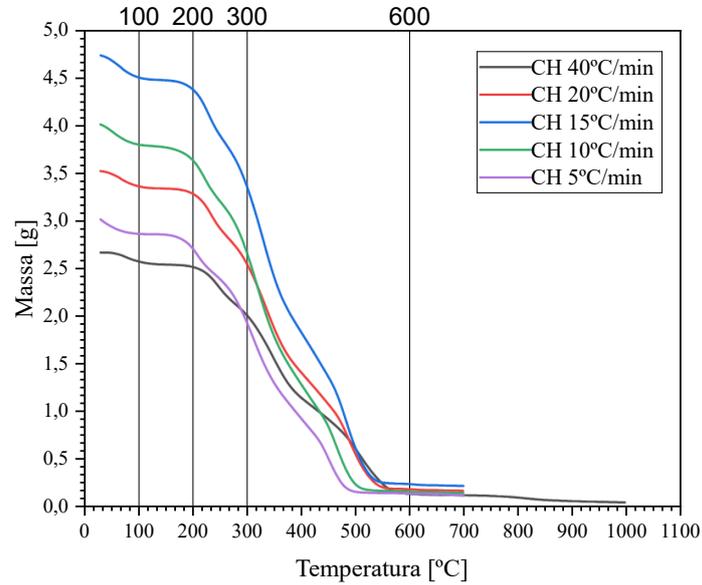
o resíduo de coco, Marafon et al. (2020) que obteve 7,7% de cinzas para a Casca de coco e 1,31% para o endocarpo, sendo este mais próximo dos valores encontrados neste trabalho, Sugerindo que a segregação entre as partículas do grupo A e B promovem resultados mais baixos para o teor de cinzas, e assim contribuindo para a eficiência deste resíduo para a geração de energia uma vez que segundo Alakangas, (2005) valores de 3 a 4% são tidos como baixos teores de cinzas. As Figuras 16 e 17 fazem uma comparação entre a variação de massa dos grupos A(CH) e B (CS) com relação a variação de temperatura e também demonstra o intervalo de decomposição das moléculas de lignina, sendo sua decomposição ligada a liberação de energia, onde segundo Freitas et al. (2020) sua decomposição ocorre durante o intervalo de 100 °C a 200 °C de forma moderada e forma acentuada de 300 °C a 600 °C. Foi observado ainda que para as amostras de CH a uma estabilização de massa entre as temperaturas de 250 °C e 300 °C, variado a temperatura no intervalo de 10 minutos. Pra as amostras do grupo B (CS) esta estabilização se deu entre as temperaturas de 250 °C e 300 °C, indicando uma relação entre os tipos de partículas, para sua utilização em conjunto como fonte de bioenergia.

Tabela 16: Massa inicial da amostra (m_a), Massa final da amostra (m_f) e teor de cinzas obtidos para as amostras do grupo A moídas (CH) e para as amostras do Grupo B (CS), também moídas.

Grupo	Amostra	m_a	m_f	T_c [%]
A	CH	1,805± 0,021	0,089± 38,385	4,93 ± 0,02
B	CS	1,880± 0,047	0,079± 42,661	4,20 ± 0,03

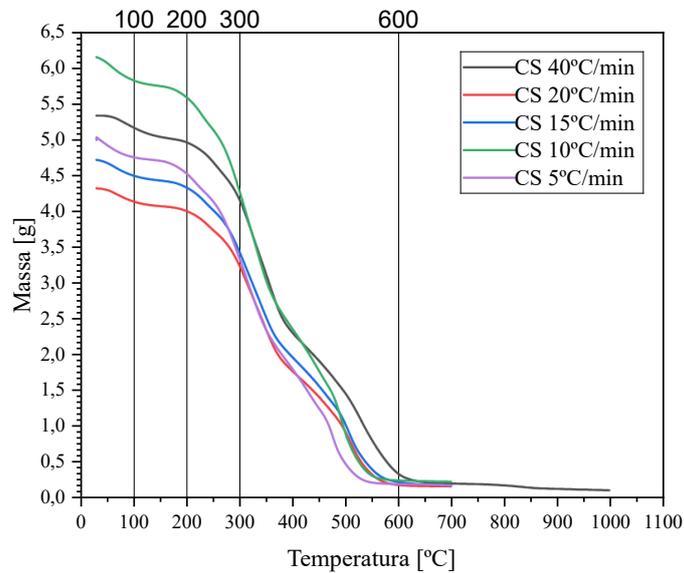
Fonte: autoria própria

Figura 16: Análise da variação de massa pela variação da temperatura, sendo consideradas a amostra de CH, (Grupo A), variando-se a temperatura de 5 °C, 10 °C, 15 °C e 40 °C no intervalo de 1 minuto.



