



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
INTERDISCIPLINAR EM ENERGIA E
SUSTENTABILIDADE**

**POTENCIALIDADES DOS RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS PARA GERAÇÃO DE
ENERGIA POR MEIO DE BRIQUETES DE SERRAGEM E ÓLEO DE FRANGO**

RODRIGO MAZOLINI IMBERTI

Foz do Iguaçu - PR
2024



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
INTERDISCIPLINAR EM ENERGIA E
SUSTENTABILIDADE**

**POTENCIALIDADES DOS RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS PARA GERAÇÃO DE
ENERGIA POR MEIO DE BRIQUETES DE SERRAGEM E ÓLEO DE FRANGO**

RODRIGO MAZOLINI IMBERTI

Tese de Doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade do Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Energia e Sustentabilidade.

Área de concentração: Energia e Sustentabilidade

Orientador: Prof. Dr. Leonardo da Silva Arrieche
Coorientadora: Prof^ª. Dr^ª Janine Padilha Botton

Catálogo elaborado pelo Setor de Tratamento da Informação
Catálogo de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA - PTI

I32

Imberti, Rodrigo Mazolini.

Potencialidades dos resíduos agroindustriais para geração de energia por meio de briquetes de serragem e óleo de frango / Rodrigo Mazolini Imberti. - Foz do Iguaçu, 2024.

122 f.: il., color.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território, Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade. Foz do Iguaçu - PR, 2024.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo da Silva Arrieche.

Coorientadora: Profa. Dra. Janine Padilha Botton.

1. Frango assado. 2. Serraria. 3. Árvore de Estados. 4. Regras Heurísticas. 5. Sustentabilidade. 6. Combustão. I. Arrieche, Leonardo da Silva. II. Botton, Janine Padilha. III. Título.

CDU 620.952:628.4.038

POTENCIALIDADES DOS RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA POR MEIO DE BRIQUETES DE SERRAGEM E ÓLEO DE FRANGO

Tese de Doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade do Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Energia e Sustentabilidade.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



LEONARDO DA SILVA ARRIECHE

Data: 22/04/2024 22:31:05-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador: Prof. Dr. Leonardo da Silva Arrieche
UNILA

Documento assinado digitalmente



JANINE PADILHA BOTTON

Data: 23/04/2024 08:12:00-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Coorientadora: Profa. Dra Janine Padilha Botton
UNILA

Documento assinado digitalmente



ANA BEATRIZ NEVES BRITO

Data: 23/04/2024 11:26:16-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dr^a. Ana Beatriz Neves Brito
UFES

Documento assinado digitalmente



PAULO RODRIGO STIVAL BITTENCOURT

Data: 23/04/2024 13:26:58-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Paulo Rodrigo Stival Bittencourt
UTFPR

Documento assinado digitalmente



RODRIGO MONTEIRO ELIOTT

Data: 23/04/2024 11:17:01-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Rodrigo Monteiro Elliott
UNILA

Prof^a. Dr^a. Andréia Cristina Furtado
UNILA

Foz do Iguaçu, 27 de março de 2024.

Dedico este trabalho a Deus e a minha família que me deram forças.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, expresso minha profunda gratidão a Deus, o autor da vida, que me concedeu força e resiliência, especialmente nos momentos mais desafiadores.

Estendo meu sincero agradecimento ao meu orientador, Leonardo, que tem sido um guia constante desde os tempos do meu mestrado. Sua paciência e apoio foram fundamentais, mesmo nos momentos em que talvez eu não os merecesse. Sua orientação e incentivo foram cruciais em minha jornada.

A minha coorientadora, Janine, que se juntou a nós no meio do caminho, ofereço minha gratidão por sua dedicação e esforços extraordinários para manter meu ânimo durante o doutorado. Peço desculpas a ambos, pelos momentos em que trouxe mais trabalho do que o necessário.

Agradeço ao professor Osvaldo por todas as contribuições ao longo da minha trajetória no doutorado e pela rápida participação como meu coorientador. Aproveito e agradeço a todos os professores do PPGIES e UNILA sobretudo aqueles que me ajudaram sem medir esforços em vários aspectos.

Agradeço aos técnicos dos laboratórios da UNILA, em especial a Paula (ajudou demais inúmeras vezes), Luciano, Alexandre, Eduardo, Dalila e outros que não lembro o nome pelo apoio e assistência e esforço que foram indispensáveis para meus trabalhos em laboratórios. Vocês foram essenciais para eu conseguir desenvolver os experimentos.

Um agradecimento ao professor Paulo da UTFPR por permitir o uso das instalações para meus experimentos, proporcionar treinamento necessário e por aceitar participar da minha banca.

Ao professor Rodrigo, sou grato pelo tempo dedicado a esclarecer dúvidas sobre briquetes e por sua participação valiosa na banca.

Agradeço a professora Ana Beatriz da UFES, que foi minha professora no mestrado e agora está presente na banca e agradeço por suas contribuições.

Expresso minha gratidão à indústria LAR pela cessão de matéria-prima essencial para minhas pesquisas e por fornecer informações cruciais.

Agradeço às empresas Madeiras Brasil e Madfoz Madeireira pela doação de serragem e informações relevantes.

Meu agradecimento a Jovana e seu esposo pela doação de óleo de frango assado, contribuindo significativamente para minha pesquisa.

Agradeço ainda o apoio da CAPES pela bolsa concedida de doutorado.

A todos os amigos e colegas da UNILA, da UFES e da graduação, que, de alguma forma, contribuíram para o sucesso do meu trabalho, minha profunda gratidão. Opto por não nomear individualmente para não omitir ninguém.

Um agradecimento especial ao meu pai José Carlos, cujo incentivo, paciência, tolerância e palavras de sabedoria foram um suporte inestimável. À minha mãe Lucimar, agradeço pelo constante incentivo, pelas motivações e pelo suporte prático, incluindo as recomendações de suplementos para manter minha saúde durante este período. Estendo também a meu irmão Vinícius e outros familiares que contribuíram de alguma forma.

À minha esposa, minha companheira nesta trajetória, sou grato por seu incentivo constante, apoio nas decisões e por estar ao meu lado durante as longas noites de trabalho e finais de semana dedicados à pesquisa.

A minha sogra, Sirlene, e seu marido Sandro, por todo apoio que me deram durante todo o período de doutorado.

Agradeço a todas outras pessoas que contribuíram durante essa jornada.

Por fim, agradeço a todos os membros e suplentes da banca pelas valiosas contribuições que enriqueceram significativamente esta tese.

Epígrafe
*"Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo
se transforma."*
Antoine Lavoisier

IMBERTI, Rodrigo Mazolini. **Potencialidades dos resíduos agroindustriais para geração de energia por meio de briquetes de serragem e óleo de frango.** 2024. 122 f.. Tese (Doutorado em Energia e Sustentabilidade) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu.

RESUMO

Diante da necessidade de explorar resíduos com potencial energético para a produção de briquetes, foca-se na utilização de serragem e pó de serra de *Pinus elliottii* (PE) e *Eucalyptus grandis* (EG), abundantes nas serrarias do oeste do Paraná. Essa abordagem também inclui a incorporação de óleo visceral de frango (OVF), provenientes de indústrias de processamento avícola, e óleo de frango assado (OFA), coletado em fornos rotativos de estabelecimentos alimentícios. O objetivo é avaliar a viabilidade destes materiais na produção de briquetes como um combustível sólido sustentável, visando contribuir para a economia circular sem pretender substituir integralmente os combustíveis fósseis. O OFA é frequentemente descartado inadequadamente, enquanto parte é utilizada para fabricação de sabão artesanal. O OVF é destinado à produção de ração animal, alguns alimentos e biodiesel e apenas uma pequena parte é desperdiçada. O processo de produção dos briquetes engloba a separação granulométrica das serragens e a decantação dos óleos de frango, utilizando o sobrenadante. Foram realizados 27 experimentos baseados no design composto central (CCD), com repetição de dois pontos centrais e aplicação da técnica da árvore de estados com regras heurísticas, visando identificar o fluxograma ótimo e os vizinhos estruturais. As misturas resultantes foram moldadas em briquetes de 40 g sob uma carga de 12.000 kgf (~60 MPa) por 3 min. Após a desmoldagem, os briquetes foram pesados, medidos e armazenados adequadamente. Os resultados indicaram que o teor de óleo nos briquetes deve ser inferior a 15% para evitar perda por exsudação durante a prensagem. Quanto às serragens, foram feitas a classificação granulométrica e análise imediata. As matérias-primas e os briquetes foram submetidos à determinação da massa específica (ρ) e do poder calorífico superior (PCS). A análise termogravimétrica (TGA) permitiu determinar as faixas de degradação térmica e avaliar o resíduo de cinzas. Nos ensaios de resistência mecânica, não foram observadas diferenças significativas entre os briquetes. Determinou-se a densidade energética (DE), foi feita a análise da vida útil e custos dos briquetes, no qual constatou-se que é economicamente viável evitar o uso do OVF. Os óleos de frango mostraram potencial como ligantes nos briquetes e contribuíram para aumentar o PCS. O tipo de serragem e o tamanho das partículas tiveram impacto mínimo nos resultados. O experimento 9 foi identificado como ótimo, dentre os 27, correspondendo ao fluxograma da árvore de estados [0262] com 21,25% EG, 63,75% PE, 3,75% OVF e 11,25% OFA em massa. Vizinhos estruturais foram identificados com base nesta composição, totalizando 10, sendo 4 variando a composição entre as serragens, 5 variando as granulometrias possíveis e 1 variando o tipo de óleo para 100% de OFA. O desempenho na combustão dos briquetes mostrou-se adequado e apresenta-se como uma alternativa promissora e atendeu 5 objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) que são o 7, 9, 12, 13 e 15 das nações unidas.

Palavras-chave: Frango assado; Serraria; Árvore de Estados; Regras Heurísticas; Sustentabilidade; Combustão.

IMBERTI, Rodrigo Mazolini. **Potencialidades de los residuos agroindustriales para la generación de energía por medio de briquetas de aserrín y aceite de pollo.** 2024. 122 f.. Tesis (Doctorado en Energía y Sostenibilidad) – Universidad Federal de Integración Latinoamericana, Foz do Iguazú.

RESUMEN

Ante la necesidad de explorar residuos con potencial energético para la producción de briquetas, se enfoca en la utilización de aserrín y polvo de aserrín de *Pinus elliottii* (PE) y *Eucalyptus grandis* (EG), abundantes en los aserraderos del oeste de Paraná. Este enfoque también incluye la incorporación de aceite visceral de pollo (OVF), proveniente de industrias de procesamiento avícola, y aceite de pollo asado (OFA), recolectado en hornos rotativos de establecimientos alimenticios. El objetivo es evaluar la viabilidad de estos materiales en la producción de briquetas como un combustible sólido sostenible, buscando contribuir a la economía circular sin pretender sustituir completamente a los combustibles fósiles. El OFA a menudo se descarta de manera inadecuada, mientras que parte se utiliza para la fabricación de jabón artesanal. El OVF se destina a la producción de alimento para animales, algunos alimentos y biodiesel, y solo una pequeña parte se desperdicia. El proceso de producción de las briquetas abarca la separación granulométrica de los aserrines y la decantación de los aceites de pollo, utilizando el sobrenadante. Se realizaron 27 experimentos basados en el diseño compuesto central (CCD), con repetición de dos puntos centrales y aplicación de la técnica del árbol de estados con reglas heurísticas, con el fin de identificar el diagrama de flujo óptimo y los vecinos estructurales. Las mezclas resultantes se moldearon en briquetas de 40 g bajo una carga de 12.000 kgf (~60 MPa) durante 3 min. Después del desmoldeo, las briquetas se pesaron, midieron y almacenaron adecuadamente. Los resultados indicaron que el contenido de aceite en las briquetas debe ser inferior al 15% para evitar la pérdida por exudación durante la prensa. En cuanto a los aserrines, se realizó la clasificación granulométrica y análisis inmediato. Las materias primas y las briquetas se sometieron a la determinación de la masa específica (ρ) y del poder calorífico superior (PCS). El análisis termogravimétrico (TGA) permitió determinar los rangos de degradación térmica y evaluar el residuo de cenizas. En los ensayos de resistencia mecánica, no se observaron diferencias significativas entre las briquetas. Se determinó la densidad energética (DE), se realizó el análisis de la vida útil y costos de las briquetas, en el cual se constató que es económicamente viable evitar el uso del OVF. Los aceites de pollo mostraron potencial como aglutinantes en las briquetas y contribuyeron a aumentar el PCS. El tipo de aserrín y el tamaño de las partículas tuvieron un impacto mínimo en los resultados. El experimento 9 fue identificado como óptimo, entre los 27, correspondiendo al diagrama de flujo del árbol de estados [0262] con 21,25% EG, 63,75% PE, 3,75% OVF y 11,25% OFA en masa. Se identificaron vecinos estructurales basados en esta composición, totalizando 10, siendo 4 variando la composición entre los aserrines, 5 variando las granulometrías posibles y 1 variando el tipo de aceite al 100% de OFA. El desempeño en la combustión de las briquetas resultó adecuado y se presenta como una alternativa prometedora, cumpliendo con 5 objetivos de desarrollo sostenible (ODS) que son el 7, 9, 12, 13 y 15 de las Naciones Unidas.

Palabras clave: Pollo asado; Aserradero; Árbol de estado; Reglas heurísticas; Sustentabilidad; Combustión.

IMBERTI, Rodrigo Mazolini. **Potential of Agro-Industrial Waste for Energy Generation through Sawdust and Chicken Oil Briquettes.** 2024. 122 f.. Thesis (Ph.D. in Energy and Sustainability) - Federal University of Latin American Integration, Foz do Iguaçu.

ABSTRACT

Given the need to explore waste with energy potential to produce briquettes, the focus is on the use of sawdust and saw powder from *Pinus elliottii* (PE) and *Eucalyptus grandis* (EG), abundant in the sawmills of western Paraná. This approach also includes the incorporation of chicken visceral oil (OVF), coming from poultry processing industries, and roasted chicken oil (OFA), collected in rotary ovens of food establishments. The aim is to assess the viability of these materials in the production of briquettes as a sustainable solid fuel, aiming to contribute to the circular economy without intending to fully replace fossil fuels. OFA is often improperly discarded, while part is used to produce handmade soap. OVF is destined for animal feed production, some foods and biodiesel, and only a small part is wasted. The briquette production process encompasses the granulometric separation of the sawdust and the decantation of the chicken oils, using the supernatant. A total of 27 experiments were conducted based on the central composite design (CCD), with repetition of two central points and application of the state tree technique with heuristic rules, aiming to identify the optimal flowchart and structural neighbors. The resulting mixtures were molded into 40 g briquettes under a load of 12,000 kgf (~60 MPa) for 3 min. After demolding, the briquettes were weighed, measured, and safely stored. The results indicated that the oil content in the briquettes should be less than 15% to avoid loss by exudation during pressing. As for the sawdust, granulometric classification and immediate analysis were conducted. The raw materials and briquettes underwent determination of specific mass (ρ) and higher heating value (PCS). Thermogravimetric analysis (TGA) allowed for determining the ranges of thermal degradation and evaluating the ash residue. In the mechanical strength tests, no significant differences were observed between the briquettes. The energy density (DE) was determined, and the analysis of the briquettes' lifespan and costs was conducted, in which it was found that it is economically viable to avoid the use of OVF. The chicken oils showed potential as binders in the briquettes and contributed to increasing the PCS. The type of sawdust and particle size had a minimal impact on the results. Experiment 9 was identified as optimal, among the 27, corresponding to the state tree flowchart [0262] with 21.25% EG, 63.75% PE, 3.75% OVF, and 11.25% OFA by mass. Structural neighbors were identified based on this composition, totaling 10, with 4 varying the composition between the sawdusts, 5 varying the possible granulometries, and 1 varying the type of oil to 100% OFA. The combustion performance of the briquettes proved to be adequate and presents itself as a promising alternative, meeting 5 United Nations Sustainable Development Goals (SDGs) which are 7, 9, 12, 13, and 15.

Keywords: Roasted chicken; Sawmill; State Tree; Heuristic Rules; Sustainability; Combustion.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES (FIGURAS)

FIGURA 3.1 - PRODUÇÃO DE CARNE BOVINA E VITELA E DE FRANGO POR PAÍS.	32
FIGURA 3.2 - CONSUMO PER CAPITA DE CARNE DE FRANGO NO BRASIL (KG/HAB).	33
FIGURA 3.3 - ABATE DE FRANGO POR UNIDADE FEDERATIVA EM 2020.	34
FIGURA 3.4 - LENHA PRODUZIDA NO BRASIL ATÉ 2022.	36
FIGURA 3.5 - ÁREA PLANTADA SILVICULTURA (HA) – 2022.	37
FIGURA 3.6 - ÁRVORE DE ESTADOS PADRÃO.	43
FIGURA 4.1 - PROCESSOS DE PRODUÇÃO E ANÁLISES DAS MATÉRIAS-PRIMAS E DO BRIQUETE... ..	48
FIGURA 4.2 - SUBSISTEMAS ENVOLVIDOS.	49
FIGURA 4.3 - SERRAGENS DE (A) <i>EUCALYPTUS GRANDIS</i> (EG) E (B) <i>PINUS ELLIOTTI</i> (PE)	54
FIGURA 4.4 - ÓLEOS DISPOSTOS EM PLACA DE PETRI (A) OFA E (B) OVF.	54
FIGURA 4.5 - CONJUNTO DE (A) PENEIRAS GRANULOMÉTRICAS E (B) AGITADOR DE PENEIRAS..	56
FIGURA 4.6 - BOMBA CALORIMÉTRICA: (A) MODELO IKA C2000; (B) REFRIGERADOR IKA KV 600; (C) CALORÍMETRO C 5010 FRASCO DE DECOMPOSIÇÃO PADRÃO.	59
FIGURA 4.7 - AMOSTRAS PARA TGA ARMAZENADAS EM MICROTUBOS EPPENDORF. (A) 27 AMOSTRAS DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL; (B) 4 MATÉRIAS-PRIMAS PURAS. 61	61
FIGURA 4.8 - DESENHO TÉCNICO DA BRIQUETADEIRA EM VISTAS ORTOGRÁFICAS E PERSPECTIVA ISOMÉTRICA.	64
FIGURA 4.9 - CONJUNTO: (A) PRENSA HIDRÁULICA; (B) PEÇAS DA BRIQUETADEIRA; (C) PROJEÇÃO EM 3D DAS PEÇAS.	64
FIGURA 4.10 - AMOSTRAS HOMOGENEIZADAS DE 8,0 G.	67
FIGURA 4.11 - CARGA APLICADA NO SENTIDO DO DIÂMETRO DO CORPO DE PROVA.	69
FIGURA 4.12 - MÁQUINA SM100 UNIVERSAL MATERIAL TESTING MACHINE CAP. 100 kN (10 T) DA TQ.	70
FIGURA 4.13 - 17 OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DAS NAÇÕES UNIDAS. ...	72
FIGURA 5.1 - ÁRVORE DE ESTADOS.	75
FIGURA 5.2 - OS 27 FLUXOGRAMAS PARA EXPERIMENTOS.	76

FIGURA 5.3 - REGRAS DO SUBSISTEMA DE ESCOLHA DA SERRAGEM.....	77
FIGURA 5.4 - REGRAS DO SUBSISTEMA DE ESCOLHA DA GRANULOMETRIA DA SERRAGEM.	78
FIGURA 5.5 - REGRAS DO SUBSISTEMA DE ESCOLHA DO ÓLEO DE FRANGO.....	78
FIGURA 5.6 - REGRAS DO SUBSISTEMA DE FRAÇÃO MÁSSICA.....	79
FIGURA 5.7 - ACUMULADO DA GRANULOMETRIA DA SERRAGEM DE EG E PE.	80
FIGURA 5.8 - ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DAS MATÉRIAS-PRIMAS: A) 29 - PE; B) 30 - EG; C) 31 - OVf; D) 32 - OFA, TAXA DE AQUECIMENTO DE 5 °C.MIN⁻¹ E ATMOSFERA DE OXIGÊNIO.....	82
FIGURA 5.9 - VISTA FRONTAL E LATERAL DOS BRIQUETES (40 G) PRODUZIDOS A PARTIR DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL: 27 EXPERIMENTOS + 1 DE PE PURO + 1 DE EG PURO.	85
FIGURA 5.10 - ANÁLISE IMEDIATA ESTIMADA PARA OS 27 EXPERIMENTOS.	86
FIGURA 5.11 – MASSA ESPECÍFICA DO BRIQUETE OBTIDA COM (A) PAQUÍMETRO E (B) BALANÇA ANALÍTICA.	87
FIGURA 5.12 - VOLUME E MASSA ESPECÍFICA VERSUS EXPERIMENTO.	88
FIGURA 5.13 - CORRELAÇÃO DO PCS E TEOR DE ÓLEOS DE FRANGO.	90
FIGURA 5.14 - ENERGIA (MJ) DO PCS E DE CORRELACIONADO AOS 27 EXPERIMENTOS.	91
FIGURA 5.15 - DIAGRAMA DE PARETO PARA O PCS	93
FIGURA 5.16 - COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO AJUSTADO (R² AJUST.) VERSUS PCS: A) X₁ COM R² = -0,020, B) X₂ COM R² = -0,009, C) X₃ COM R² = -0,010 E D) X₄ COM R² = 0,796.94	
FIGURA 5.17 – ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DOS 27 EXPERIMENTOS REALIZADOS.....	96
FIGURA 5.18 – DERIVADA DAS CURVAS TERMOGRAVIMÉTRICAS DOS 27 EXPERIMENTOS REALIZADOS	96
FIGURA 5.19 - CURVAS TERMOGRAVIMÉTRICAS A) G1 - TG, B) G2 - TG, C) G1 - DTG E D) G2 - DTG	97
FIGURA 5.20 - COMPORTAMENTO TÉRMICO DOS BRIQUETES EM DIFERENTES FAIXAS DE TEMPERATURAS.....	98
FIGURA 5.21 – TEOR DE MASSA DEGRADADA EM CADA FAIXA DO TG	99