Fonte: Autoria própria

Figura 17: Análise da variação de massa pela variação da temperatura, sendo consideradas a amostra de CS, (Grupo A), variando-se a temperatura de 5 °C, 10 °C, 15 °C e 40 °C no intervalo de 1 minuto.



Fonte: Autoria própria

4.3.4 Determinação da Condutividade térmica efetiva

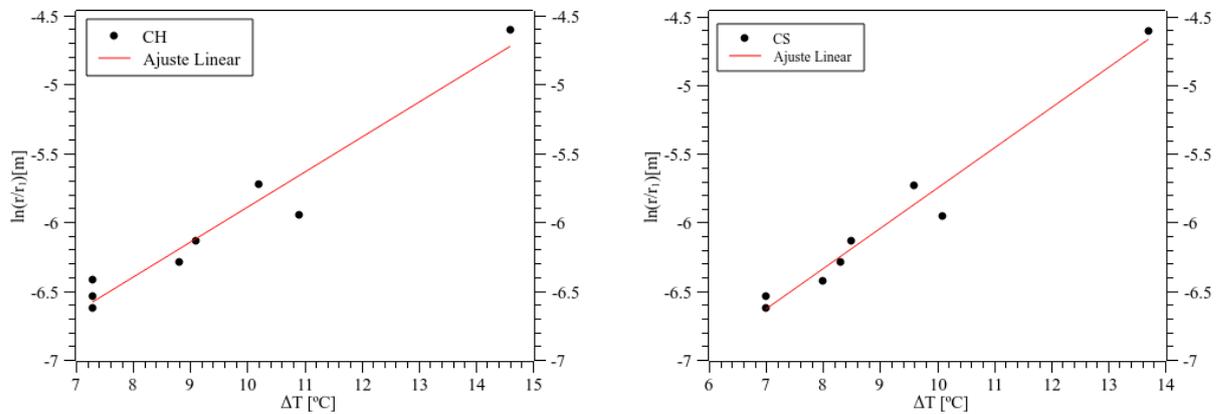
Para o estudo de condutividade térmica segue-se os procedimentos descritos na seção 3.14, deste trabalho, onde a temperatura foi aferida no intervalo de 10 minutos, constatando uma baixa variação de temperatura durante todo o período da experimentação. Tal resultado indica relativa dificuldade de propagação do calor entre as partículas. Foi verificado que as temperaturas referentes ao termo pares mais externos, de 3,50 cm, 4,50 cm e 4,90 cm apresentavam baixa variação de temperatura, 37,8 °C, 37,8 °C e 37,8 °C, corroborando com o fenômeno observado e justificando os resultados encontrados para a condutividade térmica K_{eFF} , sendo de 0,2545 W/m°C para as partículas de CH e 0,2934 W/m°C para as de CS, o que implica na conclusão de que as partículas se mostram de baixa condutividade, se destacando as partículas de CH, que por possuírem grande quantidade de fibras, gera-se uma grande quantidade vazios e dificultado a transmissão de calor, justificando uma condutividade menor do que as apresentada pelas partículas de CS Tabela 17.

Tabela 17-Condutividade térmica obtidas para as amostras do grupo A (CH) e para a amostra do grupo B (CS).

Amostra	K_{eFF} [W/m°C]
CH	0,2545
CS	0,2934

Fonte: Autoria própria

Figura 18: Ajuste linear para as amostras de CH (Grupo A) e CS (grupo B), com dados obtidos no processo de determinação da condutividade térmica, onde analisou-se a variação de temperatura em função do descolamento.



Fonte: Autoria própria

4.3.5 Poder calorífico para o resíduo de coco

Com relação ao poder calorífico Tabela 18 das amostras, foi observado que o poder calorífico apresentado possui aproximação com os valores encontrados na literatura de 19,47 MJ/kg (Dias et al., 2019), apontando que a biomassa de coco pode vir a ser utilizada como fonte de bioenergia. Verifica-se ainda que o *PC* para ao CS se mostram pouco maior quando se compara ao grupo A, cerca de $17,5 \pm 0,2$ MJ, corroborando com valores encontrados por Marafon et al. (2020), Tabela 1.

Tabela 18: Resultados para as amostras de Grupo A (CH) e para as amostras do grupo B (CS), do poder calorífico das partículas em estudo.

Grupo	Amostra	Massa [g]	PC [MJ]
A	CH	$0,340 \pm 0,008$	$17,5 \pm 0,2$
B	CS	$0,349 \pm 0,079$	$17,8 \pm 0,3$

5 CONCLUSÃO

No presente trabalho, as partículas do grupo A(CH) e grupo B(CS) foram caracterizadas por importantes propriedades físicas, química, térmicas e propriedades de fluxo, como biomassa para aplicações termoquímicas. Com base nos resultados obtidos, as seguintes conclusões podem ser tiradas.

As cascas e cascas de coco correspondem aos grupos D e B de Geldart, completando a gama de partículas suscetíveis à fluidização e ao jorro. No geral, a esfericidade aumentou de 0,18 para 0,64 com a diminuição do diâmetro médio de Sauter de 5,24 para 0,23 mm, mas o fator de alongamento diminuiu de 5,56 para 1,56 com o tamanho. Isso indica uma área de contato menor que pode afetar o desempenho e a operação condições dos sistemas de transferência de calor e massa.

As análises de imagens mostram que a morfologia das partículas do resíduo de coco é rugosa e tem uma matriz sólida altamente porosa com características semelhantes às de um favo de mel, com presença de pequenos dutos cilíndricos de diferentes diâmetros. A compressibilidade das partículas foi maior para amostras com maior presença de fibras de baixo fluxo classificação, grau de fluidez muito coeso e velocidade terminal na faixa de $1,13 \cdot 10^{-5}$ a $2,24 \cdot 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$. Classificação de fluxo livre ou bom, mas grau de fluidez coesiva foi encontrado para pó e amostras com menor presença de fibras como casca de coco com velocidade terminal de $0,54 \text{ ms}^{-1}$. O coeficiente de arrasto foi maior para amostras com diâmetros de partículas maiores e maior presença de fibras, indicando menor resistência ao arrasto aerodinâmico. A casca e a casca do coco apresentaram baixa permeabilidade ao fluxo de fluidos ($<10^{-6} \text{ ms}^{-1}$). O resíduo de coco apresenta valores correspondentes os valores encontrados na literatura em sua análise química, onde as porcentagens de Carbono e Hidrogênio se amostra mais evidentes, e justificado a importância de se aproveitar este resíduo, que por possuírem valores significativos destes elementos, apresentam um elevado tempo de decomposição.

Com relação a análise energética onde foram apresentados os valores obtidos para o teor de cinzas, poder calorífico e condutividade térmica, os valores obtidos para o poder caloríficos ficaram dentro dos apresentados pela literatura, constatando que a biomassa se mostra promissora para a utilização como fonte de bioenergia, mesmo sendo obtidos valores baixos para a condutividade térmica, no entanto este parâmetro não deve ser um limitador para a

utilização da biomassa que apresenta valores significativos quanto ao teor de cinzas, sendo encontrado valor baixo e que corroboram para o emprego da biomassa como fonte de energia, constatando que o resíduo de coco se mostra promissor e que pode contribuir significativamente como fonte de energia.

6 TRABALHOS FUTUROS

Como a presente pesquisa acerca da caracterização das partículas de coco, fica proposto ainda investigações futuras.

- Investigação para o processamento da biomassa como fonte de energia, uma vez que o resíduo de coco quando processado apresenta diversas partículas com suas respectivas características.
- Desenvolvimento de ferramentas ou tecnologia que permita o processamento eficiente desta fonte de energia.