FIGURA 5.22 - CARGA DE RUPTURA DO BRIQUETE X CARACTERÍSTICAS DE CADA BRIQUETE...	101
FIGURA 5.23 – CUSTO (USD) DO BRIQUETE E DO MATERIAL BRUTO EM FUNÇÃO DO NÚMERO DO EXPERIMENTO.....	102
FIGURA A.1 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DE X1-PROPORÇÃO DAS SERRAGENS ENTRE A FRAÇÃO MÁSSICA DE SERRAGEM NA MISTURA, X2-GRANULOMETRIA EM MESH DAS SERRAGENS VERSUS PCS.....	116
FIGURA A.2 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DE X1-PROPORÇÃO DAS SERRAGENS ENTRE A FRAÇÃO MÁSSICA DE SERRAGEM NA MISTURA, X3-PROPORÇÃO DOS ÓLEOS DE FRANGO NA FRAÇÃO MÁSSICA DOS ÓLEOS NA MISTURA VERSUS PCS.....	116
FIGURA A.3 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DE X1-PROPORÇÃO DAS SERRAGENS ENTRE A FRAÇÃO MÁSSICA DE SERRAGEM NA MISTURA, X4-FRAÇÃO MÁSSICA DE ÓLEO MISTURA VERSUS PCS.	117
FIGURA A.4 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DE X2-GRANULOMETRIA EM MESH DAS SERRAGENS, X3-PROPORÇÃO DOS ÓLEOS DE FRANGO NA FRAÇÃO MÁSSICA DOS ÓLEOS NA MISTURA VERSUS PCS.	117
FIGURA A.5 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DE X2-GRANULOMETRIA EM MESH DAS SERRAGENS, X4-FRAÇÃO MÁSSICA DE ÓLEO MISTURA VERSUS PCS.	118
FIGURA A.6 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DE X3-PROPORÇÃO DOS ÓLEOS DE FRANGO NA FRAÇÃO MÁSSICA DOS ÓLEOS NA MISTURA, X4-FRAÇÃO MÁSSICA DE ÓLEO MISTURA VERSUS PCS.	118
FIGURA B.1 - ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DOS EXPERIMENTOS: A) 1; B) 2; C) 3; D) 4; E) 5; F) 6.	119
FIGURA B.2 - ANÁLISES TERMOGRAVIMÉTRICAS DOS EXPERIMENTOS: A) 7; B) 8; C) 9; D) 10; E) 11; F) 12; G) 13; H) 14.....	120
FIGURA B.3 - ANÁLISES TERMOGRAVIMÉTRICAS DOS EXPERIMENTOS: A) 15; B) 16; C) 17; D) 18; E) 19; F) 20; G) 21; H) 22.....	121
FIGURA B.4 - ANÁLISES TERMOGRAVIMÉTRICAS DOS EXPERIMENTOS: A) 23; B) 24; C) 25; D) 26; E) 27; F) 28.....	122

LISTA DE QUADRO

QUADRO 3.1 - APLICAÇÕES DE BRIQUETAGEM COM DIFERENTES RESÍDUOS.	28
QUADRO 3.2 - TIPOS DE DEJETOS E SUBPRODUTOS PRODUZIDOS NAS DIFERENTES ETAPAS DO PROCESSAMENTO AVÍCOLA.....	35
QUADRO 4.1 – DECODIFICAÇÃO DOS TRATAMENTOS A PARTIR DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DEFINIDO.	63
QUADRO 5.1 - ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS GRÁFICOS DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DAS QUATRO VARIÁVEIS INDEPENDENTES COM OS 3 NÍVEIS DE MAIOR INTENSIDADE.	95
QUADRO 5.2 – TEOR DE CINZAS EM ORDEM CRESCENTE NO FINAL DO PROCESSO DE TERMOGRAVIMETRIA (TG)	100
QUADRO 5.3 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DO TIPO BÁSICA AVALIANDO O VALOR P ABAIXO DA DIAGONAL COM VALOR 1 E R ACIMA DA DIAGONAL EVIDENCIANDO NA COR VERMELHA OS DADOS SIGNIFICATIVOS PARA $P < 0,05$	106

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 - PCS E ANÁLISE IMEDIATA EM BASE SECA DE ALGUMAS REFERÊNCIAS.....	38
TABELA 4.1 - VARIÁVEIS E NÍVEIS UTILIZADOS NO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.	50
TABELA 4.2 - SEQUÊNCIA EXPERIMENTAL PLANEJAMENTO FATORIAL.	51
TABELA 4.3 - SEQUÊNCIA EXPERIMENTAL PONTOS CENTRAIS E AXIAIS.	51
TABELA 4.4 - ABERTURA DAS PENEIRAS UTILIZADAS	56
TABELA 4.5 – DISTRIBUIÇÃO DOS 27 EXPERIMENTOS A 40,0 G.....	66
TABELA 5.1 - DADOS DA ANÁLISE IMEDIATA DOS RESÍDUOS.	80
TABELA 5.2 - PCS DAS MATÉRIAS-PRIMAS PARA BASE DOS BRIQUETES.....	82
TABELA 5.3 - DISPOSIÇÃO DA FRAÇÃO MÁSSICA COM O PCS OBTIDOS EM BOMBA CALORIMÉTRICA.	
89	
TABELA 5.4 - EFEITOS ESTIMADOS DO PCS.....	92
TABELA 5.5 - CÁLCULO DOS CUSTOS DOS BRIQUETES POR MATÉRIAS-PRIMAS.	101
TABELA 5.6 - VIZINHOS ESTRUTURAIS POR SUBSISTEMA.....	105

LISTA DE SIGLAS

Símbolos em notação de análise dimensional (L M T Θ)

<i>As</i>	Área superficial	[L ²]
<i>A</i>	tempo em porcentagem	[--]
<i>B</i>	temperatura em percentual máxima atingida	[--]
<i>C</i>	massa consumida em porcentagem	[--]
DE	Densidade energética	[M.L ⁻¹ .T ⁻²]
<i>d</i>	Diâmetro	[L]
<i>F</i>	Força da carga aplicada	[M.L.T ⁻²]
<i>h</i>	Altura	[L]
<i>H</i>	Teor de hidrogênio do combustível	[--]
HHV	Higher heating value	[L ² .T ⁻²]
<i>k</i>	Número de variável no processo (fator)	[--]
<i>m</i>	Massa	[M]
<i>n_{exp}</i>	Número de experimentos	[--]
<i>PC</i>	Poder calorífico	[L ² .T ⁻²]
<i>PCE</i>	Ponto central adicional	[--]
<i>PCI</i>	Poder calorífico inferior	[L ² .T ⁻²]
<i>PCS</i>	Poder calorífico superior	[L ² .T ⁻²]
<i>P</i>	Pressão	[M.L ⁻¹ .T ⁻²]
<i>r</i>	Raio	[L]
<i>t</i>	Tempo	[T]
<i>T</i>	Temperatura	[Θ]
<i>T_V</i>	Teor de voláteis	[--]
<i>T_{CZ}</i>	Teor de cinzas	[--]
<i>T_{CF}</i>	Teor de carbono fixo	[--]
<i>V</i>	Volume	[L ³]
XBU	Teor de umidade	[--]
<i>X₁</i>	Proporção das serragens na mistura	[--]
<i>X₂</i>	Granulometria em Mesh das serragens	[--]
<i>X₃</i>	Proporção dos óleos de frango na mistura	[--]
<i>X₄</i>	Fração mássica de óleo na mistura	[--]

Símbolos gregos

ρ	Massa específica	[M.L ³]
μ	Teor de umidade do combustível.	[--]

Subscritos

<i>ai</i>	Amostra inicial
<i>as</i>	Amostra seca
<i>Briq</i>	Briquete
<i>CF + CZ</i>	Carbono fixo somado com as cinzas
<i>CZ</i>	Cinzas
<i>EG</i>	<i>Eucalyptus grandis</i>
<i>OVF</i>	Óleo Visceral de Frango
<i>OFA</i>	Óleo de Frango Assado
<i>PE</i>	<i>Pinus elliottii</i>
<i>V</i>	Voláteis

LISTA DE ABREVIACOES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANN	Redes Neurais Artificiais ou <i>Artificial Neural Network</i>
ASTM	American Society for Testing and Materials
CCD	Planejamento Composto Central ou <i>Central Composite Design</i>
DTG	Termogravimetria derivada ou <i>derivative thermogravimetry</i>
EG	<i>Eucalyptus grandis</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
OVF	leo Visceral de Frango
OFA	leo de Frango Assado
PCE	Ponto Central Extra
PE	<i>Pinus elliottii</i>
PTI	Parque Tecnológico Itaipu
RM	Resistência Mecânica
sp	Subproduto
TGA	Análise Termogravimétrica ou <i>Thermogravimetric analysis</i>
UNILA	Universidade Federal da Integração Latino-Americana

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	22
CAPÍTULO 2 OBJETIVOS	25
2.1 OBJETIVO GERAL	25
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	25
CAPÍTULO 3 REFERENCIAL TEÓRICO	27
3.1 PRODUÇÃO DE BRIQUETE	27
3.2 TIPOS DE BRIQUETES	31
3.3 PRODUÇÃO DE FRANGO	32
3.4 PRODUÇÃO DE SERRAGEM	35
3.5 CARACTERIZAÇÃO DAS BIOMASSAS	38
3.5.1 Análise Imediata da Biomassa	38
3.5.2 Poder Calorífico.....	39
3.5.3 Análise Termogravimétrica TGA.....	41
3.5.4 Resistência Mecânica.....	42
3.6 ENGENHARIA DE PROCESSOS	42
3.6.1 Árvore de Estado Padrão	43
3.6.2 Análise das Rotas.....	44
3.6.3 Método Heurístico e Evolutivo.....	44
3.7 APANHADO GERAL	45
CAPÍTULO 4 METODOLOGIA	46
4.1 MATÉRIA-PRIMA	46
4.2 LOCAL DE ESTUDO	47
4.3 RESUMO DO PROCESSO	47
4.4 ÁRVORE DE ESTADOS E SUBSISTEMAS ENVOLVIDOS	48
4.4.1 Planejamento Experimental	49
4.4.2 Raiz: Finalidade do Processo.....	51
4.4.3 Subsistema de Escolha da Serragem	51
4.4.4 Subsistema da Granulometria da Serragem.....	52

4.4.5 Subsistema da Escolha do Óleo de Frango (Aglutinante)	52
4.4.6 Subsistema da Fração Mássica	53
4.5 CLASSIFICAÇÃO E TRATAMENTO DA MATÉRIA-PRIMA	53
4.6 CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA	55
4.6.1 Análise Granulométrica	55
4.6.2 Análise Imediata da Biomassa	57
4.6.3 Determinação da Massa Específica	58
4.6.4 Poder Calorífico Superior (PCS)	58
4.6.5 Análise Termogravimétrica (TGA)	60
4.7 PREPARO DAS MISTURAS	62
4.7.1 Preparo dos Briquetes	62
4.7.2 Preparo de Amostras não Compactadas	66
4.8 CARACTERIZAÇÃO DOS BRIQUETES E MISTURAS	67
4.8.1 Análise Imediata dos Briquetes.	67
4.8.2 Determinação da Massa Específica dos Briquetes	68
4.8.3 Análise de Custos dos Briquetes	68
4.8.4 Resistência Mecânica	69
4.8.5 Vida Útil	70
4.9 ANÁLISE DOS DADOS	71
4.10 OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (ODS)	72
CAPÍTULO 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	74
5.1 ÁRVORE DE ESTADOS	74
5.2 REGRAS HEURÍSTICAS E FLUXOGRAMA BASE	76
5.2.1 Subsistema de Escolha da Serragem	77
5.2.2 Subsistema da Granulometria da Serragem	77
5.2.3 Subsistema da Escolha do Óleo de Frango (Aglutinante)	78
5.2.4 Subsistema da Fração Mássica	79
5.3 RESULTADO DA CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA	79
5.3.1 Análise Granulométrica das Serragens e Pó de Serra	80
5.3.2 Análise Imediata das Matérias-Primas	80
5.3.3 Massa Específica das Matérias-Primas	81

5.3.4 Poder Calorífico Superior (PCS) das Matérias-Primas	81
5.3.5 Análise Termogravimétrica (TGA) das Matérias-Primas	82
5.3.5.1 <i>Eventos térmicos</i>	83
5.3.5.2 <i>Massa residual no TG</i>	84
5.4 RESULTADO DA CARACTERIZAÇÃO DOS BRIQUETES	84
5.4.1 Análise Imediata Estimada dos Briquetes	85
5.4.2 Massa Específica dos Briquetes	87
5.4.3 Poder Calorífico Superior dos Briquetes	88
5.4.4 Estatística do Poder Calorífico Superior (PCS).....	92
5.4.5 Análise Termogravimétrica (TGA).....	95
5.4.6 Resistência Mecânica.....	100
5.4.7 Análise do Custo por Tonelada de Briquete.....	101
5.4.8 Vida Útil do Briquete.....	103
5.4.9 Fluxograma Base Escolhido	104
5.4.10 Vizinhos Estruturais Definidos	105
5.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA	106
5.6 OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (ODS).....	107
5.7 CONCLUSÕES PONTUAIS	107
CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES	109
CAPÍTULO 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	111
REFERÊNCIAS	112
APÊNDICE A SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DO PCS	116
APÊNDICE B GRÁFICOS TG E DTG DOS BRIQUETES	119

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

O crescimento contínuo dos setores agrícola, industrial e comercial, aumentou substancialmente a busca por fontes energéticas, especialmente para suprir as necessidades em fornos, caldeiras e processos similares. A elevação dos preços dos combustíveis tradicionais, como carvão e petróleo, impulsionou a investigação de alternativas em resposta à demanda crescente. Paralelamente, a substituição parcial dos combustíveis fósseis por renováveis é crucial para mitigar a poluição atmosférica associada a esses combustíveis (TUMULURU et al., 2011).

No contexto brasileiro, a produção agrícola, incluindo cultivos de leguminosas, fruticultura e silvicultura, desempenham papel fundamental na economia, no entanto, grandes quantidades de resíduos são geradas. O Brasil foi o quarto maior gerador global de resíduos agrícolas em 2024, ficando atrás apenas da China, EUA e Índia (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATION, 2024). Diante dessa realidade, é crucial explorar alternativas para agregar valor a esses resíduos de biomassas. Nesse cenário, surge a oportunidade de transformar resíduos subutilizados agregando valor transformando-os em massa densificadas, notadamente por meio da produção de briquetes. Esse processo mecânico resulta em um aumento significativo da densidade da biomassa, cerca de dez vezes e mostra-se promissor (TUMULURU et al., 2011).

Segundo (DAL-BÓ et al., 2019), a utilização de resíduos agrícolas como fonte de energia é destacada por sua capacidade de contribuir para a mitigação das emissões de CO₂. Essa vantagem reside no fato de que os compostos liberados durante a combustão são absorvidos por novos cultivos, estabelecendo um ciclo fechado do carbono e reduzindo, assim, o impacto ambiental. É nesse contexto que entra o uso de briquetes, como energéticos derivados a partir desses resíduos.

É fundamental notar que, embora os representem uma solução para a valorização de resíduos e possam contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa, eles também são uma fonte de CO₂ quando queimados. No entanto, comparativamente, a combustão de briquetes ainda resulta em uma menor emissão líquida de CO₂ em relação aos combustíveis fósseis, principalmente porque os resíduos utilizados na produção dos briquetes já capturaram carbono durante seu ciclo de vida como biomassa.

A biomassa, definida como material orgânico de origem animal ou vegetal capaz de gerar energia, oferece fonte renovável e limpa de energia, desde os produtos tradicionais como lenha e carvão vegetal, até subprodutos da agroindústria com potencial para substituir alguns derivados do petróleo em aplicações específicas.

Indústrias de abate de frango enfrentam desafios na gestão de resíduos orgânicos, sobretudo o óleo visceral de frango (OVF). No setor de comércio como supermercado, restaurante, lanchonete, padaria e similares em que há fornos de assar frango tem-se como resíduo o óleo de frango assado (OFA). Ambos os setores requerem atenção quanto à destinação correta destes resíduos, entre as soluções a investigação quanto ao potencial energético destes óleos.

A produção de briquetes soluciona o uso adequado destas biomassas subaproveitadas, gerando renda, empregos e produtos padronizados quanto à fração mássica e formato geométrico. Complementarmente, possui alta densidade e baixa umidade facilitando no transporte, tornando-os sustentáveis e desejáveis como combustível sólido (LOHRI et al., 2017).

Este estudo tem como propósito central investigar a viabilidade da produção de briquetes a partir de resíduos agroindustriais, como maravalha (serragem e aparas de madeira), bem como pó de serra de *Eucalyptus grandis* (EG) e *Pinus elliottii* (PE) provenientes das madeiras. A caracterização granulométrica das serragens foi realizada utilizando peneiras Tyler, abrangendo a faixa de #8 a #100 mesh, que corresponde a 2400 a 150 μm respectivamente. Além disso, também foi explorado o potencial energético do óleo visceral do frango (OVF), resíduo proveniente da indústria de abate de frango e óleo de frango assado (OFA), obtido em fornos de estabelecimentos alimentícios, como possíveis ligantes para os briquetes.

O objetivo foi determinar a combinação ótima entre esses resíduos, considerando a exclusão de algum componente ou a utilização conjunta, visando alcançar a máxima eficiência na produção de combustível sólido compactado. A análise das diferentes combinações foi direcionada para obter resultados otimizados em relação ao poder calorífico superior (PCS), resistência mecânica (RM), variação da massa específica ($\Delta\rho$ %), variação da densidade energética (ΔDE %), análise imediata, teor de cinzas obtido na termogravimetria (TG), análise termogravimétrica (TGA) e vida útil dos briquetes produzidos.

Para simplificação ao longo deste trabalho, a serragem de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii* será referida como serragem EG e PE respectivamente, abarcando tanto a maravalha quanto o pó de serra. Quanto ao óleo visceral de frango (OVF), também conhecido como gordura abdominal de frango, este é proveniente da etapa de evisceração da indústria de abate de frango, envolvendo a remoção das vísceras, sangue, gordura e pequenos pedaços de carne. Além de sua utilização na produção de ração animal tanto pela própria indústria de abate de frango quanto outras que adquirem o óleo. Também é utilizado para a produção de biodiesel, inclusive utilizando outros resíduos do frango como a casca do ovo de onde pode se obter o óxido de cálcio (CaO) (KIRUBAKARAN; ARUL MOZHI SELVAN, 2021). O OVF é ainda utilizado como fonte de

lipídeos em alguns alimentos de consumo humano na forma de embutidos, como exemplo algumas salsichas de frango (LIMA et al., 2020).

O óleo de frango assado (OFA) encontra aplicação na produção artesanal de sabão em barras. No entanto, não há relatos que abordem seu uso em outras aplicações. A lacuna de literatura referente à utilização desses óleos residuais na fabricação de briquetes motivou a pesquisa, com o intuito de explorar tanto o OVF quanto o OFA como alternativas de fonte de energia.

Diante deste contexto, o presente projeto se dedicou a selecionar as melhores matérias-primas ideais, dentre os resíduos de EG, PE, OVF e OFA, bem como composição mais adequada, a fim de produzir briquetes em escala laboratorial, para serem utilizados como biocombustível sólido. Além disso, em virtude da importância da madeira como matéria-prima primordial nos processos de densificação, também foi realizada uma avaliação da compactação de resíduos de EG e PE sem adição de óleos. Com o propósito de aprimorar atributos o poder calorífico superior (PCS) e resistência mecânica (RM), pretende-se investigar o uso dos resíduos de OVF e OFA como ligantes.

Por fim, este estudo se propôs a investigar o impacto das diferentes combinações de biomassas, incluindo a adição de resíduos do abate de frango e óleo de frango assado, no tocante à durabilidade mecânica e características térmicas dos briquetes. A análise foi conduzida por meio de um planejamento experimental, que contemplou vinte e sete (27) tratamentos distintos, visando identificar as configurações ótimas que culminassem nos melhores resultados. Considerando o atual estado da arte, é possível difundir as tecnologias aqui abordadas a agricultores e empresários para este combustível sólido alternativo.

Considerando a importância da produção de briquetes como alternativa energética sustentável, este estudo foca na investigação do impacto das combinações de biomassas. O Capítulo 2, Objetivos, detalha as metas deste trabalho, priorizando a identificação das configurações mais eficientes para a produção de briquetes, através de um planejamento experimental abrangente.

CAPÍTULO 2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo central foi produzir briquetes a partir de biomassas provenientes da silvicultura e de resíduos de óleo de frango, tanto de forma individual quanto combinada, e avaliar seu potencial energético. Para atingir este objetivo, foram realizadas a concepção do processo, a análise, a otimização e a caracterização energética dos produtos densificados.

O processo de densificação visou agregar valor aos resíduos mencionados, que são frequentemente subutilizados. O estudo visou contribuir para a mitigação dos problemas ambientais decorrentes do descarte inadequado e ausência de tratamento desses resíduos. O objetivo foi promover a utilização mais eficiente das capacidades energéticas, em consonância aos princípios de sustentabilidade e responsabilidade ambiental. Além disso, esta pesquisa se alinha aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para concretizar os objetivos delineados, foram realizadas as seguintes etapas:

Fase 1:

- Elaboração da árvore de estados, contemplando diversas estruturas plausíveis de processo e a otimização estrutural por meio da aplicação de regras heurísticas;
- Desenvolvimento de um planejamento experimental do tipo planejamento composto central (CCD) para desenvolvimento dos experimentos.