7 REFERÊNCIAS

Ahmad, R.K.; Sulaiman, S.A.; Yusup, S.; Dol, S.S.; Inayat, M.; Umar, H.A. Exploring the potential of coconut shell biomass for charcoal production. *Ain Shams Engineering Journal*, 13, 2022, 101499. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.05.013>

Ajien, A.; Idris, J.; Sofwan, N.M.; Husen, R.; Seli, H. Coconut shell and husk biochar: A review of production and activation technology, economic, financial aspect and application. *Waste Management and Research*, 41, 2023, 37-51. <https://doi.org/10.1177/0734242x221127167>

Alakangas, E. (2005) Bionergy in Finland. In: EUBIONET. International Training Programme: wood fuel production for small scale and district heating plants. Joensuu.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica (National Electric Energy Agency), 2022. FAQ: Ask your questions about the Water Scarcity Tariff. Available at: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2022/faq-tire-suas-duvidas-sobre-a-bandeira-escassez-hidrica>. Accessed on: 30/07/2024. (in Portuguese)

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica (National Electric Energy Agency), 2022. FAQ: Ask your questions about the Water Scarcity Tariff. Available at: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2022/faq-tire-suas-duvidas-sobre-a-bandeira-escassez-hidrica>. Accessed on: 30/07/2024. (in Portuguese)

Araújo, A.P.F.; Nascimento, M.A.; Bezerra, J.C.S.; Oliveira, M.S.O.; Lago, T.G.S.; Marques, A.S. Green coconut shell as energy biomass: a bibliometric and systematic analysis of scientific literature. *International Journal of Hydrology*, 8, 2024, 106-114. <https://doi.org/10.15406/ijh.2024.08.00381>

Ashwini, K.; Resmi, R.; Reghu, R. Pyrolysis characteristics and kinetic analysis of coconut shell and nutmeg shell for potential source of bioenergy. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 50, 2024, 101615. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2024.101615>

Azeta, O.; Ayeni, A.O.; Agboola, O.; Elehinafe, F.B. A review on the sustainable energy generation from the pyrolysis of coconut biomass. *Scientific African*, 13, 2021, 00909. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00909>

BRAINER, Maria Simone de Castro Pereira. 2021, *Coco: produção e mercado*. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil ano 6, n.206, dez., 2021. (Caderno Setorial Etene)

BERGAMN, T. L.; LAVINE, A. S.; INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 7. ed. John Willey and Sons, 2011. 1048 p.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. *Fenômenos de transporte*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004. 838 p.

Bulk permeability characteristics in a biomass moving bed and their effects on reactor design and scaling. *Chemical Engineering Journal*, 420, 2021, 129979. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129979>
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118304702>)
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589014X24000720>)

Barros Dias, N., Zimmermann Schneider, P., de Lorena Diniz Chaves, G., & Cardoso Celeste., 2019. Aproveitamento Da Casca De Coco Verde Para Uso Energético. *Brazilian Journal of Production Engineering*, São Mateus, Espírito Santo, Brazil, 5, 179–195. https://periodicos.ufes.br/bjpe/article/view/V05N03_13. Acesso em: 16 out. 2024.

Barrozo, M.A.S.; Borel, L.D.M.S., Lira, T.S., Ataíde, C.H. Fluid dynamics analysis and pyrolysis of brewer's spent grain in a spouted bed reactor. *Particuology*, 42, 2019, 199-207. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2018.06.001>

Beatriz Nastaro Boschiero, Sérgio Gustavo Quassi de Castro, Larissa Prado da Cruz, João Luis Nunes Carvalho, Sérgio Ricardo Silva, José Antonio Bressiani, Oriel Tiago Kölln.,2023. Biomass yield, nutrient removal, and chemical composition of energy cane genotypes in Southeast Brazil, *Industrial Crops and Products*. 191, 0926-6690, 115993. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115993>.

Beh, J.H.; Yew, M.K.; Yew, M.C.; Saw, L.H. Characterization and fire protection properties of rubberwood biomass ash formulated intumescent coatings for steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 14, 2021, 2096-2106. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.07.103>

Bill Vaneck Bot ,Olivier Thierry Sosso ,Jean Gaston Tamba ,Eugénie Lekane ,Jacques Bikai &Max Keller Ndamé., 2021. Preparação e caracterização de briquetes de biomassa a partir de casca de banana, bagaço de cana-de-açúcar, casca de coco e resíduo de rattan. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13, 7937–7946. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01762-w>

Bill Vaneck Bot, Petros J. Axaopoulos, Evangelos I. Sakellariou, Olivier Thierry Sosso, Jean Gaston Tamba., 2022. Energetic and economic analysis of biomass briquettes production from agricultural residues. *Applied Energy*, 321, 119430. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119430>

Björn Düsenberg, Jochen Schmidt, İkey Sensoy, Andreas Bück., 2023. Flowability of plant based food powders. *Journal of Food Engineering*, 357, 111606, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111606>.

Cai, J.; He, Y.; Yu, X.; Banks, S.W.; Yang, Y.; Zhang, X.; Yu, Y.; Liu, R.; Bridgwater, A.V. Review of physicochemical properties and analytical characterization of lignocellulosic biomass. *Renewable and Sustainable Energy reviews*, 76, 2017, 309-322. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.072>

Caldeira, M. J. V.; Ferraz, G. M. F.; Santos, I. F. S.; Tiago Filho, G. L.; Barros, R. M., 2023. Using solar energy for complementary energy generation and water level recovery in Brazilian

hybrid hydroelectricity: Na energy and economic study. *Renewable Energy*, 218, 119287. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119287>

Caldeira, M. J. V.; Ferraz, G. M. F.; Santos, I. F. S.; Tiago Filho, G. L.; Barros, R. M., 2023. Using solar energy for complementary energy generation and water level recovery in Brazilian hybrid hydroelectricity: Na energy and economic study. *Renewable Energy*, 218, 119287. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119287>

CreMASCO, M. A. Unit operations in particulate and fluid mechanics systems. (2nd ed.). Blucher, São Paulo, 2014. (in Portuguese)

Cui Wang, Linfeng Li, Jinwen Shi, Hui Jin., 2021. Biochar production by coconut shell gasification in supercritical water and evolution of its porous structure. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 156, 105151. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105151>.

d'Ávila, J.S.; Sampaio Filho, R. Particulate systems. UFS, Aracaju, 1990. (in Portuguese)
density measurement. *Powder Technology*, 235, 2013, 842-852. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2012.11.039>

Deyber A. Ramirez-Quintero, Waldir A. Bizzo., 2023. Experimental characterization of the size, shape and ash composition of solid particles from different biomasses and separated by elutriation. *Biomass and Bioenergy*, 172, 106767. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106767>.

DESHPANDE, S.D.; BAL, S.; OJHA, T. P. Bulk thermal conductivity and diffusivity of soybean. *Journal of Food Processing and Preservation*, 1996, v.20, p. 177 - 189.

Dilan Irmak Aslan, Buğçe Özoğul, Selim Ceylan, Feza Geyikçi., 2018. Thermokinetic analysis and product characterization of Medium Density Fiberboard pyrolysis. *Bioresource Technology*, 258, 105-110. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.02.126>.

DP Clean Tech. Understanding coconut as a biomass fuel. Available at: www.dpcleantech.com. Accessed: 01/08/2024.

Düsenberg, B.; Schmidt, J.; Sensoy, I.; Bück, A. Flowability of plant based food powders: Almond, chestnut, chickpea, coconut, hazelnut and rice. *Journal of Food Engineering*, 357, 2023, 111606. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111606>

El-sayed, S.A.; Mostafa, E.M. Analysis of grain size statistic and particle size distribution of biomass powders. *Waste and Biomass Valorization*, 5, 2014, 1005-1018. <https://doi.org/10.1007/s12649-014-9308-5>

EPE-Balanco Energético Nacional 2019. EPE, 2019. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2019>>. Acesso em: 28 Nov. 2024.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética (Energy Research Company), 2023. BEN 2024: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-15/BEB_Summary_Report_2024.pdf. Accessed on: 30/07/2024

Esteves, m.r.l.; Abud, A.K.S.; Barcellos, K.M. (2015) Avaliação do potencial energético das cascas de coco verde para aproveitamento na produção de briquetes. *Scientia Plena*, v. 11, n. 3, p. 1-8.

Fernanda Cristina Rezende Lopes, Katia Tannous., 2020. Coconut fiber pyrolysis decomposition kinetics applying single- and multi-step reaction models, *Thermochimica Acta*, 691, 178714. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2020.178714>

Figueiredo, A.L., Sousa, J.F., Pedroza, M.M., Bezerra, M.B.D. Straight pyrolysis of coconut husk in a rotating cylinder reactor and product characterization. *Brazilian Journal of Petroleum and Gas*, 16, 2022, 91-101. <https://doi.org/10.5419/bjpg2022-0008>

Freire, J. T. Transferência de calor em meios porosos. 1979. 223 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1979.