Fase 2:

- Caracterização física e termoquímica dos resíduos em seu estado natural (*in natura*) e dos briquetes resultantes;
- Investigação da influência das variáveis de processos, como composição da serragem, granulometria da serragem, composição dos óleos de frangos e fração mássica dos componentes, sobre atributos de qualidade dos briquetes. Isso inclui análise imediata, poder calorífico superior (PCS), massa específica, densidade energética, análise termogravimétrica, resistência mecânica e vida útil;

Fase 3:

- Realização de estudos de custo do processo de densificação dos resíduos e subsequente comparação dos custos;
- Execução de análises estatísticas, incluindo a determinação das diferenças entre as amostras utilizando a tabela dos efeitos estimados, para comparar com a superfície de resposta.
- Avaliação da contribuição da pesquisa para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, com foco nos ODS 7, 9, 12, 13 e 15.

CAPÍTULO 3 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo aborda a necessidade do uso de fontes de energia alternativas, a produção das matérias-primas desde sua origem, a produção de briquetes, a caracterização da biomassa e a aplicação da engenharia de processos.

3.1 PRODUÇÃO DE BRIQUETE

O interesse crescente por fontes de energias alternativas, agravado pela crise energética de 2001 no Brasil, intensificou a preocupação global com questões ambientais, como desmatamento, efeito estufa e aquecimento global, impulsionando a busca por fontes energéticas mais sustentáveis. Uma abordagem promissora é o aproveitamento da biomassa oriunda de resíduos agrícolas para fins energéticos (DA SILVA et al., 2020; MENDOZA MARTINEZ et al., 2019).

A utilização dos resíduos da agroindústria não apenas resolve problemas de destinação inadequada, mas também aborda uma solução para a escassez de combustíveis tradicionais, como carvão vegetal, lenha, petróleo, gás natural, além de melhorar suas propriedades como o aumento do poder calorífico superior e da densidade, redução da umidade dos produtos resultantes e melhora na logística até o consumidor final. Em destaque há os briquetes que representam uma alternativa econômica e sustentável para atender às demandas energéticas (MENDOZA MARTINEZ et al., 2019).

Quando se trata de misturas de biomassa para produzir artefatos densificados, como briquetes e péletes, a escolha entre eles depende das necessidades específicas. Neste trabalho optou-se apenas pela produção de briquetes devido à facilidade e simplicidade do processo a partir dos equipamentos disponíveis como a prensa hidráulica, essencial para a briquetagem, enquanto a produção de péletes exigiria uma peletizadora, equipamento mais complexo e não disponível. Portanto, a escolha por briquetes foi motivada pela praticidade e pelos recursos existentes, embora as considerações aqui apresentadas possam também ser aplicadas à produção de péletes. No entanto, é essencial investigar como os parâmetros abordados do briquete podem afetar a eficiência do combustível sólido resultante.

De acordo com a literatura, a densidade destes artefatos densificados, como briquetes, está diretamente relacionada à sua eficiência energética de combustão. Os briquetes podem ser produzidos a partir de um único resíduo ou pela combinação de vários componentes, resultando em briquetes compostos. O Quadro 3.1 apresenta diferentes aplicações de briquetagem e

peletização com diferentes resíduos, mencionando o trabalho de alguns autores, destacando a importância desses processos na busca por soluções energéticas mais sustentáveis.

Quadro 3.1 - Aplicações de briquetagem com diferentes resíduos.

Referência	Material e Resíduo	Foco	Principais conclusões
(BARROS, 2012)	Cascas de maracujá, coco, laranja, mandioca e sabugo de milho.	Viabilidade e densidade energética de briquetes .	#40 mesh: coco, sabugo de milho e casca de maracujá (maior DE) briquetaram. #12 mesh: laranja briquetou.
(GIL et al., 2010)	Serragem de pinheiro, castanha, eucalipto, resíduo de celulose, casca de café, resíduo de uva e carvões.	Durabilidade e comportamento na combustão de péletes .	↑ Durabilidade: serragem de castanhas e pinho, celulose com serragem de pinho e castanha. ↓ Durabilidade: uva e café.
(KALIYAN; MOREY, 2010)	Briquetes e péletes de palha de milho e capim switchgrass.	Ligantes naturais e mecanismos de ligação do tipo ponte sólida.	Pontes sólidas feitas por ligantes naturais como lignina e proteína contribuíram para a durabilidade dos briquetes/péletes.
(MENDOZA MARTINEZ et al., 2019)	Briquetes de resíduos de madeira de pinheiro-café.	Combustível alternativo para sistemas de queima locais no Brasil.	cafeeiro: ↓ resistência mecânica. 75% pinheiro misturado ao cafeeiro, ↑ resistência.
(OBI, 2015)	Lodo moído do azeite de dendê (óleo de palma) e serragem.	Avaliação do efeito do lodo de moinho de óleo de palma nas propriedades de briquete de serragem.	Com o aumento da adição deste ligante, melhorou as propriedades físicas e de combustão dos briquetes.
(RAVICHAN DRAN; CORSCADDE N, 2014)	Briquetes de biomassa agrícola comum, após lixiviação e emissão gasosa.	Comparação das emissões gasosas e de partículas produzidas a partir de briquetes de biomassa agrícola lixiviados e não lixiviados.	Lixiviação melhorou propriedades do combustível, mas não reduziu proporcionalmente as emissões de gases e partículas.
(RÍOS-BADRÁN et al., 2020)	Péletes combustível a partir da casca de arroz e palha de trigo, puros e combinados.	Produção e caracterização de péletes combustível a partir da casca de arroz e palha de trigo.	Casca de arroz apenas: ↓ PCS e ↑ TCZ Misturada com trigo: ↑ PCS e ↓ TCZ.
(TSUCHIYA; YOSHIDA, 2017)	Péletes de carvão marrom (lignite) com farelo de arroz.	Características dos péletes para co-firing em usinas feitas com a mistura de carvão marrom com farelo de arroz.	Proporção adequada: 50% de cada resíduo.
(VIJAY; KRISHNAIA H, 2016)	Calêndula (gillyflower), flor rosa, cascas de limão, cascas de laranja e folhas diversas + aditivo sintético.	Avaliação de análises térmicas e mecânicas para briquetes .	briquetes com T _{CZ} muito menor (20-40% em comparação com a madeira ou carvão).
(ZANELLA, 2018)	Bagaço da laranja (Citrus sinensis) e aglutinantes: amido de milho, fécula de mandioca comercial, pectina com alto e baixo teor de metoxilação.	Produção de briquetes de carvão vegetal por meio do beneficiamento do bagaço da laranja (Citrus sinensis) testando 4 aglutinantes diferentes.	Uso de 10% do aglutinante fécula de mandioca ou amido de milho.
(ZENG et al., 2018)	pinus com Biomassa não lenhosa (capim-elefante e palha de trigo).	Péletes para equipamentos de combustão de pequena escala.	Melhor composição: 70% madeira e 30% não lenhosa.

Ríos-Badrán et al. (2020) analisaram a produção e caracterização de péletes a partir da casca de arroz e palha de trigo e foi revelado que os péletes feitos puramente com casca de arroz apresentaram menor poder calorífico (entre 3090,64 e 4049,05 kcal/g) e maior teor de cinzas (entre 12,81 e 17,51%) em comparação com aqueles que continham palha de trigo, que obtiveram maior poder calorífico (entre 4301,10 e 4573,50 kcal/g) e teor de cinzas reduzidos (entre 11,43 e 13,06%). Isto ressalta a importância da aplicação de mistura de biomassas para melhorar as propriedades dos artefatos densificados.

O teor elevado de cinzas não é desejado em combustíveis, pois está inversamente relacionado com a quantidade de energia disponível para a combustão, como o poder calorífico superior (PCS). A presença de cinzas pode prejudicar a eficiência da combustão e o desempenho dos equipamentos, causando desgaste e acúmulo de resíduos (RODRIGUES; GOMES; CAVALCANTE, 2017).

Outros exemplos de materiais compostos são encontrados no estudo de Gil et al. (2010) em que se preparou péletes a partir de diversas biomassas, incluindo serragem de pinho, castanha, eucalipto, casca de café e resíduos de celulose e de uva. Os autores também utilizaram dois tipos de carvão, betuminoso e semiantracítico, no processo. Os péletes foram preparados com diferentes composições, variando desde misturas de duas biomassas até combinações de uma biomassa com um tipo de carvão, bem como misturas de três componentes diferentes. Após extensos testes, observou-se que os péletes de serragem de castanha e de pinho exibiram a maior durabilidade mecânica, seguidos das misturas de serragem de castanha com serragem de pinho e de resíduo de celulose com serragem de pinho e castanha. Por outro lado, os péletes de resíduos de uva e casca de café mostraram-se menos duráveis (GIL et al., 2010).

Barros (2012), ao explorar a viabilidade da produção de briquetes a partir de resíduos de casca de maracujá, coco, laranja, mandioca e sabugo de milho, identificou que apenas os resíduos de coco, sabugo de milho e casca de maracujá foram considerados briquetáveis (que pode formar briquetes sem se deteriorar) para granulometrias inferiores a 40 mesh (que passaram por esta peneira). Para granulometrias passantes na peneira de 12 mesh, apenas a casca de laranja foi considerada como sendo não briquetável, um fenômeno atribuído ao seu baixo teor de lignina presente na laranja, aproximadamente 1%. A lignina é essencial na briquetagem, atuando como aglutinante natural. Portanto, uma alternativa viável para a densificação dos resíduos de laranja é a mistura de outros resíduos agrícolas em diferentes proporções ou a adição de aglutinantes naturais. Além disso, os resíduos de laranja demonstram uma vantagem de possuir um baixo teor de cinzas em comparação com o bagaço da cana-de-açúcar, o que é benéfico para o processo de combustão. Os experimentos foram realizados a uma temperatura de 130°C, sob pressões efetivas de 82,38 MPa

pelo cilindro inferior e pouco acima de 48,25 MPa pelo cilindro superior, com os briquetes sendo pressionados por 5 minutos e resfriados por 10 minutos após a compressão.

A manutenção de baixos teores de compostos inorgânicos é uma característica crucial e altamente desejável em materiais para combustão, uma vez que elevadas quantidades de cinzas podem reduzir o poder calorífico do material, diminuindo a eficiência energética (VALDES et al., 2017). Isto ressalta a necessidade de adicionar um aglutinante a esses resíduos, para promover a ligação e, conseqüentemente, aumentar a durabilidade tanto dos péletes quanto de briquetes.

Em outro estudo conduzido por Obi (2015), foram investigadas misturas com serragem, utilizando o lodo de moinho de óleo de palma como aglutinante. Diferentes composições foram testadas, variando a fração mássica do lodo de moinho de óleo de palma no material em 10% até atingir 100%. A adição do lodo do moinho de óleo de palma apresentou um efeito significativo ($p < 0,05$), conforme revelado por análise estatística com teste Tukey a um nível de confiança de 95%, tanto nas propriedades físicas quanto na combustão dos briquetes em comparação com os feitos apenas com serragem. Os principais resultados mostraram que a densidade dos briquetes, tanto comprimida quanto relaxada, bem como a durabilidade e a resistência à água, aumentaram à medida que a quantidade de lodo no aglutinante aumentava de 10% para 100%. A análise de combustão indicou que o poder calorífico superior (PCS) dos briquetes aumentou com o incremento do teor de lodo. No entanto, o carbono fixo diminuiu, enquanto o conteúdo de matéria volátil e de cinzas aumentou. Foi observado que a adição de lodo até 100% melhorou significativamente a estabilidade e as propriedades de combustão dos briquetes. Concluiu-se que a quantidade ideal de lodo de moinho de óleo de palma como aglutinante é de 100%, uma vez que essa composição maximizou a densidade e o poder calorífico dos briquetes.

Tendo em vista essas considerações, torna-se de grande interesse aprofundar os estudos na densificação dos resíduos de serragem de EG e PE, utilizando como aglutinante o OVF bem como o OFA. Essa abordagem representa uma oportunidade valiosa de aproveitar os resíduos e transformá-los em uma fonte de energia sustentável, ao mesmo tempo em que se evitam impactos ambientais e riscos à saúde humana associados ao descarte inadequado desses materiais.

Constata-se na literatura que há escassez de estudos comparativos envolvendo diferentes tipos de biomassas no processo de densificação. Apesar da possibilidade de aprimorar as características dos materiais por meio da combinação de biomassas residuais, é notável que a maioria dessas pesquisas se concentra predominantemente na utilização da madeira em diversas formas para a fabricação de briquetes e péletes. A diversidade das matérias-primas empregadas na fabricação de briquetes, juntamente com as distintas abordagens utilizadas nos processos de

densificação de biomassa, torna desafiante a generalização com base nos resultados disponíveis na literatura. Portanto, cada situação específica exige um estudo individualizado (GIL et al., 2010).

Isso cria uma base sólida para a compreensão dos processos de briquetagem e destaca a importância da escolha adequada dos materiais e aglutinantes para otimizar a qualidade e eficiência desses combustíveis densificados.

3.2 TIPOS DE BRIQUETES

Os briquetes são aglomerados densificados de biomassa energética, geralmente fabricados a partir de biomassa residual de processos industriais ou agrícolas. A produção envolve a aplicação de pressão e, em alguns casos, temperaturas elevadas, visando concentrar a energia da biomassa e aumentar sua eficiência energética (LIPPEL, 2021). Durante o processo, pode ser adicionado um agente aglutinante, sólido ou líquido, para melhorar a coesão entre as partículas sólidas, atuando como uma espécie de cola (FILIPPETTO, 2008).

Existem diversos tipos de briquetes disponíveis no mercado, adaptados às necessidades específicas de clientes e indústrias. Alguns exemplos notáveis incluem:

- Briquetes de Ferro-Coque: Usados principalmente em aplicações industriais, são compostos por uma mistura de minério de ferro com coque, que pode ser de carvão mineral ou vegetal, e frequentemente contêm ligantes como CaO e melação para a produção de aço (FLORES et al., 2014).
- Briquetes para a Indústria Siderúrgica: Produzidos a partir de resíduos ferrosos e particulados de materiais carbonosos, são destinados a várias aplicações na indústria siderúrgica (BUZIN, 2009).
- Briquetes de Carvão: Com diversas composições, atendem a diferentes necessidades, como alimentação em caldeiras e fornalhas industriais, além de uso doméstico em fornalhas e churrasqueiras. Também existem briquetes de alta qualidade para narguilés, projetados para minimizar impactos dos fumos gerados (DE MORAES et al., 2019; NARZARY; BRAHMA; DAS, 2023; WU et al., 2018).
- Briquetes de Biomassa da Agroindústria: Compactados sem aquecimento, podem ser de uma única biomassa ou uma mistura, com aplicações em fornalha, caldeira, churrasqueira, fogão à lenha ou aquecimento de lareiras. Este tipo de briquete foi adotado para este trabalho.

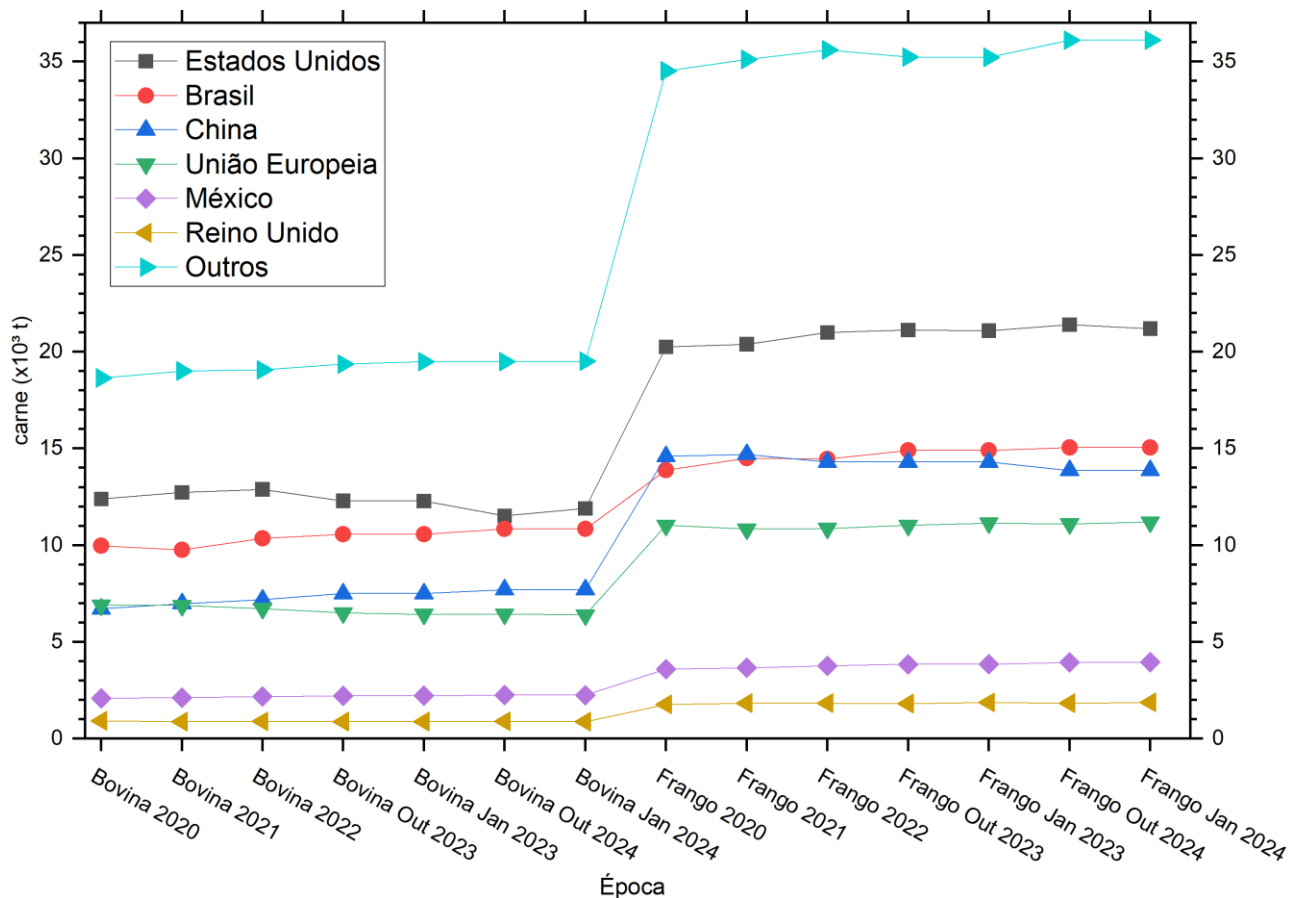
Além disso, existem briquetes produzidos exclusivamente a partir de resíduos lignocelulósicos (madeira ou carvão), bem como briquetes compostos feitos a partir de mais de um tipo de resíduo, incluindo óleos e gorduras animais ou vegetais. Além disso, há briquetes que

utilizam matéria-prima natural ou sintética como aglutinantes. No contexto deste estudo, o óleo de frango, de origem natural, é utilizado como aglutinante. O processo de elaboração dos briquetes ocorre em equipamentos conhecidos como briquetadeiras, que podem utilizar prensas de pistão mecânico, prensas de parafuso sem-fim, prensas de rolo ou por extrusão (FILIPPETTO, 2008). No mercado brasileiro, as briquetadeiras a pistão mecânico, tanto nacionais quanto importadas, são as mais comuns, com raros equipamentos mecânicos com parafuso sem fim, uma alternativa mais barata para microprodutores.

3.3 PRODUÇÃO DE FRANGO

O Brasil é o segundo maior produtor de carne de frango do mundo, com uma participação significativa de 14,57% em 2024 (Figura 3.1), ficando atrás apenas dos Estados Unidos, que possuem 20,53%. Conseqüentemente, o país é também um dos principais geradores de resíduos de frango (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA), 2024).

Figura 3.1 - Produção de carne bovina e vitela e de frango por país.



Fonte: USDA (2024).

A produção de carne bovina e vitela a esquerda e de frango a direita e ambas por milhão de toneladas (10^6 t) ranqueando os oito países mais expressivos para cada tipo de carne produzida. Destaca-se que as previsões para outubro 2024 indicam uma variação nula da produção de frango no Brasil, EUA com um aumento de 0,18%, enquanto a nível global há um aumento de 0,04% apenas se comparado com janeiro de 2024. Estas perspectivas são positivas, mas por outro lado, indicam a continuidade da geração de resíduos proveniente do abate de frangos.

Ao comparar a produção de carne bovina e vitela com a de frango, observa-se um aumento na produção de frango, enquanto a produção de carne bovina diminuiu. Esse cenário ocorreu devido ao aumento mais acentuado no preço da carne bovina em comparação com a carne de frango, tornando esta última mais acessível em termos de preço por peso. Além disso, a pandemia que teve início em 2020 incentivou a população a consumir mais a carne de frango em detrimento de outras proteínas, como a carne bovina devido aos custos (CEPEA/ESALQ/USP, 2021).

Além do elevado volume de exportação de carne frango, o Brasil também é um grande consumidor desse produto. De acordo com o relatório anual da Associação Brasileira de Proteína Animal - (ABPA, 2023), o Brasil apresenta índices elevados em consumo médio de frango por habitante. Entre 2007 e 2016, esse índice subiu de 37,02 para 41,10 kg/habitante, como indicado na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Consumo per capita de carne de frango no Brasil (kg/hab).

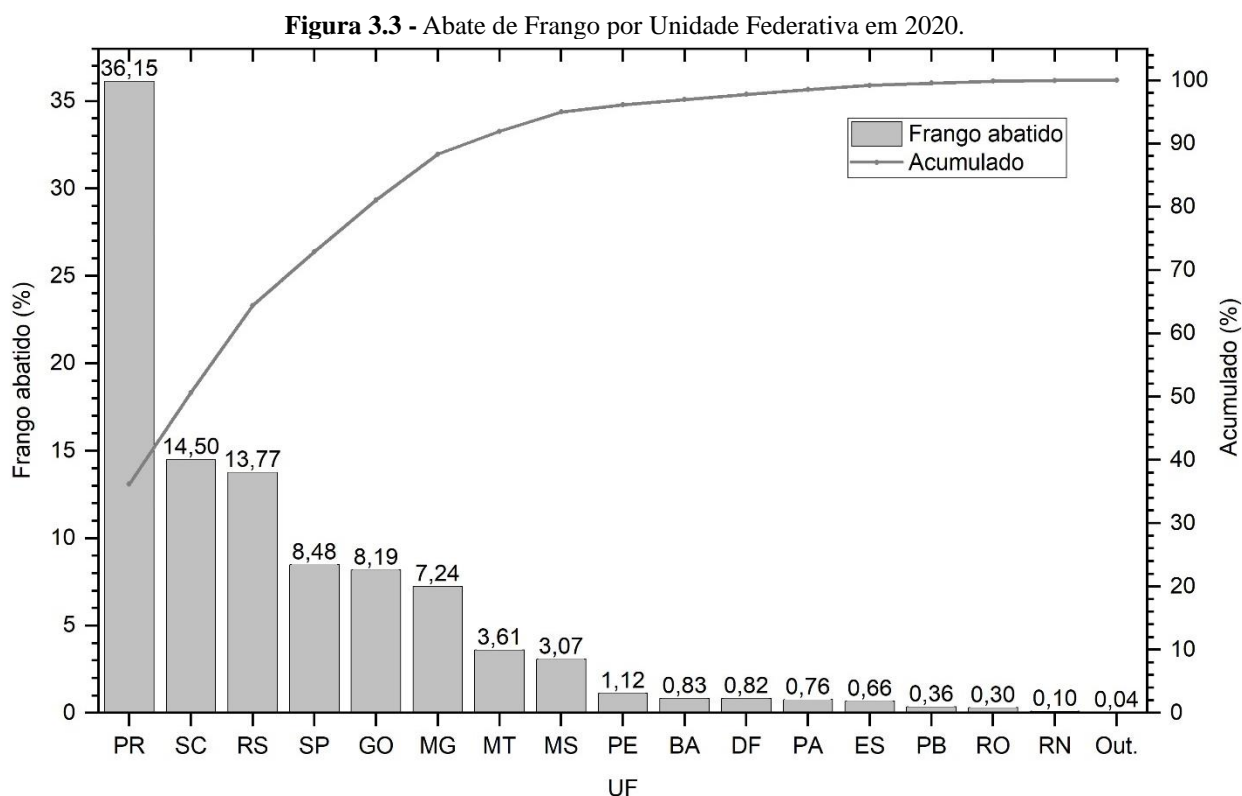


Fonte: Adaptado de (ABPA, 2023).

No ano de 2011 registrou-se o maior índice, com 47,38 kg/habitante, e há uma tendência de crescimento contínuo, com dados mais recentes indicando que esse crescimento está prestes a ser retomado em 2023, sendo que em 2020 quase bate o recorde dos últimos dez anos, no entanto espera-se resultados atualizados para comprovar esta tendência de consumo em que retoma este crescimento (ABPA, 2023). No Brasil, assim como a produção agrícola, a produção de frango

para abate não é uniforme entre as unidades federativas (UF). Essas variações são decorrentes das condições geográficas, que incluem tanto um clima favorável para a criação de frangos quanto a disponibilidade de insumos necessários para sua produção.

A Figura 3.3 mostra que o estado do Paraná representa a maior fatia em percentagem de abate de frango no Brasil, em torno de 36,2%. Isso se reflete na geração de resíduos do frango, como o óleo visceral no abate.



Fonte: Adaptado de (ABPA, 2023).

Logo após o Paraná, vêm os estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, que somados representa uma participação nacional de 64,42% na produção de frangos de abate. Assim, é evidente que a região sul do país é a principal produtora de frango para abate, e esses três estados superam em produção a soma de todos os outros estados brasileiros.

No processo produtivo de abate do frango, há sete etapas principais de processamento avícola, detalhadas no Quadro 3.2 a seguir. Em cada uma delas são produzidos diversos dejetos e subprodutos (sp). Com toda esta produção, surge a necessidade de se utilizar esses resíduos de forma a reduzir ou até mesmo eliminar qualquer passivo ambiental decorrente deste ramo produtivo. Alguns desses resíduos possuem potencial energético e podem ser utilizados como agentes aglutinantes em briquetes, como é o caso da gordura. No entanto, pretende-se utilizar a gordura extraída da etapa de evisceração, pelo fato de estar isenta de carga biológica, evitando assim etapas adicionais de descontaminação.

Quadro 3.2 - Tipos de dejetos e subprodutos produzidos nas diferentes etapas do processamento avícola.

Etapa do processamento	Tipo de dejeito ou subproduto (sp)
Recepção	Fezes, penas, água de limpeza
Sacrifício	Sangue, água de limpeza
Escalda / Depenamento	Penas, sangue/gordura*, água de limpeza
Evisceração	Vísceras, sangue, gordura*, pequenos pedaços de carne, água de limpeza
Resfriamento	Sangue, gordura*, pequenos pedaços de carne, água
Classificação e empacotamento	Água de limpeza
Limpeza da planta	Água de limpeza

Nota: * gordura do frango como subproduto

Fonte: (NASCIMENTO, 2000).

A gordura do frango, retirada da cavidade abdominal, é considerada um resíduo sem interesse interno nas indústrias de processamento de frango. A diferença entre óleo e gordura está na forma em que se encontram à temperatura ambiente. Após a extração, a gordura se apresenta em uma forma mais fluida e é denominada de óleo visceral de frango (OVF).

Parte dos resíduos provenientes do abate de frango são destinados para outros setores, como a de complementação de ração animal, a fabricação de sabão e para a produção de biodiesel (DA SILVA et al., 2012). Na literatura, encontram-se outros exemplos de produção de biodiesel a partir da gordura do frango, seja pura ou com aditivos, após passar por diversos processos de tratamento para a transesterificação e esterificação de forma otimizada (SHOBHANA-GNANASERKHAR et al., 2020).

Não foram encontrados relatos na literatura sobre o uso da gordura abdominal do frango (OVF) na fabricação de briquetes, na densificação de biocombustível sólido ou como aglutinante. Portanto, pretende-se investigar o uso desse resíduo para esses fins, bem como quanto ao uso do óleo de frango assado (OFA), que normalmente é destinado à fabricação caseira de sabão em barra.

3.4 PRODUÇÃO DE SERRAGEM

Em todo o país, as serrarias enfrentam o desafio da destinação inadequada das serragens. Em muitos casos, esse resíduo é simplesmente descartado de forma inapropriada, sem explorar seu elevado potencial energético.

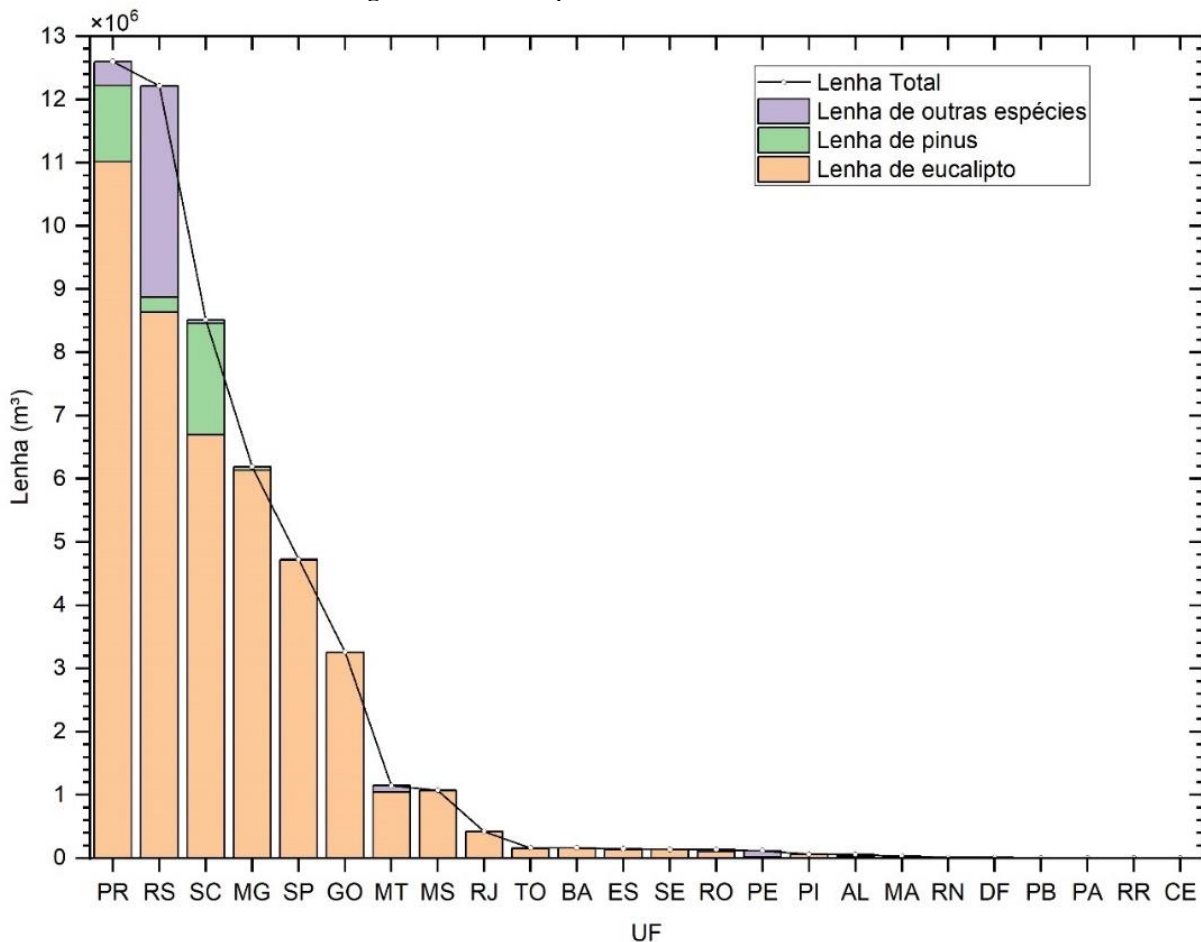
Algumas serrarias optam por encaminhar seus resíduos para outras indústrias, como a de produção de cerâmica, como é o caso das serrarias pesquisadas em Foz do Iguaçu, no Paraná, onde aproximadamente oito serrarias adotam essa prática. Outras serrarias e marcenarias comercializam a serragem para usos variados, como para a cama de hamsters ou outros roedores,

substrato para cama de frango, baias de cavalos e outros animais, além de ser utilizada em compostagem e horticultura, agregando um valor mais expressivo. Em Foz do Iguaçu, por exemplo, a serragem é vendida para olarias por uma média de R\$ 20,00 por metro cúbico (m³).

Entretanto, utilizar serragem diretamente como combustível em fornalhas não é uma opção vantajosa, uma vez que a umidade desse resíduo pode ultrapassar 30%, e, em alguns casos, a serragem fica exposta à chuva, prejudicando ainda mais sua utilização subsequente. Além disso, a serragem possui uma baixa densidade, geralmente não excedendo 0,25 g.cm⁻³, o que requer um volume muito considerável para o transporte, tornando-o caro em termos de logística devido à mão de obra, manuseio e transporte (CARVALHO et al., 2021).

Até o final de 2019 a silvicultura no Brasil se destacou na produção de eucalipto e pinus, com a quantidade dessas duas espécies somando mais do que todas as outras madeiras processadas, seja na forma de lenha, tora ou carvão (IBGE, 2021). A Figura 3.4 apresenta a produção de lenha no Brasil, com o estado do Paraná liderando como o maior produtor de lenha de eucalipto.

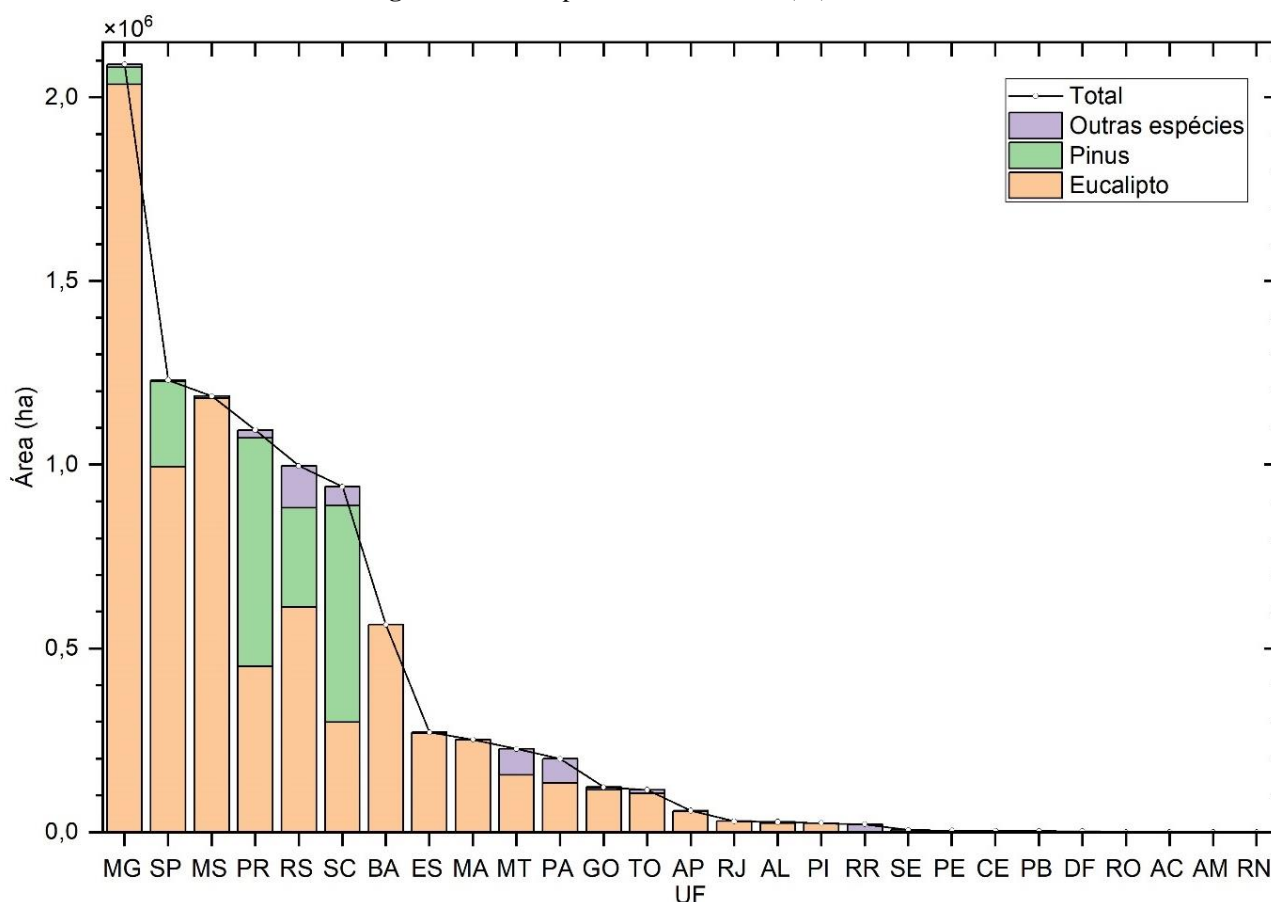
Figura 3.4 - Lenha produzida no Brasil até 2022.



Fonte: Adaptado de (IBGE, 2024).

Quanto à produção de lenha de pinus, o Paraná fica atrás apenas do estado de Santa Catarina com 36,5% e 53,4% respectivamente. A região sul do Brasil, composta pelos estados do Paraná, Rio Grande do Sul e Santa Catarina, lidera a lista com três maiores produtores de lenha, tanto de eucalipto com 60,1% quanto de pinus com 97,4%, em comparação as demais regiões do país. Um dado relevante é que a produção combinada desses três estados sulistas é quase o dobro da produção total de lenha dos demais estados brasileiros com uma fatia total de 65,1%. No entanto, quando é analisado a área total plantada de silvicultura, observa-se que o estado do Paraná fica em 4º lugar com 11,6% e a primeira posição Minas Gerais ocupa com 22,1%, conforme apresentado na Figura 3.5. No que diz respeito ao plantio de pinus, o Paraná está no topo da lista com 621.772 ha (35,1%), enquanto no plantio de eucalipto, ocupa a sexta posição com 451.014 ha (6,2%). Esta discrepância ocorre porque Minas Gerais (27,8%) é o principal produtor de carvão vegetal, principalmente utilizando a madeira de eucalipto. Fica evidente que as plantações de eucalipto e pinus têm sua concentração nas regiões Sul e Sudeste do Brasil.

Figura 3.5 - Área plantada silvicultura (ha) – 2022.



Fonte: Adaptado de (IBGE, 2024).

Esses dados são indicativos da estreita relação entre a quantidade de serragem produzida e a extensão das plantações de eucalipto e o pinus. Eles destacam que o estado do Paraná é um grande produtor de serragem devido à presença dessas culturas. Essa concentração ressalta a necessidade imperativa de se aproveitar eficientemente essa biomassa abundante.

3.5 CARACTERIZAÇÃO DAS BIOMASSAS

O principal objetivo deste trabalho foi selecionar as melhores matérias-primas entre os resíduos de serragem e óleo de frango para produzir briquetes destinados ao uso como biocombustível sólido. Para alcançar este objetivo, foi fundamental realizar a caracterização da biomassa, com foco na análise imediata (teor de umidade, teor de cinzas, teor de voláteis e teor de carbono fixo), na granulometria das partículas sólidas, na massa específica e no poder calorífico para utilização na fabricação de briquetes (DAL-BÓ et al., 2019).

3.5.1 Análise Imediata da Biomassa

A análise imediata seguiu os padrões internacionais do Método de Lees (1980) e ASTM (madeira) ASTM E870 - 82(2019), adaptando-se para 3,000 g de biomassa. A padronização desses métodos foi crucial para possibilitar a comparação dos resultados com outros estudos que seguem as mesmas metodologias.

No que diz respeito ao poder calorífico superior (PCS), é comum na literatura o uso das unidades de medida MJ.kg⁻¹ ou kcal.kg⁻¹. Portanto, os resultados são apresentados em ambas as unidades para facilitar a comparação com os resultados de outros pesquisadores. Dispõe-se na Tabela 3.1 abaixo a análise imediata e o PCS, além de algumas matérias-primas ou biomassas para fins de comparação, acompanhada dos resultados da análise imediata de alguns autores.

Tabela 3.1 - PCS e análise imediata em base seca de algumas referências.

Matéria-prima	Análise imediata			PCS medido MJ.kg ⁻¹	Referência
	T_{CF}	T_V	T_{CZ}		
Eucalyptus-Grandis	16,93	82,55	0,52	19,350	(PARIKH; CHANNIWALA; GHOSAL, 2005)
Madeira de Pinus	15,70	73,60	11,30	16,644	(PARIKH; CHANNIWALA; GHOSAL, 2005)
Briquetes de cascas de algodão	17,10	77,80	5,10	19,055	(PARIKH; CHANNIWALA; GHOSAL, 2005)
Eucalyptus-Grandis	18,17	81,79	0,04	20,110	(CRISÓSTOMO et al., 2021)
Pinus sp.	15,51	84,19	0,30	20,460	(CRISÓSTOMO et al., 2021)

Nota: T_{CZ} → Teor de cinzas; T_V → Teor de voláteis e T_{CF} → Teor de carbono fixo.

É importante observar que o teor de cinzas aceitável deve ser menor do que 1,50%, uma vez que valores acima desse limiar podem causar problemas, como incrustações no equipamento, prejudicando a troca térmica, desgaste no equipamento por abrasão e corrosão. Essas questões afetam a eficiência do combustível (CRISÓSTOMO et al., 2021). Para evitar esses problemas, é fundamental utilizar biomassas, ou combinações delas, que proporcionem o menor teor de cinzas possível, além de um PCS elevado.

O teor de carbono fixo é crucial para avaliar a qualidade da biomassa como fonte de energia, pois indica a quantidade de carbono disponível para a combustão após a remoção da umidade e voláteis. Um alto teor de carbono fixo geralmente sugere uma maior eficiência energética, pois contribui para uma combustão mais prolongada e estável. Segundo Granado et al. (2021), a análise de briquetes de resíduos de mandioca mostrou um teor de carbono fixo de 13,10%, o que indica uma boa qualidade para fins energéticos, especialmente em processos que requerem uma liberação lenta e contínua de energia.

O teor de voláteis em briquetes de biomassa refere-se à porcentagem de componentes que se evaporam rapidamente quando aquecidos, sendo essencial para determinar a rapidez com que a biomassa inicia a combustão. Um alto teor de voláteis é benéfico para aplicações que demandam uma geração de calor rápida, como em sistemas de aquecimento que precisam de rápida resposta térmica. No entanto, para sistemas que requerem uma liberação de calor mais constante e prolongada, um teor mais baixo pode ser mais adequado, a fim de sustentar a combustão por mais tempo. Por exemplo, briquetes de resíduos de mandioca apresentaram 72,50% de voláteis, sugerindo uma combustão inicial rápida, o que pode necessitar de ajustes para outras aplicações (GRANADO et al., 2021).

A umidade é um fator crítico que afeta diretamente o poder calorífico da biomassa. Altos níveis de umidade requerem mais energia no processo de combustão para evaporar a água, o que reduz a eficiência geral do combustível. Portanto, a biomassa deve ser adequadamente secada para otimizar seu poder calorífico. Segundo estudos, como os de Rabaçal, Fernandes e Costa (2013), a preparação adequada da biomassa, incluindo a secagem até níveis de umidade inferiores a 10%, é essencial para manter a eficiência energética.