Freitas, P.F., Carvalho, A.M.M.L., Carneiro, A.C.O, Gouvêa, A.F.G., Carvalho, A.G., Pereira, M.P.C.F. Decomposição térmica de resíduos lignocelulósicos visando seu aproveitamento para fins energéticos 2017. *Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)*, 29-35. <https://10.12953/2177-6830/rcm.v8n1p29-35>

G. San Miguel, M.P. Domínguez, M. Hernández, F. Sanz-Pérez., 2012. Characterization and potential applications of solid particles produced at a biomass gasification plant. *Biomass and Bioenergy*, 47, 134-144. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.09.049>.

Gabriel Gonçalves da Costa, Ivan Felipe Silva dos Santos, Regina Mambeli Barros, Geraldo úcio Tiago Filho, Gabriel de Oliveira Machado, Matheus David Guimarães Barbedo, 2022. Mapping and energy analysis of Brazilian bioenergy power potential for three agricultural biomass byproducts, *Journal of Cleaner Production*, 349, 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131466>.

Guo, Q.; Chen, X.; Liu, H. Experimental research on shape and size distribution of biomass particle. *Fuel*, 94, 2012, 551-555. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.11.041>

Hamid Rezaei, C. Jim Lim, Anthony Lau, Shahab Sokhansanj., 2016. Size, shape and flow characterization of ground wood chip and ground wood pellet particles. *Powder Technology*, 301, 737-746. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.07.016>

Igathinathane, C., Melin, S., Sokhansanj, S., Bi, X., Lim, C. J., Pordesimo, L. O., & Columbus., 2009. Machine vision based particle size and size distribution determination of airborne dust particles of wood and bark pellets. *Powder Technology*, 196, 202-212. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2009.07.024>.

Igathinathane, C.; Melin, S.; Sokhansanj, S.; Bi, X.; Lim, C.J.; Pordesimo, L.O.; Columbus, E.P. Machine vision based particle size and size distribution determination of airborne dust particles of wood and bark pellets. *Powder Technology*, 196, 2009, 202-212. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2009.07.024>

Ighalo, J.O.; Conradie, J.; Ohoro, C.R.; Amaku, J.F.; Oyedotun, K.O.; Maxakato, N.W., Akpomie, K.G.; Okeke, E.S.; Olisah, C.; Malloum, A.; Adegoke, K.A. Biochar from coconut residues: An overview of production, properties, and applications. *Industrial Crops and Products*, 204, 2023, 117300. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117300>

Jianlong Wang, Shizong Wang., 2019. Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. *Journal of Cleaner Production*, 227,1002-1022<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.282>.

KEEY, R. B. Drying of loose and particulate materials. 1. ed. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1992. 504 p.

Kittiphop Promdee, Jirawat Chanvidhwatanakit, Somruedee Satitkune, Chakkrich Boonmee, Thitipong Kawichai, Sittipong Jarernprasert, Tharapong Vitidsant., 2017. Characterization of carbon materials and differences from activated carbon particle (ACP) and coal briquettes product (CBP) derived from coconut shell via rotary kiln. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1175-1186.<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.099>

Kpalo, Sunday Yusuf, Mohamad Faiz Zainuddin, Latifah Abd Manaf e Ahmad Muhaimin Roslan., 2020. "Uma revisão dos aspectos técnicos e econômicos da briquetagem de biomassa" *Sustainability*, 12(11), 4609. 2020. <https://doi.org/10.3390/su12114609>

Kung, K.S.; Thengane, S.K.; Ghoniem, A.F.; Lim, C.J.; Sokhansanj, S.

L. Massaro Sousa, M.C. Ferreira., 2019. Spent coffee grounds as a renewable source of energy: An analysis of bulk powder flowability. *Particuology*, 43, 92-100.<https://doi.org/10.1016/j.partic.2018.06.002>

L.R.A. Ferreira, R.B. Otto, F.P. Silva, S.N.M. De Souza, S.S. De Souza, O.H. Ando Junior, Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 94, 2018, Pages 440-455, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.034>.

La Ifa, Setyawati Yani, Nurjannah Nurjannah, Darnengsih Darnengsih, Andi Rusnaenah, Maizirwan Mel, Mahfud Mahfud, Heri Septya Kusuma., 2020. Techno-economic analysis of bio-briquette from cashew nut shell waste. *Heliyon*, 6, e05009. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05009>.

Lam, P.S.; Sokhansanj, S. Engineering properties of biomass. In Y. Shastri, A. Hansen, L. Rodríguez, K.C. Ting (Eds.), *Engineering and science of biomass feedstock production and provision*, Vol. 1, 1st ed., pp. 17–35), New York: Springer, 2014.