3.5.2 Poder Calorífico

Um dos principais objetivos dos combustíveis é gerar calor, e para medir a quantidade de energia liberada na forma de calor durante a combustão em condições estequiométricas por unidade de massa de combustível consumido na combustão, usamos uma

propriedade conhecida como poder calorífico (PC). O poder calorífico superior (PCS) é a quantidade de calor liberada por unidade de massa quando a água gerada na combustão está no estado condensado. Em contrapartida, o poder calorífico inferior (PCI) é a quantidade de calor liberada por unidade de massa, mas não considera a energia do calor latente da vaporização da água gerada no processo.

O poder calorífico superior (PCS) é determinado de forma precisa por meio de bomba calorimétrica, na qual ocorre a combustão completa do combustível com gás oxigênio (O_2) em abundância. Também é possível estimar o poder calorífico superior usando equações empíricas, baseadas na análise elementar da amostra, incluindo os teores de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre. No entanto, é importante ressaltar que estas estimativas podem variar em relação ao PCS medido na bomba calorimétrica, que é muito mais preciso.

Não existem equipamentos para se determinar diretamente o poder calorífico inferior (PCI), sendo necessário métodos indiretos para a sua determinação. A diferença entre PCS e o PCI é na ordem de 8% a 9% de variação em média, devido a entalpia de vaporização da água formada durante a combustão, que é considerada no PCS, mas não no PCI. A relação é vista na Equação 3.1.

$$PCI = PCS - 2240(9.H + \mu) \quad (3.1)$$

Em que:

- PCI = Poder calorífico inferior, $MJ.kg^{-1}$ em base seca de combustível.
- PCS = Poder calorífico superior, $MJ.kg^{-1}$.
- H = Teor de hidrogênio do combustível, $kg.kg^{-1}$ em base seca de combustível.
- μ = teor de umidade do combustível. kg de água por kg de combustível seco.

É importante destacar que o PCS é sempre maior ou igual ao PCI, sendo igual quando não há umidade no combustível nem formação de vapor de água durante a combustão. Caso não haja hidrogênio na molécula do combustível e a umidade seja nula, o PC, PCS e PCI serão iguais.

A respeito das fórmulas empíricas para se estimar tanto o PCS quanto o PCI, há a fórmula de Dulong para ambos e a fórmula de Gouthal, que fornece o PCS. No entanto, essas estimativas podem não corresponder à realidade devido a perdas nos gases de exaustão, radiação térmica e outras limitações. Mesmo assim, essas fórmulas são usadas quando não há outras opções disponíveis.

Uma equação empírica destacada na literatura para estimar o Poder Calorífico Superior (PCS) é a de Parikh, Channiwala e Ghosal (2005). Estes autores testaram cerca de cem biomassas distintas e correlacionam o teor de carbono fixo, o teor de voláteis e o teor de cinzas, como expresso na Equação 3.2. Os fatores teores de cinza, carbono fixo e voláteis variam numa escala de 0 a 1 que corresponde de 0 a 100%.

$$PCS = 35,36 \cdot T_{CF} + 15,59 \cdot T_V - 0,78 \cdot T_{CZ} \quad (3.2)$$

Nesta equação, segundo os autores Parikh, Channiwala e Ghosal (2005), chegou-se a um erro absoluto de 3,74% e um erro sistemático de apenas 0,12%, tornando esses valores de erro aceitáveis para a estimativa do PCS com base nos dados da análise imediata. Essa equação pode ser usada para comparação com o PCS medido em bomba calorimétrica. No entanto, vale ressaltar que esta equação não foi testada para óleos, portanto, não é apropriada para estimar o PCS do OVF e OFA.

3.5.3 Análise Termogravimétrica TGA

A análise termogravimétrica (TGA) consiste em uma técnica destrutiva que envolve o uso de uma pequena quantidade de amostra, geralmente inferior a um grama, em um equipamento especializado que pode operar tanto em atmosfera inerte quanto em atmosfera oxidante (oxigênio) ou a combinação entre elas, dependendo das necessidades específicas da análise. O equipamento aquece a amostra a uma taxa constante predefinida pelo operador em função do tempo. À medida que a amostra é aquecida, ela perde massa, e essa perda de massa é constantemente monitorada por uma balança analítica de alta precisão. Ao final do processo, o equipamento fornece informações sobre a perda de massa em função da temperatura do sistema. A faixa de temperatura, dependendo do modelo do equipamento, pode chegar a cerca de 2000 °C. O porta amostra é feito de material inerte para evitar degradação durante a análise, e os cadinhos podem ser de diversos materiais, como alumínio, alumina, policarbonato de alumínio (PCA), platina, ouro, vidro, cobre ou materiais de alta resistência, dependendo das características da amostra e das condições específicas de operação, tais como temperatura máxima e velocidade de aquecimento.

No mesmo equipamento utilizado para a análise termogravimétrica, é possível obter a Termogravimetria derivada (DTG), que é a primeira derivada dos resultados do TGA. A DTG representa os degraus no gráfico de TGA na forma de picos, tornando mais fácil a

interpretação dos resultados (JANKOVIĆ et al., 2020). Em alguns casos, é necessário aplicar a segunda derivada para obter uma precisão adicional dos resultados, e isso pode ser calculado com base nos resultados de TGA.

3.5.4 Resistência Mecânica

Os ensaios de resistência mecânica devem ser realizados em máquina universal de ensaios e devem seguir normas técnicas, a saber a NBR 7222 (ABNT, 1994). Neste tipo de equipamento, são realizados ensaios destrutivos para determinar a resistência à compressão axial dos briquetes em função da força de resistência aplicada ao corpo de prova, que leva à sua ruptura. O ensaio continua até o momento da liberação da carga de tensão.

É importante mencionar que esta norma é voltada para ensaios em argamassa e concreto, como a determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos (SOARES et al., 2015). No caso dos briquetes, como não existem normas específicas para esse material, é necessário realizar adaptações e comparar os resultados com outros trabalhos publicados devido à falta de normas específicas para briquetes.

3.6 ENGENHARIA DE PROCESSOS

Ao considerar as múltiplas alternativas tecnológicas disponíveis para a produção de briquetes, surge a necessidade premente de avaliar os critérios fundamentais que orientarão a escolha ótima entre essas possibilidades. Esse discernimento se revela crucial, pois impacta diretamente na eficiência energética, resultando em economia significativa de tempo, recursos financeiros e materiais, mantendo-se aderente aos critérios de sustentabilidade.

Nesse contexto, a Engenharia de Processos assume um papel de destaque, fornecendo uma estrutura sólida e rigorosa para a concepção e implementação de procedimentos otimizados. Conforme definido por Takamatsu (1983), a Engenharia de Processos é uma área acadêmica e tecnológica dedicada às metodologias de tomada de decisão em Engenharia Química. Essas metodologias orientam as fases de planejamento, projeto, operação e controle, abrangendo uma vasta gama de operações unitárias e processos químicos, incluindo a produção nas indústrias químicas.

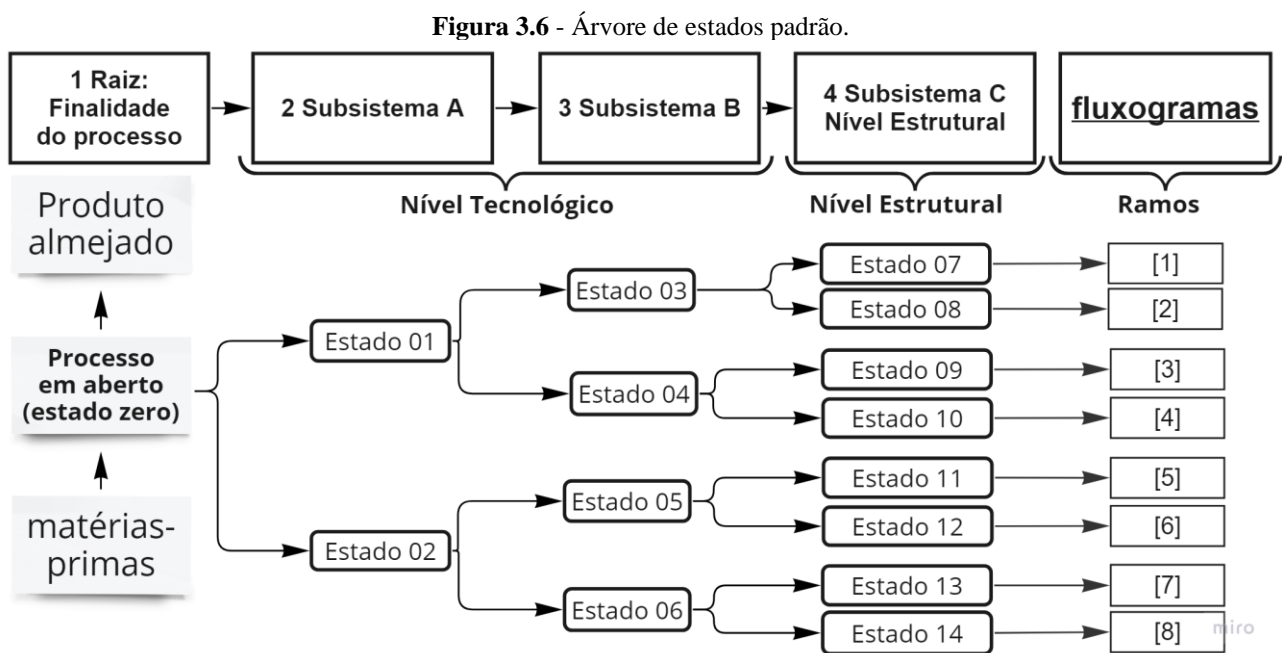
Para alcançar um produto com as especificações desejadas, duas etapas principais são utilizadas. Primeiramente, identificam-se as características específicas desejadas do produto.

Com base nesses dados, procede-se à otimização estrutural utilizando métodos heurísticos e evolutivos para determinar o caminho ótimo para o produto desejado (DAL-BÓ et al., 2019).

Em resumo, a Engenharia de Processos, nesse sentido, garante que os produtos atinjam suas metas energéticas de maneira ecologicamente responsável, ao mesmo tempo que economizam recursos e esforços.

3.6.1 Árvore de Estado Padrão

Uma ferramenta valiosa para abordar problemas complexos com várias opções é a representação gráfica por meio de uma árvore de estados. Esta é composta pelas rotas tecnológicas, formando uma estrutura que sintetiza os processos e visa gerar múltiplas possibilidades de subestruturas viáveis, o que pode resultar em uma quantidade exponencial de alternativas. Pequenas variações podem levar a novas estruturas viáveis, aumentando a eficiência do processo ao adaptar-se a mudanças e maximizar os resultados. Posteriormente, realiza-se uma análise classificada em nível paramétrico com o objetivo de chegar a um fluxograma heurístico, também conhecido como fluxograma ótimo. A partir do fluxograma heurístico, determinam-se os vizinhos estruturais, que são fluxogramas alternativos ao fluxograma heurístico, variando apenas um único elemento estrutural, ou seja, uma rota tecnológica (PERLINGEIRO, 2005). Na Figura 3.6 é apresentado o modelo da árvore de estados padrão, conforme definido por Perlingeiro (2005), a partir do qual foram estabelecidos os componentes necessários.



O uso da árvore de estados traz vantagens na busca por soluções para problemas tecnológicos, pois torna mais claro o processo de percorrer cada fluxograma por meio das rotas tecnológicas. Em cada ramo da árvore, existe uma solução potencial para o problema em questão. A resolução desse problema envolve uma série de etapas a serem seguidas.

O primeiro passo na construção da árvore de estado é definir a raiz do problema. Em seguida, são selecionadas as matérias-primas a serem utilizadas e o produto desejado. Neste estágio, o processo está em um estado inicial em aberto.

No nível tecnológico, são feitas escolhas relacionadas aos equipamentos, ferramentas, seleção de matérias-primas, operações unitárias utilizadas e tratamentos gerais, tudo isso direcionado para encontrar uma solução parcial. No nível estrutural, a ênfase é dada à criação de soluções parciais, gerando os fluxogramas relacionados às rotas do processo.

3.6.2 Análise das Rotas

A análise das rotas tecnológicas disponíveis é realizada por meio de metodologias que compreendem a coleta e análise de dados disponíveis, combinando conhecimento empírico, tecnológico e científico de cada subsistema e fluxograma identificado. Diante das inúmeras soluções plausíveis, abordagens intuitivas como métodos heurísticos e evolutivos são empregadas. O objetivo é encontrar o fluxograma ótimo dentro da árvore de estados apresentada, sem o risco de repetir fluxogramas ou omitir alguma alternativa (PERLINGEIRO, 2005). Para definir o fluxograma ótimo, podem ser aplicadas técnicas exaustivas, como regras heurísticas.

É importante atualizar e adaptar os processos à medida que novas tecnologias surgem, considerando desde o desenho até as quantidades de componentes envolvidos, custos, padrões contemporâneos e operações dos equipamentos mais recentes (DAL-BÓ, 2021). Também é fundamental evitar a seleção de equipamentos ou tecnologias obsoletos, a menos que a intensão seja comparar sua eficiência e economia.

3.6.3 Método Heurístico e Evolutivo

O método heurístico, também conhecido como regra heurística, envolve intervenções em cada subsistema apresentado na árvore de estados para a tomada de decisão. Esse método busca melhorar a eficácia da tomada de decisões, garantindo que os objetivos esperados sejam alcançados e proporcionando eficiência ao processo, seja em termos de energia, tempo, custos, mão de obra, quantidade de materiais empregados, impacto ambiental ou sustentabilidade.

O processo evolutivo, por outro lado, envolve a seleção das opções ou gerações mais promissoras, descartando as menos vantajosas. A partir das soluções promissoras, seleciona-se outras com características semelhantes.

É crucial utilizar o método evolutivo em conjunto com o método heurístico, pois, quando aplicados de forma isolada, é menos provável gerar sempre o fluxograma ótimo. A partir do fluxograma ótimo, também conhecido como fluxograma heurístico, são determinados os vizinhos estruturais, que são fluxogramas alternativos, ajustando-se a pequenas variações nas condições ou necessidades do processo.

3.7 APANHADO GERAL

Evidenciou-se a crescente necessidade de explorar fontes de energia sustentáveis, em especial o uso de resíduos agrícolas como biomassa para a produção de briquetes. Esta abordagem, além de oferecer uma alternativa econômica, contribuiu para a resolução de problemas ambientais relacionados à destinação inadequada de resíduos e à escassez de combustíveis tradicionais. A pesquisa realizada neste capítulo destacou o potencial dos briquetes como uma solução energética inovadora, abordando aspectos como massa específica, eficiência energética e possíveis aplicações. No Capítulo 4, Metodologia, detalham-se os experimentos e técnicas utilizados para avaliar a eficácia dos briquetes produzidos a partir de diversas combinações de biomassa, visando alcançar os melhores resultados em termos de características mecânicas térmicas.

CAPÍTULO 4 METODOLOGIA

Neste capítulo, apresenta-se a metodologia utilizada neste estudo, que compreende pesquisa bibliográfica, trabalho de campo e realização de experimentos. As etapas que compõem o procedimento são:

- (a) obtenção da matéria-prima,
- (b) elaboração da árvore de estados e planejamento experimental,
- (c) classificação e tratamento da matéria-prima,
- (d) caracterização da matéria-prima,
- (e) homogeneização da mistura,
- (f) confecção dos briquetes e
- (g) realização de ensaios diversos.

Ainda neste capítulo se apresenta o planejamento experimental, a elaboração da árvore de estados, a análise experimental e determinação do fluxograma base bem como dos vizinhos estruturais. Com os dados obtidos, segue para a etapa de análise estatística, para a verificação das variáveis resposta, incluindo poder calorífico superior (PCS), análise termogravimétrica, resistência mecânica e vida útil.

4.1 MATÉRIA-PRIMA

As matérias-primas utilizadas neste trabalho foram:

- Serragens e pó de serra: *Eucalyptus grandis* (EG) e *Pinus elliottii* (PE), Figura 4.3.
 - Origem: Obtidas de madeireiras na cidade de Foz do Iguaçu, PR.
 - Custo: R\$ 20,00 por metro cúbico (1 m³).
- Óleo Visceral de Frango (OVF), Figura 4.4.
 - Origem: Proveniente da Unidade Industrial de Aves - Lar Cooperativa, Matelândia, PR.
 - Custo: R\$ 6,50 por quilograma (1 kg).
- Óleo de Frango Assado (OFA), Figura 4.4.
 - Origem: Adquirido de lanchonetes em Foz do Iguaçu, PR.
 - Custo: varia de gratuito a no máximo R\$ 0,80 por litro (1 L)

Embora todos os fornecedores tenham doado as biomassas para este estudo, é importante observar que, em condições normais, os valores mencionados seriam aplicados. Foram realizadas parcerias com fornecedores de insumos e matérias-primas na região do Oeste do Paraná, principalmente em Foz do Iguaçu e Matelândia. Tentativas de coletar amostras no Paraguai, na Cidade do Leste (*Ciudad Del Este*), foram dificultadas devido aos obstáculos burocráticos. Este estudo visa abordar a questão de destinação de resíduos, que, embora tenham alguma, não é suficiente para absorver todo o volume gerado.

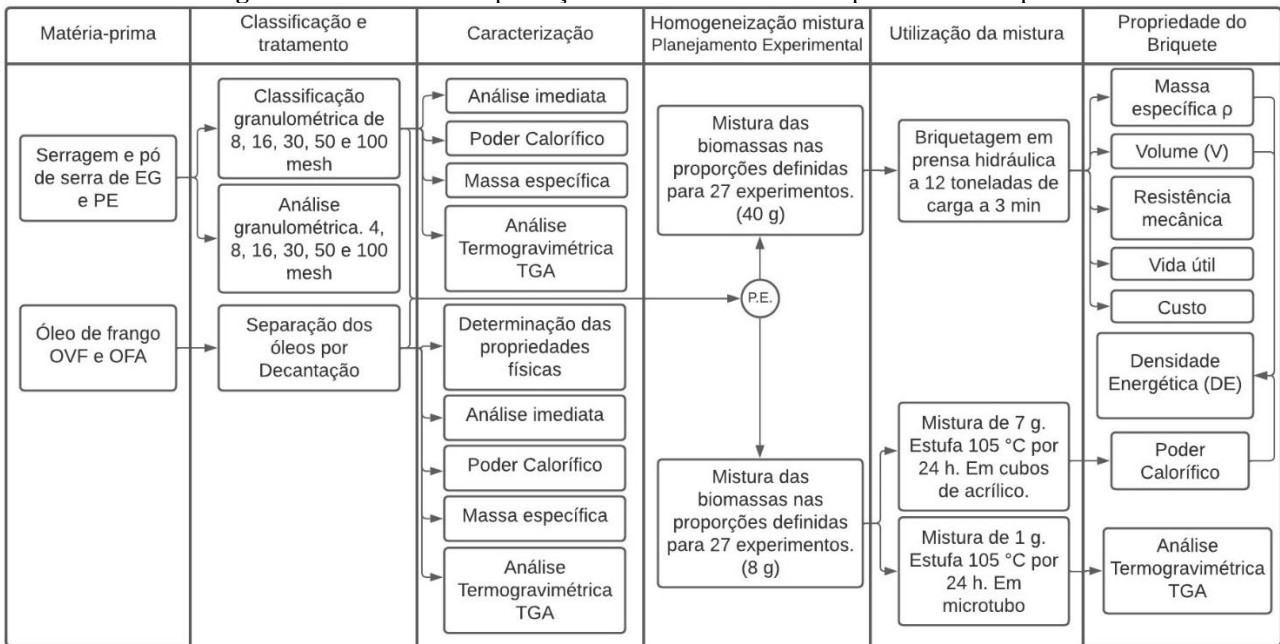
4.2 LOCAL DE ESTUDO

Todos os resíduos foram encaminhados para os laboratórios da UNILA, situados no Parque Tecnológico Itaipu (PTI) no setor sul, bloco 7 e bloco 15. Para conduzir os experimentos e estudos, firmou-se parcerias com indústrias e empresas fornecedores de resíduos, abrangendo setores como o abate de frangos (LAR), serrarias e estabelecimentos do ramo alimentício envolvidos no processo de assar frangos. Além disso, contou-se com a colaboração da própria Universidade Federal de Integração Latino-Americana (UNILA) para o desenvolvimento dos corpos de prova e a realização dos experimentos em Foz do Iguaçu, PR.

4.3 RESUMO DO PROCESSO

É apresentado na Figura 4.1 de forma resumida, todo o processo, desde a obtenção da matéria-prima até o tratamento, classificação, caracterização, mistura, briquetagem e ensaios, tanto nos briquetes quanto na matéria-prima tratada. Observa-se que o processo se inicia com duas categorias de matérias-primas. Posteriormente elas são submetidas a tratamentos específicos, seguidos por diversas etapas de caracterização, incluindo análise imediata, PCS, TGA, massa específica, entre outras. Com a biomassa devidamente tratada, é feito a mistura a partir da definição do planejamento experimental dividindo em dois grupos:

- (a) destinado para a produção de briquetes, contendo quarenta gramas (40 g) → Massa específica do briquete; Resistência mecânica do briquete e Vida útil do briquete.
- (b) para a mistura não densificada, contendo oito gramas (8 g), Análise imediata; Poder Calorífico Superior (PCS) e Análise termogravimétrica (TGA).

Figura 4.1 - Processos de produção e análises das matérias-primas e do briquete.

Fonte: O autor.