Lenço, P.C.; Ramirez-Quintero, D.A.; Bizzo, W.A. Characterization of sugarcane bagasse particles separated by elutriation for energy generation. *Renewable Energy*, 161, 2020, 712-721. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.046>

Luane A. Nunes, Maria L.S. Silva, Juliano Z. Gerber, Ricardo de A. Kalid, 2020. Waste green coconut shells. *Journal of Cleaner Production*, 255, 120169. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120169>.

Marafon, A. C.; Nunes, M. U.C.; Amaral, A. F. C.; NUNES, A. M. L.; Santos, J. P., 2019. Aproveitamento de cascas de coco para geração de energia térmica, potencialidades e desafios. *Documentos / Embrapa Tabuleiros Costeiros*, 234, 1678-1953. 2019. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/210127/1/DOC-234.pdf>

Massarani, G. (2002). *Fluidynamics in particulate systems*. E-papers, Rio de Janeiro, (Chapter 2). (in Portuguese)

MATTOS, A. L. A.; ROSA, M. F.; CRISOSTOMO, L. A.; BEZERRA, F. C.; CORREIA, D.; VERAS, L. G. C, 2009. *Beneficiamento da Casca de Coco Verde*. Fortaleza: Embrapa. Disponível em: https://www.academia.edu/22722775/BENEFICIAMENTO_DA_CASCA_DE_COCO_VE_RDE?auto=download.

Miola, B., Frota, M. M. M., Oliveira, A. G. de ., Uchôa, K. M., & Leandro Filho, F. de A., 2020. Aproveitamento energético dos resíduos de cascas de coco verde para produção de briquetes. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 25(4), 627–634. <https://doi.org/10.1590/S1413-4152202020180029>

Mishra, B.; Mohanta, Y.K.; Reddy, N.; Reddy, S.D.M., Mandal, S.K.; Yadavalli, R.; Sarma, H. Valorization of agro-industrial biowaste to biomaterials: An innovative circular bioeconomy approach. *Circular Economy*, 2, 2023, 10050. <https://doi.org/10.1016/j.cec.2023.100050>

Nebra, S.A.; Macedo, I.D.C. Bagasse particles shape and size and their free-settling velocity, *International Sugar Journal*, 90, 1988, 168-170.

Nunes, L.A.; Silva, M.L.S.; Gerber, J.Z.; Kalid, R.A. Waste green coconut shells: Diagnosis of the disposal and applications for use in other products. *Journal of Cleaner Production*, 255, 2020, 120169. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120169>

Nunes., 2021. Coprodutos. Embrapa Tabuleiros Costeiros. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/coco/pos-producao/coprodutos>. Acesso em: 18 Out. 2024.

OECD, The Observatory of Economic Complexity. Coconuts, fresh or dried. 2024. Available at: <https://oec.world/en/profile/hs/freshdried-coconuts>. Accessed: 01/08/2024.

Oliveira, O. PROCESSOS DE VALORIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DO COCO. Tese Mestre em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, p. 15. 2017.

Osarhiemhen Azeta, Augustine O. Ayeni, Oluranti Agboola, Francis B. Elehinafe., 2021. A review on the sustainable energy generation from the pyrolysis of coconut biomass. *Scientific African*, 13, e00909. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00909>.

Padilla, E. R. D.; Belini, G. B.; Nakashima, G. T.; Waldman, W. R.; Yamaji, F. M.*, 2018. Potencial Energético da Casca de Coco (*Cocos nucifera* L.) para Uso na Produção de Carvão Vegetal por Pirólise. *Revista Virtual Química*, 10, 334-345. DOI: 10.21577/1984-6835.20180026

Perez, N.P.; Pedroso, D.T.; Machin, E.B.; Antunes, J.S.; Tuna, C.E.; Silveira, J.L. Geometrical characteristics of sugarcane bagasse for being used as fuel in fluidized bed technologies. *Renewable Energy*, 143, 2019, 1210-1224. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.082>

Ramirez-Quintero, D.A.; Bizzo, W. Experimental characterization of the size, shape and ash composition of solid particles from different biomasses and separated by elutriation. *Biomass and Bioenergy*, 172, 2023, 106767. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106767>