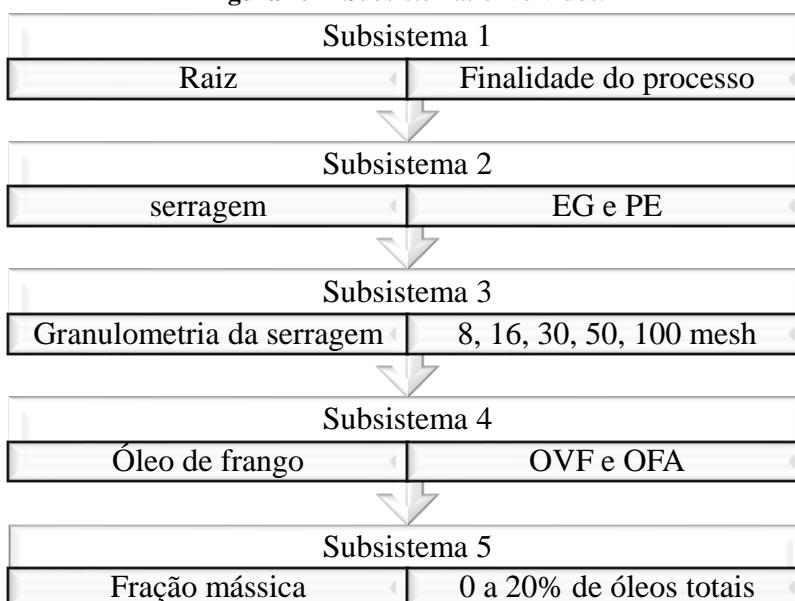
É importante destacar que a fração mássica em ambos os grupos permanece a mesma, variando apenas a massa total de cada tratamento. Ambas as misturas foram armazenadas nas mesmas condições.

4.4 ÁRVORE DE ESTADOS E SUBSISTEMAS ENVOLVIDOS

Com base nos princípios da Engenharia de Processos, empregou-se a metodologia da árvore de estados. Essa abordagem parte da raiz do problema, que é a finalidade do processo, e desdobra-se nos diversos subsistemas que compõem o processo até se chegar ao produto, que, neste estudo, é o briquete no ramo promissor (PERLINGEIRO, 2005). Foram definidos cinco subsistemas, disponibilizados na Figura 4.2 que são: (1) raiz do problema, (2) serragem, (3) classificação da serragem, (4) óleo de frango e (5) fração mássica.

Selecionou-se as variáveis relevantes para o processo dentre as inúmeras existentes, suprimindo algumas pelo fato de serem constantes, como a carga aplicada, a não aplicação de calor na mistura para briquetagem e a ausência de secagem da matéria-prima. A partir da definição dos subsistemas, atribuiu-se cinco níveis para serem aplicados a cada variável (sistema).

Figura 4.2 - Subsistemas envolvidos.



Fonte: O autor.

4.4.1 Planejamento Experimental

O planejamento experimental foi conduzido com o auxílio de *softwares* gratuitos, como o Google Planilhas e o R Studio de estatística e outros. Estas são aplicações gráficas para análise de dados e estatísticas.

Para avaliar a eficiência do processo de briquetagem, planejou-se testes com as matérias-primas selecionadas, variando as quantidades de cada uma. Em seguida, foi realizada a análise estatística para verificar a significância das variáveis respostas. Isso foi feito por meio da determinação das diferenças entre os corpos de prova, utilizando a tabela dos efeitos estimados em comparação com a superfície de resposta.

Considerando todas as combinações possíveis, chegou-se a 4 fatores e 5 níveis e aplicando o cálculo da Equação 4.1, temos:

$$n_{exp} = n^k = 5^4 = 625 \quad (4.1)$$

Obteve-se um valor de 625 experimentos possíveis, no entanto não é necessário realizar todos estes experimentos. Utiliza-se técnicas para reduzir consideravelmente o número de experimentos, mantendo resultados satisfatórios.

Na literatura, existem diversos tipos de planejamentos experimental. Dentre os quais foi selecionado o planejamento composto central (CCD – *central composite design*) com 4

fatores (variáveis), correspondendo aos subsistemas definidos: (2) serragem, (3) classificação da serragem, (4) óleo de frango e (5) fração mássica.

Este tipo de planejamento é uma evolução em relação ao planejamento fatorial completo, que exige numerosos experimentos, inclusive para planejamentos fracionários. O CCD possui pontos centrais repetidos e axiais (TEÓFILO; FERREIRA, 2006).

Os fatores, que totalizam quatro ($k = 4$), foram codificadas em cinco níveis (-2, -1, 0, +1 e +2) como indicado na Tabela 4.1, que detalha as variáveis e seus níveis utilizados no planejamento experimental.

Tabela 4.1 - Variáveis e níveis utilizados no planejamento experimental.

Fatores	Níveis				
	-2	-1	0	+1	+2
X ₁ Proporção das Serragens entre a fração mássica de serragem na mistura (%)	EG000	EG025	EG050	EG075	EG100
	PE100	PE075	PE050	PE025	PE000
X ₂ Granulometria em Mesh das Serragens	008M	016M	030M	050M	100M
X ₃ Proporção dos óleos de frango na fração mássica dos óleos na mistura (%)	OVF000	OVF025	50 OVF	VF075	OVF100
	OFA100	OFA075	50 OFA	OFA025	OFA000
X ₄ Fração mássica de óleo mistura (%)	o00s100	o05s095	o10s090	o15s085	o20s080

Fonte: O autor.

O planejamento escolhido foi o completo 2^k , no qual são realizados experimentos no ponto central ($2k$). O número total de experimentos a serem realizados é dado pela Equação 4.2 a seguir (TEÓFILO; FERREIRA, 2006).

$$n_{exp} = 2^k + 2 \cdot k + 1 \quad (4.2)$$

Aplicando a Equação 4.2, sabendo que $k = 4$, temos:

$$n_{exp} = 2^k + 2 \cdot k + 1 = 2^4 + 2 \cdot 4 + 1 = 16 + 8 + 1 = 25.$$

Adicionando pontos centrais extras = PCE = 2.

$$n_{exp.Total} = n_{exp} + PCE = 25 + 2$$

$$\text{temos: } n_{exp.Total} = 27$$

Então há vinte e sete (27) experimentos ao todo. Dessa forma, planejou-se a sequência experimental, conforme descrito na Tabela 4.2 que mostra a sequência do planejamento fatorial dos experimentos de 1 a 16 e a Tabela 4.3 que mostra a sequência experimental que compreende os pontos centrais, experimentos 17, 18 e 19, bem como os pontos axiais, que compreende os experimentos de 20 a 27.

Tabela 4.2 - Sequência experimental planejamento fatorial.

Variáveis	Exp	Planejamento Fatorial															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Proporção das Serragens	X ₁	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
Granulometria das serragens	X ₂	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1
Proporção de óleo de frango	X ₃	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
Fração mássica de óleo	X ₄	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1

Fonte: O autor.

Tabela 4.3 - Sequência experimental pontos centrais e axiais.

Variáveis	Exp	Ponto Central			Pontos axiais													
		17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27						
Proporção das Serragens	X ₁	0	0	0	-2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Granulometria das serragens	X ₂	0	0	0	0	0	-2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Proporção de óleo de frango	X ₃	0	0	0	0	0	0	0	-2	2	0	0	0	0	0	0	0	
Fração mássica de óleo	X ₄	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	2	0	

Fonte: O autor.

Com base nos dados obtidos do planejamento experimental e na definição dos subsistemas, foi possível detalhar cada subsistema. Isso permitiu a estruturação da árvore de estados em etapas subsequentes, contemplando cada fluxograma. Além dos 27 experimentos definidos, foi incluído o experimento 28, que constitui em uma mistura equitativa de EG e PE. As matérias-primas foram enumeradas como 29 – EG, 30 - PE, 31 – OVF e 32 – OFA. Essa identificação foi primordial para fins de organização no laboratório e na planificação.

4.4.2 Raiz: Finalidade do Processo

Nessa seção são apresentadas as duas extremidades do processo. Na entrada, há as matérias-primas, que são EG, PE, OVF e OFA. Na saída, é obtido o produto, o briquete, com a composição ótima de serragens e óleos de frango. A seleção do fluxograma ótimo é realizada por meio dos métodos heurísticos, evolutivos. Isso ocorre após a obtenção dos resultados dos experimentos designados. Para alcançar o produto, requer a seleção do fluxograma promissor e os vizinhos estruturais como alternativas ao processo.

4.4.3 Subsistema de Escolha da Serragem

No subsistema de escolha da serragem, há dois tipos: *Eucalyptus grandis* (EG) e *Pinus elliottii* (PE). Essas serragens foram escolhidas devido à sua abundância nas serrarias da

cidade de Foz do Iguaçu - PR e em muitas cidades no Brasil. Há várias abordagens possíveis para o uso destas serragens:

- a) A mistura varia a fração mássica em 25%, usando como base o total de serragem empregado, perpassando por 5 níveis, iniciando em 0% de EG e 100% de PE, aumentando o teor de EG e diminuindo o de PE conforme a distribuição a seguir:
 - a. 0% EG e 100% de PE (apenas PE) [-2]
 - b. 25% EG e 75% de PE (mistura 1) [-1]
 - c. 50% EG e 50% de PE (mistura 2) [0]
 - d. 75% EG e 25% de PE (mistura 3) [+1]
 - e. 100% EG e 0% de PE (apenas EG) [+2]
- b) Independente da proporção de EG e PE em uma determinada mistura, a granulometria utilizada é a mesma, conforme definido no planejamento experimental.

4.4.4 Subsistema da Granulometria da Serragem

Para a produção de briquetes, foram armazenadas serragens que ficaram retidas nas peneiras Tyler de #8 até na de #100 mesh. Apenas a peneira de #4 mesh foi inutilizada, abrangendo assim cinco níveis de granulometria. A análise granulométrica é abordada de forma ampla no item 4.6.1 deste trabalho. A granulometria foi distribuída nos cinco níveis da seguinte forma:

- a. #8 mesh ($m_{EG} + m_{PE}$) [-2]
- b. #16 mesh ($m_{EG} + m_{PE}$) [-1]
- c. #30 mesh ($m_{EG} + m_{PE}$) [0]
- d. #50 mesh ($m_{EG} + m_{PE}$) [+1]
- e. #100 mesh ($m_{EG} + m_{PE}$) [+2]

Em que $m_{EG} + m_{PE}$ é a soma de serragem com pó de serra do EG e PE respectivamente utilizando a mesma granulometria para determinado nível selecionado.

4.4.5 Subsistema da Escolha do Óleo de Frango (Aglutinante)

O óleo de frango desempenha um papel como aglutinante no briquete a ser produzido, conferindo-lhe melhor resistência mecânica, resistência a umidade, coesão entre as partículas de serragem e aumento na aglomeração das partículas, conseqüentemente, aumentando a massa específica do briquete.

Analogamente ao subsistema de escolha da serragem, há dois tipos de óleo de frango: Óleo Visceral de Frango (OVF) e Óleo de Frango Assado (OFA). A escolha entre esses óleos depende do planejamento experimental, e sua massa varia em 25% do total de óleo empregado em um determinado experimento. É importante observar que a participação máxima do óleo na massa do briquete é de 20%, valor este obtido por meio de experimentos preliminares feitos previamente encontrando o momento em que ocorre a exsudação do óleo. Sendo uma extremidade 100% de OVF na mistura e na outra extremidade 100% de OFA. Dando assim 5 níveis distintos, conforme detalhes a seguir:

- a. 0% OVF e 100% de OFA (apenas OFA) [-2]
- b. 25% OVF e 75% de OFA (mistura 1) [-1]
- c. 50% OVF e 50% de OFA (mistura 2) [0]
- d. 75% OVF e 25% de OFA (mistura 3) [+1]
- e. 100% OVF e 0% de OFA (apenas OVF) [+2]

4.4.6 Subsistema da Fração Mássica

Neste subsistema, definimos a participação dos óleos de frango na massa do briquete. A proporção varia em cinco níveis definidos, em incrementos de 5%, começando em 0%. O teor máximo de óleo de frango a ser adicionado na composição do briquete é de 20%. Teores superiores a esse valor podem resultar na exsudação do óleo durante a etapa de briquetagem. Os cinco níveis de teor de óleo na massa do briquete que são:

- a. 0% de óleo e 100% de serragem (apenas serragem EG e/ou PE) [-2]
- b. 5% de óleo e 95% de serragem (mistura 1) [-1]
- c. 10% de óleo e 90% de serragem (mistura 2) [0]
- d. 15% de óleo e 85% de serragem (mistura 3) [+1]
- e. 20% de óleo e 80% de serragem (mistura 4) [+2]

4.5 CLASSIFICAÇÃO E TRATAMENTO DA MATÉRIA-PRIMA

No processo de obtenção das serragens e do pó de serra de EG e PE, Figura 4.3, as amostras foram ensacadas em sacos de rafia e armazenadas em um local protegido da umidade e das condições climáticas adversas. O único pré-tratamento realizado foi a remoção das maravalhas grosseiras por meio de peneiramento, e essas foram armazenadas para posterior trituração.

No caso dos óleos de frango, eles foram envasados em bombonas de 5 litros e deixados em repouso por 24 horas. Durante esse período, ocorreu a decantação, separando a parte líquida menos densa, que foi transferida para armazenamento em outro recipiente. Aparentemente,

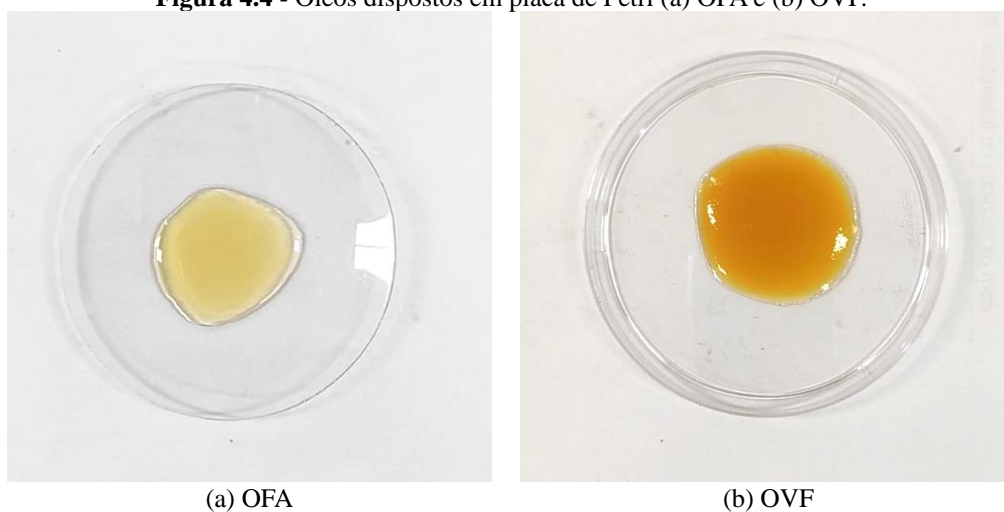
os dois óleos residuais de frango apresentam diferenças perceptíveis, como a coloração e a viscosidade, conforme ilustrado na Figura 4.4.

Figura 4.3 - Serragens de (a) *Eucalyptus grandis* (EG) e (b) *Pinus elliotti* (PE)



Fonte: O autor.

Figura 4.4 - Óleos dispostos em placa de Petri (a) OFA e (b) OVF.



Fonte: O autor.

Os dois tipos de óleos residuais de frango, nas mesmas condições, exibem diferenças que podem ser identificadas a olho nu. O OFA possui uma tonalidade amarelado mais claro, com código de cor HEX: #dac16a e RGB: 218, 193, 106. Em contraste, o OVF possui um tom de amarelo mais escuro, com código de cor HEX: #c8720b e RGB: 200, 114, 11. Quanto à viscosidade, observou-se que o OVF é bem mais viscoso, apresentando uma textura cremosa, em comparação com o OFA, que possui uma textura mais fluida. Essas características se mostraram mais relevantes durante o processo de pipetagem das amostras. Todas estas caracterizações foram obtidas utilizando softwares gratuitos de obtenção de colocação da imagem.

4.6 CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA

Após o tratamento prévio da matéria-prima, as amostras foram submetidas a diversas caracterizações, que incluem:

- i. Análise granulométrica;
- ii. Análise imediata da biomassa;
- iii. Determinação da massa específica;
- iv. Poder calorífico superior (PCS);
- v. Análise termogravimétrica (TGA).

A seguir é abordado detalhadamente cada uma destas caracterizações.

4.6.1 Análise Granulométrica

A análise granulométrica, também conhecida como granulometria, foi realizada utilizando peneiras Tyler, que permitem a separação dos sólidos em frações granulométricas distintas. Para a seleção das serragens a serem utilizadas, essas foram classificadas em faixas granulométricas usando as peneiras Tyler #4, #8, #16, #30, #50 e #100 mesh, cujo valor em micrômetro está na Tabela 4.4, respectivamente. Foi utilizado 100 g de serragem para facilitar os cálculos da distribuição.

A escolha destas faixas granulométricas baseou-se no fato de que a abertura de cada peneira é o dobro da peneira anterior, seguindo um padrão embasado na literatura científica. Mesmo havendo dois tipos de serragens, a faixa granulométrica foi mantida constante para um tratamento específico, a fim de evitar influências decorrentes de granulometrias diferentes.

A classificação granulométrica das serragens serviu para dois propósitos: (a) determinar a distribuição granulométrica e (b) separar a serragem em faixa granulométrica para seu uso nos experimentos. As peneiras utilizadas para esse processo estão listadas na Tabela 4.4. Na etapa de classificação granulométrica para obtenção de serragem por faixa granulométrica, era despejada a serragem no topo do conjunto de peneiras, conforme se observa na Figura 4.5.

Posteriormente, o conjunto era transferido para um agitador de peneiras granulométricas da marca Lucadema. Para a separação da matéria-prima destinada para a produção de briquetes, o procedimento era semelhante, no entanto a alimentação era realizada de forma intermitente. Após a conclusão da classificação, as amostras eram armazenadas em garrafas PET e

etiquetadas. Cada garrafa era devidamente rotulada com informações sobre a faixa granulométrica, o tipo de serragem utilizado e a data do armazenamento.

Figura 4.5 - Conjunto de (a) peneiras granulométricas e (b) agitador de peneiras.



(a)



(b)

Fonte: O autor.

Tabela 4.4 - Abertura das peneiras utilizadas

Ordem	Número da peneira Tyler (mesh)	Abertura da malha (μm)
1	#4	4800
2	#8	2400
3	#16	1200
4	#30	600
5	#50	300
6	#100	150
7	Fundo	< 150

Fonte: O autor.

Durante o processo, observou-se que a fração de finos, correspondente à granulometria que passava pela peneira Tyler de #30, não era suficiente para a fabricação dos briquetes. Para superar essa limitação, recorreu-se a um liquidificador industrial de inox com capacidade de quatro litros (4 L), da marca Metal Ferreira, para triturar as amostras e, posteriormente, classificá-las. Em uma escala industrial, é possível utilizar, além do liquidificador industrial, uma variedade de moinhos para triturar as serragens, obtendo assim a fração mais fina necessária para atender aos requisitos específicos. Uma alternativa é adquirir a serragem já com a

granulometria fina, embora isso acarrete custos adicionais ao processo. Essas adaptações foram fundamentais para garantir a qualidade e a adequação da matéria-prima às especificações exigidas na produção de briquetes.

4.6.2 Análise Imediata da Biomassa

Neste trabalho, foi empregada uma adaptação do Método de Lees (1980) e da norma ASTM E870-82 (2019) para realizar a análise imediata da biomassa. Foram coletadas 3 g (três gramas) das quatro matérias-primas já tratadas, em triplicata, em cadinhos de porcelana previamente calcinados a 540 °C por uma hora. O processo consistiu nas seguintes etapas:

- a) Teor de umidade → As amostras foram conduzidas para uma estufa previamente aquecida a 105 ± 1 °C por 24 horas. Após este período, a massa foi aferida para determinar a umidade de cada amostra, por meio da Equação 4.3 a seguir.

$$XBU (\%) = \frac{(m_{ai} - m_{as})}{m_{ai}} \cdot 100 \quad (4.3)$$

Em que: m_{ai} = massa da amostra inicial úmida, [g]; m_{as} = massa da amostra seca, [g].

- b) Teor de voláteis → A próxima etapa envolveu a determinação do teor de voláteis. No interior de uma capela, as amostras foram posicionadas em cadinho de porcelana sobre o bico de Bunsen e mantidas sobre o fogo até que toda a amostra fosse carbonizada, com atenção para evitar a combustão. Após a completa carbonização, os cadinhos foram transferidos para um dessecador para o resfriamento e, em seguida, a massa foi aferida. O teor de voláteis foi calculado utilizando a Equação 4.4:

$$T_V (\%) = \frac{(m_{ai} - m_{CF+CZ} - \frac{XBU}{100} \times m_{ai})}{m_{ai}} \cdot 100 \quad (4.4)$$

Em que: m_{CF+CZ} = Massa de Carbono Fixo somado com as cinzas, [g].

- c) Teor de cinzas → O teor de cinzas foi determinado de acordo com a adaptação das normas NBR 8112 e D1102. Os cadinhos da análise anterior foram colocados em um forno mufla a 710 °C por uma hora. Após este período, foram transferidos para dessecador até atingirem a temperatura ambiente, e então a massa foi aferida. O teor de cinzas foi calculado utilizando a Equação 4.5.

$$T_{CZ}(\%) = \frac{(m_{CZ})}{m_{ai}} \cdot 100 \quad (4.5)$$

Em que: m_{CZ} = Massa de cinzas, [g].

- d) Teor de carbono fixo → Por diferença, o teor de carbono fixo foi calculado seguindo a Equação 4.6.

$$T_{CF}(\%) = \frac{(m_{CF+CZ} - m_{CZ})}{m_{ai}} \cdot 100 \quad (4.6)$$

4.6.3 Determinação da Massa Específica

A massa específica das matérias-primas, bem como a do briquete, foi determinada utilizando os seguintes métodos:

- a) Massa específica dos óleos de frango OVF e OFA. → Por meio de uma proveta graduada de 100 mL, foi tarado o peso em uma balança analítica e, em seguida, adicionou-se 100 mL de cada óleo. A massa foi então aferida para determinar a massa específica, aplicando a Equação 4.7:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4.7)$$

- b) Massa específica das serragens.