Rasul, M.G.; Rudolph, V.; Carsky, M. Physical properties of bagasse. *Fuel*, 78, 1999, 905-910. [https://doi.org/10.1016/s0016-2361\(99\)00011-3](https://doi.org/10.1016/s0016-2361(99)00011-3)

Reetu Raj, Jeewan Vachan Tirkey, Priyaranjan Jena., 2023. Gasification of Briquette, Mahua wood, and Coconut shell and application to CI engines: Comparative performance and optimisation analysis. *Industrial Crops and Products*, 199, 116758. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116758>

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, 2016, 737-746. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2016.07.016>

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

Rezaei, H.; Tajilrou, M.; Lee, J.S.; Singaraveloo, K.; Lau, A.; Sokhansanj, S. Evolution of biomass particles during pelletization process. *Particuology*, 86, 2024, 182-187. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2023.05.007>

Rezaei, H.; Yazdanpanah, F.; Lim, C.J.; Sokhansanj, S. Pelletization properties of refuse-derived fuel - Effects of particle size and moisture content. *Fuel Processing Technology*, 205, 2020, 106437. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106437>

Richardson, J.F.; Harker, J.H.; Backhurst, J.R. *Coulson and Richardson's Chemical Engineering*. Vol. 2. 5th Edition. Oxford, Butterworth Heinemann, 2002.

Sa'diyah, K.; Rohman, F.; Harsanti, W.; Nugraha, I.; Febrianto, N.A. Pyrolysis of coconut coir and shell as alternative energy source. *Jurnal Bahan Alam Terbarukan*, 7, 2018, 115-120. <https://doi.org/10.15294/jbat.v7i2.11393>

Silva, E.C.; Martins, R.V.; Junger, A.P; Guerra S.M.G.; Amaral, L.H. (2018) aproveitamento e potencial energético da biomassa do coco verde. *Revista de Casos e Consultoria*, v. 09, n. 3, ISSN 2237-7417.

Sousa, L. M.; Amblard, B.; Montjovet, F.; Tebianian, S. Characterization of a pressurized feeder for biomass injection into gas-solid systems. *Chemical Engineering Research and Design*, 175, 2021, 171-181. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2021.08.024>

Sousa, L.M.; Ferreira, M.C. Spent coffee grounds as a renewable source of energy: An analysis of bulk powder flowability. *Particuology*, 43, 2019, 92-100. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2018.06.002>

Souto, B.A., Souza, V.L.C., Perazzini, M.T.B.; Perazzini, H. 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*, 279, 2021, 123484. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123484>

Souza, T.C.A.; Araújo, J.A.; Perazzini, M.T.B.; Perazzini, H. Drying of granular cellulosic fibers by-products: Material characterization, kinetics modeling, and costs analysis towards

process optimization. *Bioresource Technology Reports*, 15, 2021, 100820. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100820>

Su, J.; Zhou, C.; Chen, H.; Xia, N.; Shi, Z. The physical and mechanical properties for flexible biomass particles using computer vision. *Fuel*, 315, 2022, 123278. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123278>

T. Agrizzi, M.A. Oliveira, E.V. Faria, K.G. Santos, T.P. Xavier, T.S. Lira, Assessing coconut shell pyrolysis: Biomass characterization, activation energy estimation, and statistical analysis of operating conditions, *Bioresource Technology Reports*, Volume 26, 2024, 101831, ISSN 2589-014X, <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101831>.

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, 2013, 291-300. <https://doi.org/10.1080/02726351.2012.732676>

Traina, K.; Cloots, R.; Bontempi, S.; Lumay, G.; Vandewalle, N.; Boschini, F. Flow abilities of powders and granular materials evidenced from dynamical tap

Uzogba, C.E.J.; Okoroigwe, E.; Kadivar, M.; Anye, V.C.; Bello, A.; Ezealigo, U.; Ngasoh, F.O.; Pereira, H.; Onwualu, P.A. Characterization of Wood, Leaves, Barks, and pod wastes from *Prosopis africana* biomass for biofuel production. *Waste Management Bulletin*, 2, 2024, 172-182. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.07.007>

WELTY, J. R.; WICKS, C. E.; WILSON, R. E.; RORRER, G. L. *Fundamentals of momentum, heat and mass transfer*. 5. ed. John Willey and Sons, 2008. 711 p.

Worldstats. Coconut production by country in the year 2024. Available at <https://worldostats.com/coconut-production-by-country-2024/>. Accessed: 01/08/2024.