A técnica de picnometria foi empregada para determinar a massa específica das serragens. A água destilada foi usada como solvente. Após a calibração do picnômetro com água destilada, a amostra foi adicionada e água destilada foi acrescentada até preencher cerca de dois terços do volume. As amostras foram armazenadas por 72 horas a fim de garantir que os poros da serragem fossem preenchidos. Após esse período, o picnômetro foi completado com água destilada até o limite.

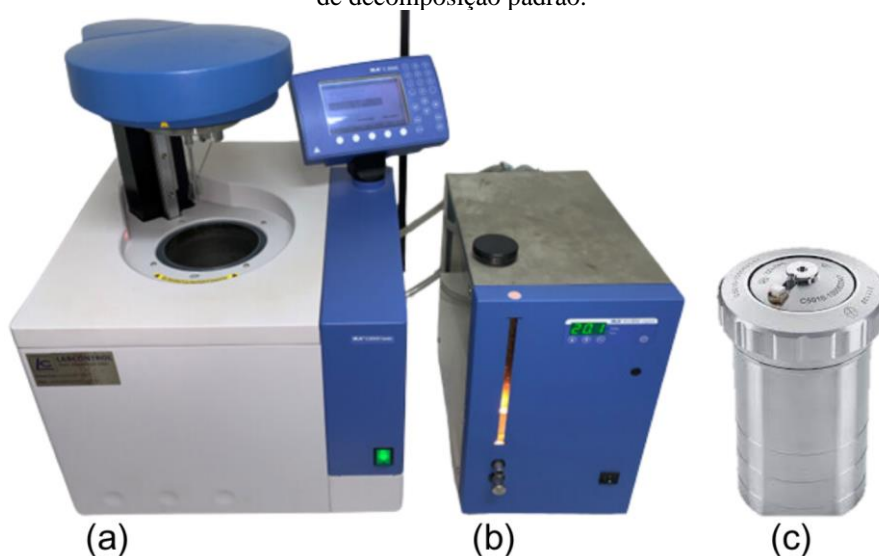
4.6.4 Poder Calorífico Superior (PCS)

A determinação do poder calorífico superior (PCS) envolveu o uso da bomba calorimétrica e equações empíricas com variáveis relacionadas à análise imediata. Detalham-se abaixo as duas formas de se obter o PCS:

a) Bomba calorimétrica →

Para a obtenção do PCS, foi utilizada a Bomba Calorimétrica da marca IKA (Figura 4.6), modelo IKA C2000, acoplada a um refrigerador IKA KV 600 e utilizando o calorímetro C 5010 Frasco de decomposição padrão. Em cada ensaio, uma faixa de 0,40 a 0,60 g de amostra seca, previamente mantida em estufa a 105 ± 1 °C por 24 horas e compactada, foi utilizada.

Figura 4.6 - Bomba Calorimétrica: (a) modelo IKA C2000; (b)refrigerador IKA KV 600; (c) calorímetro C 5010 Frasco de decomposição padrão.



Fonte: O autor.

A amostra foi colocada em cadinho, e um fio de algodão é amarrado ao fio condutor e colocado em contato com a amostra para que ocorra a combustão controlada. Posteriormente, foi montado todo o conjunto do calorímetro, rosqueando a tampa. Por se tratar de um recipiente adiabático, é essencial garantir a estanqueidade para que a pressão interna seja mantida e não ocorram perdas indesejadas de calor e massa.

Em seguida, o calorímetro foi acoplado no cabeçote da bomba calorimétrica. O próximo passo foi inserir os dados da massa da amostra e iniciar a programação automática. A primeira etapa da programação automática consistiu na injeção de oxigênio (O_2) a fim de retirar todo o ar atmosférico do recipiente contendo a amostra, mantendo a atmosfera interna com 100% de gás oxigênio sob pressão de 30 atm. Após isso, o reservatório foi preenchido com água para permitir a troca térmica durante a rotina.

Em seguida, a chave de ignição foi acionada automaticamente, elevando a temperatura instantaneamente até atingir a temperatura máxima. Após a estabilização da temperatura, o equipamento fez as leituras e em seguida seguiu a rotina de ejeção do calorímetro, apresentando os resultados da análise na tela. Posteriormente, todo o conjunto móvel foi removido,

a pressão interna do vaso de pressão foi aliviada e o calorímetro foi desmontado peça por peça. O equipamento foi então preparado para a próxima amostra.

Durante a manutenção de limpeza, não foi requerido aguardar a temperatura se ambientar, pois esta já se encontrava à temperatura ambiente. Este equipamento estava localizado na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR em Medianeira – PR.

b) Equações empíricas para poder calorífico superior (PCS) →

Para determinar o PCS por meio de equações empíricas, utilizou-se a Equação 4.8 devido à disponibilidade de dados de análise imediata e à sua eficiência comprovada na literatura. Essa equação foi previamente validada com base em cem diferentes biomassas, resultando em um baixo índice de erro, segundo os autores (PARIKH; CHANNIWALA; GHOSAL, 2005).

$$PCS = 35,36 \cdot T_{CF} + 15,59 \cdot T_V - 0,78 \cdot T_{CZ} \quad (4.8)$$

O teor de carbono fixo T_{CF} , teor de compostos voláteis T_V bem como o teor de cinzas T_{CZ} foram determinados na etapa de análise imediata dos resíduos.

Para converter o poder calorífico superior (PCS) de megajoules por quilograma ($MJ \cdot kg^{-1}$) para quilocalorias por quilograma ($kcal \cdot kg^{-1}$) usa-se a relação de conversão padrão, em que $1,000 MJ = 239,006 kcal$.

4.6.5 Análise Termogravimétrica (TGA)

A análise termogravimétrica (TGA) foi conduzida utilizando o equipamento TGA da Marca PerkinElmer, modelo STA-8000, com cadinhos de alumina, disponível no Bloco de Laboratórios Setor Sul – LATEC – UNILA-PTI. Para este ensaio, uma série de testes foi realizada para investigar o comportamento térmico das amostras, com ênfase na temperatura máxima de degradação. Abaixo, são detalhados os parâmetros do ensaio:

- a) Faixa de Temperatura: os ensaios foram conduzidos em uma faixa de temperatura de 25 a 700°C. Esta faixa foi determinada após experimentos exploratórios para identificar a temperatura na qual a mistura de serragem e óleo degradaria completamente, revelando que antes de atingir 700°C, não havia mais vestígios dos componentes.

- b) Razão de Aquecimento: uma taxa de aquecimento de 5°C por minuto foi aplicada durante todos os ensaios, permitindo uma análise precisa e sistemática das mudanças nas amostras durante o aquecimento.
- c) Atmosfera de Teste: Todos os ensaios de TGA foram realizados sob atmosfera de oxigênio a uma vazão de 20 mL/min, proporcionando um ambiente de combustão adequado para a avaliação detalhada da decomposição térmica das amostras.
- d) Quantidade de Amostra: Cada ensaio utilizou uma quantidade média de 15 mg de amostra, valor selecionado para garantir a quantidade suficiente de material nas análises, evitando sobrecarregar o sistema de análise e mantendo a padronização entre os ensaios.
- e) Composição da Amostra: Três composições diferentes de amostra foram investigadas: óleo puro, serragem de madeira misturada com óleo, e serragem de madeira pura. Isso permitiu a avaliação das propriedades térmicas e da interação entre os componentes em diferentes cenários.
- f) Preparação das Amostras: As amostras foram cuidadosamente preparadas e armazenadas em microtubos Eppendorf de 1,5 mL, abrangendo 27 amostras oriundas do planejamento experimental, além de uma mistura equitativa de 50% EG e PE (experimento 28) e quatro amostras das matérias-primas isoladas (numeradas de 29 a 32, sendo respectivamente EG, PE, OVF e OFA), conforme demonstrado na Figura 4.7.

Figura 4.7 - Amostras para TGA armazenadas em Microtubos Eppendorf. (a) 27 amostras do planejamento experimental; (b) 4 matérias-primas puras.



Fonte: O autor.

g) Análise dos Dados: Os dados obtidos durante os ensaios de TGA foram submetidos a análises gráficas detalhadas, incluindo a Termogravimetria Derivada (DTG), evidenciando os picos das variações de massa em relação à temperatura. As temperaturas associadas a cada evento térmico foram determinadas: a temperatura inicial (T_0), marcando o início da perda de massa; a temperatura de pico (T_p), correspondendo ao ponto de máxima taxa de perda de massa; e a temperatura final (T_e), indicando o encerramento do processo de perda de massa. Entre essas temperaturas foram calculadas as perdas de massa.

Os dados obtidos durante os ensaios de TGA foram submetidos a análises gráficas detalhadas e foi determinado a massa residual, as cinzas e comparado com as cinzas da metodologia da análise imediata a fim de corroborar os resultados.

4.7 PREPARO DAS MISTURAS

As matérias-primas selecionadas passaram por um processo de homogeneização e foram armazenadas em recipientes adequados para etapas subsequentes, seja para a briquetagem ou para análises físico-químicas. No caso da briquetagem, a massa total preparada foi de 40 g, e as misturas resultantes foram acondicionadas em recipientes cilíndricos plásticos. Já a massa misturada, contendo 8 g não compactada, foi destinada para as análises físico-químicas, como o PCS e TGA, uma vez que é exigido nestes ensaios uma pequena quantidade de amostra inferior a 600 mg.

Os detalhes de cada mistura são apresentados nos subitens a seguir, que descrevem os cálculos e o preparo dos briquetes, bem como das misturas não compactadas. Cada tipo de mistura segue as mesmas proporções, variando apenas a massa de cada componente.

4.7.1 Preparo dos Briquetes

Uma vez definido o planejamento experimental, o processo de preparo dos briquetes teve início com a mistura de cada experimento, seguindo as especificações do planejamento. A massa total utilizada em cada mistura foi de 40 g. Para codificar as combinações, foram utilizadas as Tabela 4.1, que apresentam as variáveis dos fatores (X_1 a X_4) e os cinco níveis combinada com a Tabela 4.2, que mostra o planejamento fatorial, e Tabela 4.3, que apresentam os pontos centrais e axiais.

No Quadro 4.1, é apresentado um exemplo como o tratamento 1 foi decodificado. Essa regra se aplica a todos os 27 tratamentos.

Quadro 4.1 – Decodificação dos tratamentos a partir do planejamento experimental definido.

Códigos:	
X_1 = Serragem (%);	X_3 = Óleo de frango (%);
X_2 = Classificação da serragem (mesh);	X_4 = Fração mássica (óleo%; serragem%).
Decodificando:	
X_1 = -1 (25% EG e 75% PE);	X_3 = -1 (25% OVF e 75% OFA);
X_2 = -1 (16 mesh) Granulometria das serragens;	X_4 = -1 (5% de óleo e 95% de serragem).
Calculando:	
25% de EG x 40g x 95% = 23,75% de EG x 40 g = 9,5 g de EG.	75% de PE x 40 g x 95% = 71,25% de PE x 40 g = 28,5 g de PE.
25% de OVF x 40g x 5% = 1,25% de OVF x 40 g = 0,5 g de OVF.	75% de OFA x 40 g x 5% = 3,75% de OFA x 40 g = 1,5 g de OFA.
Resultado:	
Massas: 9,5 g de EG + 28,5 g de PE + 0,5 g de OVF + 1,5 g de OFA = 40,0 g de mistura	
Fração mássica: 23,75% de EG + 71,25% de PE + 1,25% de OVF + 3,75% de OFA = 100,00% de mistura	

Fonte: O autor.

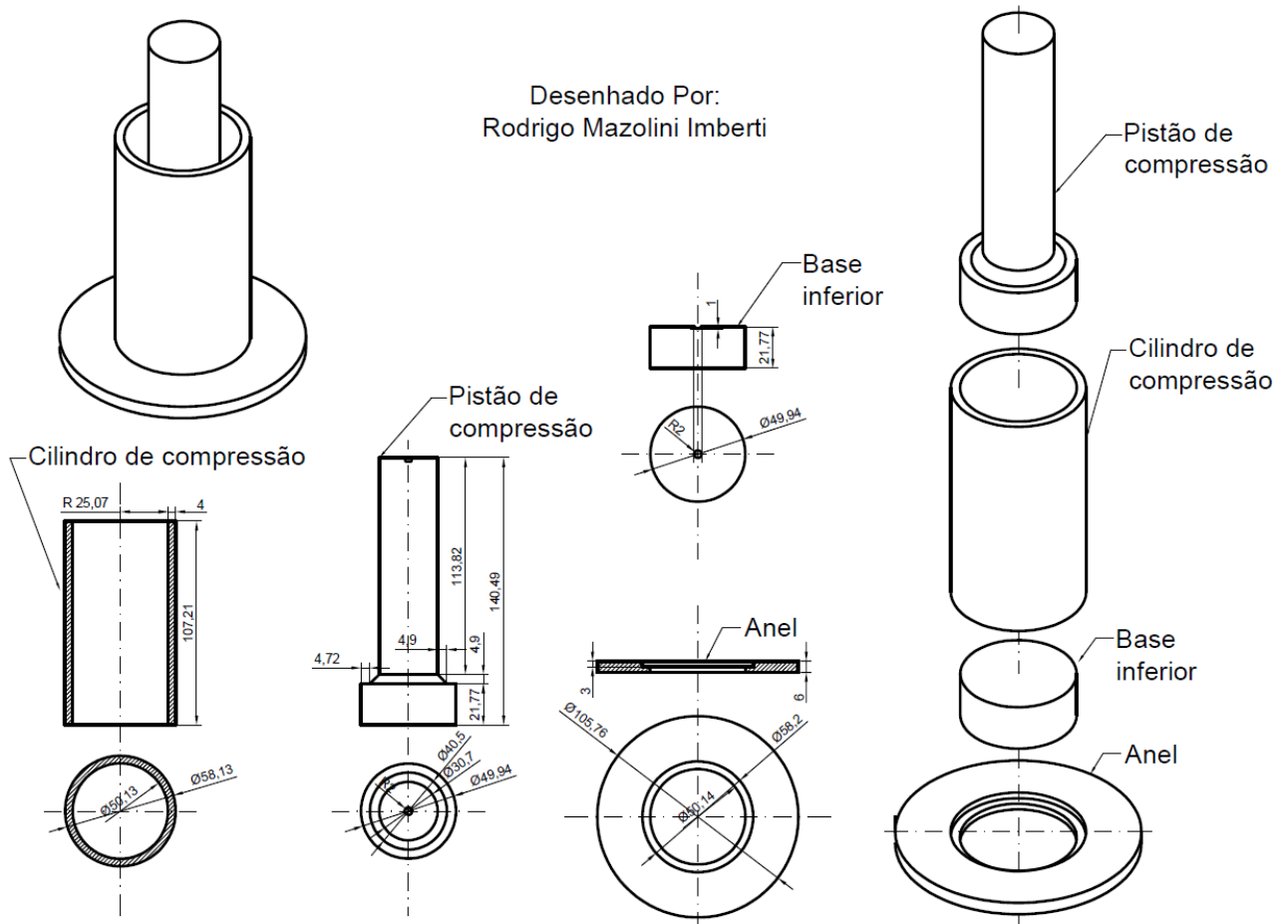
Para a fabricação dos briquetes, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Prensa hidráulica manual com capacidade de 15 toneladas, de modelo P15500 da marca BOVENAU, conforme representada na Figura 4.9(a).
- Briquetadeira customizada desenvolvida a partir de um tubo de ferro galvanizado, que serviu como cilindro ou bucha, com diâmetro interno de 50 mm. Um êmbolo com cursor acoplado de ferro galvanizado, base inferior cilíndrica e flange, conforme a Figura 4.8 e Figura 4.9(b e c).

Por meio de desenhos técnicos detalhados, apresentado na Figura 4.8 e complementado na Figura 4.9, são apresentados os componentes da briquetadeira experimental, acompanhados das dimensões por meio de cotas de cada peça e conjunto montado. Ao planejar a produção de briquetes, foi definida uma carga de 12 toneladas. Embora a capacidade do equipamento permitisse uma carga maior, essa decisão foi tomada por recomendações de segurança do equipamento.

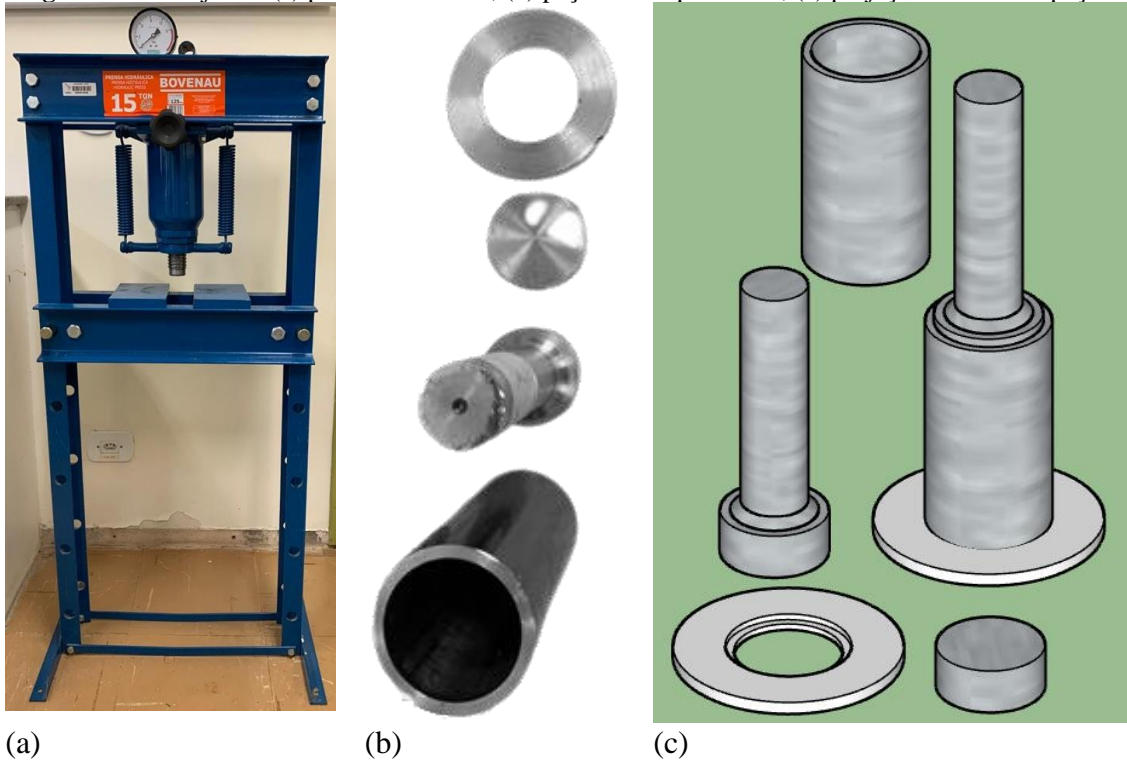
O projeto da briquetadeira em escala laboratorial foi desenvolvido por este autor, como mostrado na Figura 4.8 em vistas ortográficas e em perspectiva isométrica, acompanhado das cotas dimensionais de cada peça. Após a finalização do projeto, o tubo e o cilindro de ferro galvanizado foram selecionados e encaminhados para a produção.

Figura 4.8 - Desenho técnico da briquetadeira em vistas ortográficas e perspectiva isométrica.



Fonte: O autor.

Figura 4.9 - Conjunto: (a) prensa hidráulica; (b) peças da briquetadeira; (c) projeção em 3D das peças.



Fonte: O autor.

Para determinar a correlação entre a pressão exercida sobre a massa no interior da briquetadeira com a carga aplicada, aplicou-se a Equação 4.9.

$$P = \frac{F}{A_s} = \frac{Carga}{\pi \cdot r^2} = \frac{Carga (kgf)}{\pi \cdot (5/2 \text{ cm})^2} \quad (4.9)$$

Em que P é a pressão em $\text{kgf} \cdot \text{cm}^{-2}$, F a força em N e A_s é a área superficial em m^2 . Aplicando-se a equação com a carga constante de 12.000 kgf obtém-se a pressão de:

$$P = \frac{12000 \text{ kgf}}{\pi \cdot (2,5 \text{ cm})^2} = 611,155 \text{ kgf/cm}^2$$

Sabendo que $1 \text{ kgf/cm}^2 = 0,0980665 \text{ MPa}$, então: $P = 59,934 \text{ MPa}$.

Para a produção do briquete, optou-se por não aquecer a matéria-prima. Esta escolha teve como objetivo economizar energia e, conseqüentemente, reduzir os custos de produção em grande escala, uma vez que estas etapas adicionais tornariam o processo mais oneroso, tanto na implementação tecnológica, quanto em gasto energético.

Na Figura 4.9 é visto em (a) a prensa hidráulica utilizada para a prensagem da biomassa para fabricação dos briquetes, em (b) a foto das peças que compõem a briquetadeira e em (c) a representação gráfica virtual das peças em três dimensões (3D) em perspectiva cônica. A montagem do conjunto envolveu a colocação do anel na plataforma da prensa hidráulica, seguida da base inferior, do cilindro de compressão encaixado no anel e base inferior. Depois desta montagem a câmara foi preenchida com a biomassa a ser comprimida e encaixado o pistão de compressão. Aplicou-se a carga da prensa hidráulica sobre o pistão até atingir o valor de 12 toneladas e manteve-se por 3 min a fim de manter um padrão na produção. Posteriormente, aliviou-se a carga e desenformou-se o briquete.

Com base na fração mássica de cada briquete, procedeu-se a produção dos corpos de prova de 40,0 g e organizou-se os experimentos de acordo com a Tabela 4.5 ordenando-os crescentemente de acordo com a fração mássica de EG. É importante ressaltar que as granulometrias das serragens foram iguais, conforme designado em cada experimento.

Na última coluna na Tabela 4.5, apresenta-se a porcentagem mássica dos óleos totais de frango combinado no briquete, ou seja, é a soma dos dois óleos empregados. Observa-se que a ordem dos experimentos não é sequencial, o que garante aleatoriedade na execução, contribuindo posteriormente para a análise estatística.

Tabela 4.5 – Distribuição dos 27 experimentos a 40,0 g

Exp.	serragens Mesh	EG m (g)	PE m (g)	OVF m (g)	OFA m (g)	SOMA m (g)	Óleos totais (%)
20	30	0,0	36,0	2,0	2,0	40,0	10,0%
9	16	8,5	25,5	1,5	4,5	40,0	15,0%
13	16	8,5	25,5	4,5	1,5	40,0	15,0%
11	50	8,5	25,5	1,5	4,5	40,0	15,0%
15	50	8,5	25,5	4,5	1,5	40,0	15,0%
1	16	9,5	28,5	0,5	1,5	40,0	5,0%
5	16	9,5	28,5	1,5	0,5	40,0	5,0%
3	50	9,5	28,5	0,5	1,5	40,0	5,0%
7	50	9,5	28,5	1,5	0,5	40,0	5,0%
27	30	16,0	16,0	4,0	4,0	40,0	20,0%
22	8	18,0	18,0	2,0	2,0	40,0	10,0%
24	30	18,0	18,0	0,0	4,0	40,0	10,0%
17	30	18,0	18,0	2,0	2,0	40,0	10,0%
18	30	18,0	18,0	2,0	2,0	40,0	10,0%
19	30	18,0	18,0	2,0	2,0	40,0	10,0%
25	30	18,0	18,0	4,0	0,0	40,0	10,0%
23	100	18,0	18,0	2,0	2,0	40,0	10,0%
26	30	20,0	20,0	0,0	0,0	40,0	0,0%
10	16	25,5	8,5	1,5	4,5	40,0	15,0%
14	16	25,5	8,5	4,5	1,5	40,0	15,0%
12	50	25,5	8,5	1,5	4,5	40,0	15,0%
16	50	25,5	8,5	4,5	1,5	40,0	15,0%
2	16	28,5	9,5	0,5	1,5	40,0	5,0%
6	16	28,5	9,5	1,5	0,5	40,0	5,0%
4	50	28,5	9,5	0,5	1,5	40,0	5,0%
8	50	28,5	9,5	1,5	0,5	40,0	5,0%
21	30	36,0	0,0	2,0	2,0	40,0	10,0%

Fonte: O autor.

4.7.2 Preparo de Amostras não Compactadas

Seguindo o mesmo princípio das misturas abordado na seção anterior, 4.7.1, sobre o preparo dos briquetes com 40,0 g de massa, preparou-se amostras não compactadas com oito gramas (8,0 g) de massa. Estas amostras foram reservadas e não submetidas ao processo de briquetagem, sendo destinadas a determinação do poder calorífico superior (PCS) e Análise Termogravimétrica (TGA), que serão abordados nas seções seguintes.

As misturas foram armazenadas em recipientes cúbicos de acrílico com capacidade para 125 cm³, conforme a fotografia na Figura 4.10. A escolha destes recipientes levou em consideração a praticidade para armazenamento, transporte e o baixo custo associado a eles.

Figura 4.10 - Amostras homogeneizadas de 8,0 g.



Fonte: O autor.

4.8 CARACTERIZAÇÃO DOS BRIQUETES E MISTURAS

Assim como ocorreu com as caracterizações da matéria-prima tratada (biomassa), também foram realizadas caracterizações dos briquetes e das misturas não compactadas. Algumas dessas caracterizações foram semelhantes às da biomassa pura como: i – poder calorífico superior (PCS) e ii – análise termogravimétrica (TGA). As demais caracterizações serão detalhadas nas seções a seguir.

4.8.1 Análise Imediata dos Briquetes.

Análise imediata dos briquetes foi estimada por meio de cálculos, utilizando os valores obtidos das biomassas puras. O cálculo consiste na soma do produto de cada teor (umidade, cinzas, voláteis e carbono fixo) pela fração mássica correspondente. A equação genérica aplicada para o cálculo de estimativa dos 27 experimentos é apresentada na Equação 4.10.

$$T_{x.Briq\%} = T_{x.EG\%} \cdot m_{EG\%} + T_{x.PE\%} \cdot m_{PE\%} + T_{x.OVF\%} \cdot m_{OVF\%} + T_{x.OFA\%} \cdot m_{OFA\%} \quad (4.10)$$

Em que: $T_{x.Briq\%}$ é o teor do elemento no: $Briq\%$ = briquete; $EG\%$; $PE\%$; $OVF\%$ e $OFA\%$.

$m_{EG\%}$ é a fração mássica de: $EG\%$; $PE\%$; $OVF\%$ e $OFA\%$.

Tanto os teores quanto as frações mássicas estão expressos em porcentagem, totalizando 100% quando somados. A partir da Equação 4.10, derivam-se equações específicas para cada teor que se deseja calcular.

4.8.2 Determinação da Massa Específica dos Briquetes

A massa específica dos briquetes é do tipo aparente. Após a confecção dos briquetes, eles foram mensurados com o auxílio de um paquímetro digital, e sua massa foi aferida para estimar o volume e a massa específica aparente. A Equação 4.11 foi aplicada, considerando que, quando os briquetes apresentam topos chanfrados, mede-se as duas alturas, a menor h_{menor} e a maior h_{maior} , tratando o briquete como um tronco de cilindro, em que r representa o raio.

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{\pi \cdot r^2 \cdot \frac{h_{maior} + h_{menor}}{2}} \quad (4.11)$$

4.8.3 Análise de Custos dos Briquetes

Inicia-se com a obtenção dos custos das matérias-primas e suas respectivas massas específicas. Para uniformizar os custos e permitir comparações internacionais, todos os valores foram convertidos de reais brasileiros (BRL) para dólares americanos (USD), utilizando a taxa de câmbio de 1 USD = 5 BRL.

Os custos por tonelada de cada matéria-prima foram calculados considerando a densidade (ρ) e os custos por metro cúbico (BRL/m^3 e USD/m^3). Para a conversão de custos de volume para massa foi utilizada a (4.12):

$$\text{Custo}_t(\text{BRL}/t) = \frac{\text{Custo}_{m^3}(\text{BRL}/m^3)}{\rho(\text{kg}/m^3)} \times 1000 \quad (4.12)$$

Em que:

$\text{Custo}_t(\text{BRL}/t) \rightarrow$ custo da matéria-prima em toneladas.

$\text{Custo}_{m^3}(m^3) \rightarrow$ custo da matéria-prima em toneladas.

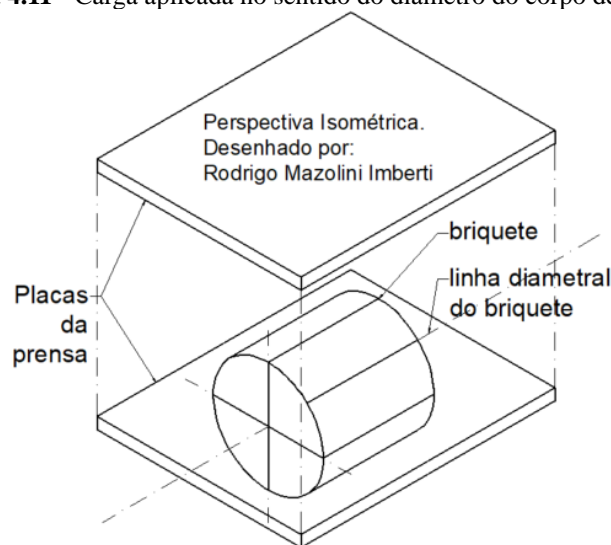
$\rho(\text{kg}/m^3) \rightarrow$ massa específica da matéria-prima.

Avaliações econômicas foram conduzidas para determinar o impacto relativo de cada matéria-prima no custo total de produção dos briquetes. Considerou-se que os custos dos óleos poderiam representar a maior parte do custo total, enquanto as serragens teriam um impacto relativamente menor. Não foram incluídos na análise os custos de mão de obra, transporte e outros gastos adicionais, focando exclusivamente nos custos das matérias-primas. A análise foi realizada de forma a facilitar a comparação com outras produções ao redor do mundo.

4.8.4 Resistência Mecânica

Os ensaios de resistência mecânica propostos foram conduzidos em conformidade com as normas técnicas ASTM D2166/D2166M e ISO 17894, que estabelecem diretrizes para a determinação das propriedades mecânicas de materiais particulados, incluindo briquetes. Cada briquete foi posicionado de modo que a máquina tangenciasse a lateral do cilindro circular (diametralmente), representando o ponto mais frágil do corpo de prova, conforme ilustrado na Figura 4.11.

Figura 4.11 - Carga aplicada no sentido do diâmetro do corpo de prova.



Fonte: O autor.

O ensaio de compressão foi realizado na máquina SM100 UNIVERSAL MATERIAL TESTING MACHINE CAP. 100 kN (10 t) da TQ, equipada com um monitor DL1 DIGITAL LOAD METER (Figura 4.12). Este ensaio teve como objetivo determinar a resistência mecânica dos briquetes por meio da aplicação de carga até sua desintegração.

Figura 4.12 - máquina SM100 UNIVERSAL MATERIAL TESTING MACHINE CAP. 100 kN (10 t) da TQ



Fonte: O autor

Durante o ensaio, uma carga foi aplicada progressivamente até a ruptura do briquete, momento no qual a carga máxima aplicada era registrada. As leituras de força foram realizadas em Newtons (N) e os valores correspondentes anotados para cada experimento.

4.8.5 Vida Útil

A avaliação da vida útil dos briquetes foi realizada para determinar a durabilidade e estabilidade física ao longo do tempo. Esta avaliação consistiu em medições e observações em cinco momentos distintos: imediatamente após a produção, designada como tempo zero (t_0), três meses (t_3), dez meses (t_{10}), quinze meses (t_{15}) e dezoito meses (t_{18}) de armazenamento.

- a) Medição inicial (t_0): após a produção dos briquetes, foram realizadas medições iniciais para registrar as dimensões e características físicas. Foram medidas as dimensões geométricas, incluindo diâmetro, altura e forma. Além disso, foram observadas quaisquer rachaduras, desfragmentação ou outras falhas evidentes nos briquetes.
- b) Medição após três meses (t_3): após um período de armazenamento de três meses em condições controladas, os briquetes foram novamente avaliados. As mesmas medições e observações realizadas no tempo zero foram repetidas para verificar possíveis alterações nas dimensões e na integridade física dos briquetes. Qualquer evidência de deterioração ou fragilização foi cuidadosamente registrada.

- c) Medição após dez (t10): após um período adicional de sete meses de armazenamento, os briquetes foram submetidos a uma terceira rodada de medições e observações. O objetivo era acompanhar a evolução das características físicas e identificar qualquer degradação adicional.
- d) Medição após quinze meses (t15): após quinze meses de armazenamento, foram realizadas novas medições e observações para monitorar mudanças nas características físicas dos briquetes.
- e) Medição após dezoito meses (t18): Após dezoito meses de armazenamento, os briquetes foram avaliados pela última vez para determinar a extensão da deterioração e fragilização ao longo do período de armazenamento.

Durante todas as medições em cada período, foram observados os seguintes aspectos:

- Dimensões Geométricas: Medição do diâmetro, altura e forma dos briquetes, comparando com as medições anteriores para identificar possíveis alterações significativas.
- Integridade Física: Verificação de rachaduras, desfragmentação, quebras ou outras falhas estruturais nos briquetes. Qualquer mudança foi registrada.
- Fragilização: Observação de sinais de fragilização, como a presença de poeira ou fragmentos soltos na superfície dos briquetes.
- Expansão ou Contração: Avaliação de qualquer expansão ou contração dos briquetes ao longo do período de armazenamento.

Todas as medições e observações foram registradas de forma sistemática e documentadas em tabelas e relatórios. Qualquer alteração significativa nas dimensões ou integridade física dos briquetes foi cuidadosamente analisada e interpretada. Esse procedimento permitiu uma avaliação empírica da durabilidade e vida útil dos briquetes, fornecendo informações valiosas sobre seu desempenho ao longo do tempo.

4.9 ANÁLISE DOS DADOS

Para avaliar a eficiência das experiências, realizou-se uma análise estatística abrangente, utilizando a análise de variância (ANOVA) e o teste de comparação de médias, conhecido como teste Tukey, adotando-se um nível de confiança de 95%. Os resultados foram considerados significativos quando o p-valor foi menor que 5 centésimos ($p < 0,05$).

A análise estatística incluiu as seguintes variáveis:

- Poder Calorífico Superior (PCS)

- Resistência Mecânica (medida pela força aplicada)
- Variação da Massa Específica ($\Delta\rho$ %)
- Variação da Densidade Energética (ΔDE %)
- Teor de Cinzas obtido na termogravimetria (TG)
- Granulometria em Mesh
- Fração Mássica de Cada Matéria-Prima
- Fração Mássica Total de Óleos

As análises foram conduzidas utilizando softwares estatísticos específicos, garantindo rigor e precisão nos resultados. A análise focou em identificar quais variáveis tinham impacto significativo na eficiência dos briquetes. As variáveis foram organizadas e comparadas utilizando tabelas de correlação, que apresentavam os valores de p abaixo da diagonal e os coeficientes de correlação (r) acima da diagonal. Essas tabelas foram essenciais para visualizar e interpretar as inter-relações entre as variáveis. Dados significativos ($p < 0,05$) foram destacados em vermelho para facilitar a identificação de resultados importantes.

4.10 OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (ODS)

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) são uma agenda global adotada pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 2015, composta por 17 objetivos (Figura 4.13) e 169 metas, que visam promover o desenvolvimento sustentável em diversas dimensões, como a erradicação da pobreza, a proteção do meio ambiente e a garantia da paz e da justiça para todos até 2030. Para mais informações, consulte o portal do governo brasileiro sobre os ODS (NAÇÕES UNIDAS, 2024).

Figura 4.13 - 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas.



Fonte: (NAÇÕES UNIDAS, 2024)

Para a seleção dos ODS, utilizou-se os seguintes princípios:

- a) **Sustentabilidade e Eficiência de Recursos:** Buscamos ODS que enfatizem a sustentabilidade, o uso eficiente de recursos naturais e a promoção de energias renováveis. A seleção dos ODS foi direcionada para aqueles que apoiam a transição para práticas mais sustentáveis na geração de energia e na gestão de resíduos. Este enfoque está alinhado com o processo de densificação adotado nesta pesquisa, que agregou valor a resíduos frequentemente subutilizados, contribuindo para a mitigação de problemas ambientais relacionados ao descarte inadequado e ausência de tratamento desses resíduos, em consonância com princípios de sustentabilidade e responsabilidade ambiental.
- b) **Aproveitamento de Resíduos:** Um critério essencial foi a relevância dos ODS para a abordagem de aproveitamento de resíduos adotada nesta pesquisa. A metodologia empregada enfatiza a importância de utilizar os resíduos de biomassa de maneira sustentável, evitando a extração adicional de recursos naturais e promovendo uma economia circular.

CAPÍTULO 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta pesquisa busca estabelecer um padrão viável para a produção de briquetes, permitindo sua reprodução em qualquer quantidade de material, respeitando a proporção de massa de cada componente. O objetivo principal é promover a sustentabilidade, oferecendo uma destinação nobre para os resíduos agrícolas, que ainda representam um problema ambiental significativo.

A literatura existente sobre o processo de densificação de resíduos agrícolas é escassa, evidenciando a necessidade de mais pesquisas e ensaios para desenvolver artefatos com alta eficiência energética. Esses artefatos devem proporcionar economia de energia na produção, manejo, rendimento e sustentabilidade, além de serem economicamente viáveis. Uma abordagem promissora é a utilização de misturas de diferentes resíduos orgânicos, destacando, principalmente, resíduos provenientes de culturas do Oeste do Paraná e os países fronteiriços (Argentina e Paraguai), beneficiando diretamente a região onde se encontra a UNILA.

Estudos sobre a densificação por meio de misturas ainda são limitados, apresentando oportunidades para a exploração de novos produtos inovadores no mercado. O processo de densificação utilizando combinação de resíduos demonstra-se promissor e inovador, contribuindo para a cultura de reaproveitamento de resíduos. Isso é crucial, pois resíduos descartados diretamente no solo podem causar danos, alterando o pH do solo.

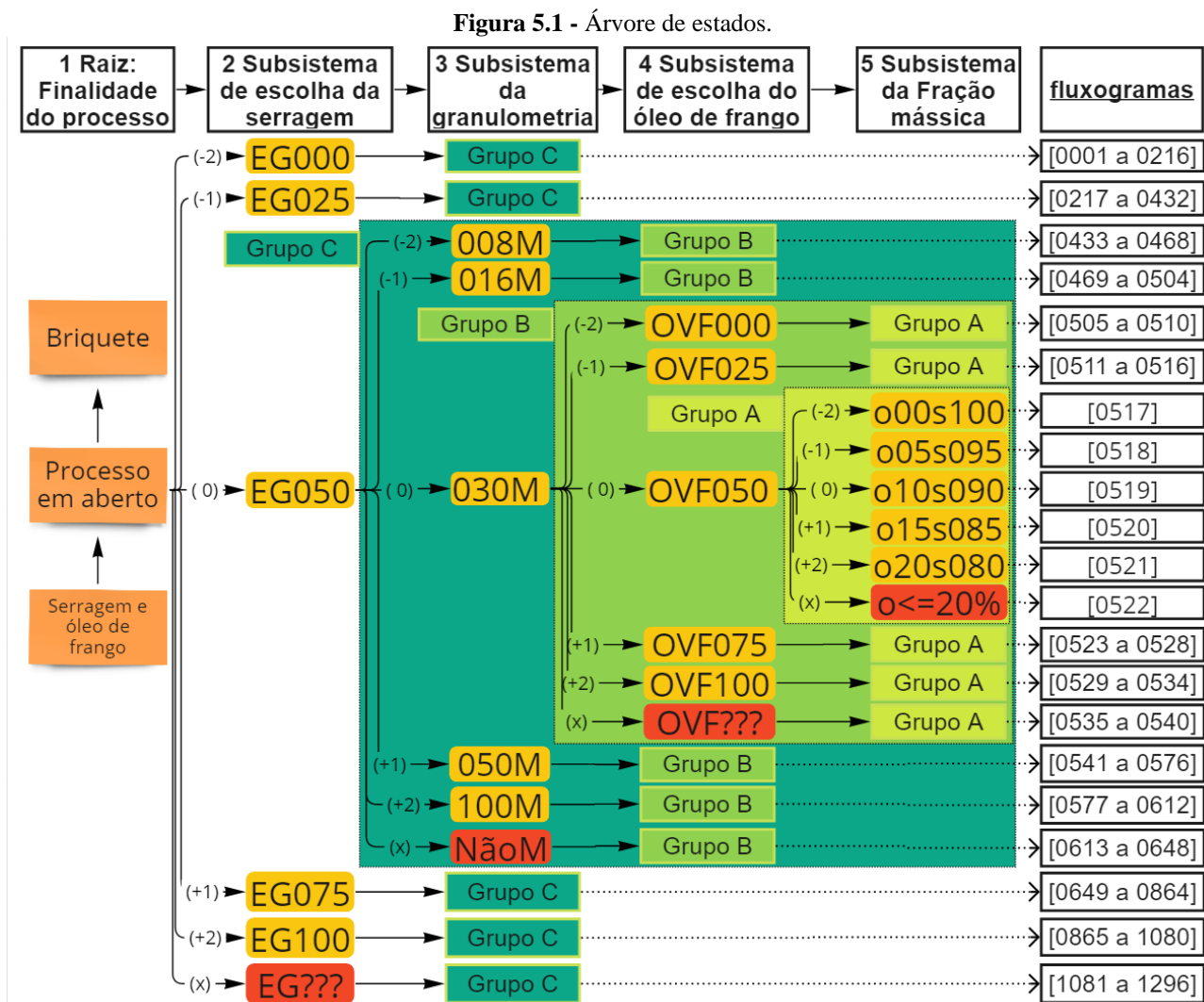
A Tese apresenta duas seções cruciais, a 5.1 e a 5.2, que exploram em detalhe as técnicas e metodologias utilizadas no desenvolvimento dos briquetes. A Seção 5.1 aborda a Árvore de Estados, enfatizando a importância de um planejamento experimental eficiente. Esta seção detalha o processo de seleção de 27 experimentos essenciais de um total de 1.296 possíveis, demonstrando como essa abordagem economiza recursos e assegura a eficácia dos experimentos. A Seção 5.2, por sua vez, foca nas 'Regras Heurísticas e Fluxograma Base'. Ela destaca a relevância de experiências acumuladas e princípios práticos para a tomada de decisões em cada etapa do processo. A aplicação dessas regras em cada subsistema otimiza a seleção e identifica as soluções mais promissoras. Essa abordagem contribui significativamente para o campo da energia renovável e manejo de resíduos agrícolas ao desenvolver briquetes sustentáveis e eficientes.

5.1 ÁRVORE DE ESTADOS

Para a construção da árvore de estados, apresentada na Figura 5.1, verificou-se as várias rotas possíveis considerando as quatro variáveis selecionadas totalizando 1.296 fluxogramas.

Por questões de disposição de espaço, optou-se por mostrar a árvore de estado parcialmente expandida, mesclando alguns fluxogramas, pois repete-se o mesmo padrão logo após o 2º subsistema da escolha da serragem, em que posteriormente há exatamente 216 fluxogramas.

Observa-se ainda que após o 3º subsistema da granulometria da serragem há 36 fluxogramas em que se repete o mesmo padrão e no 4º subsistema de escolha do óleo de frango há 6 fluxogramas que seguem o mesmo padrão expresso nos fluxogramas [0517] ao [0522] respectivamente.



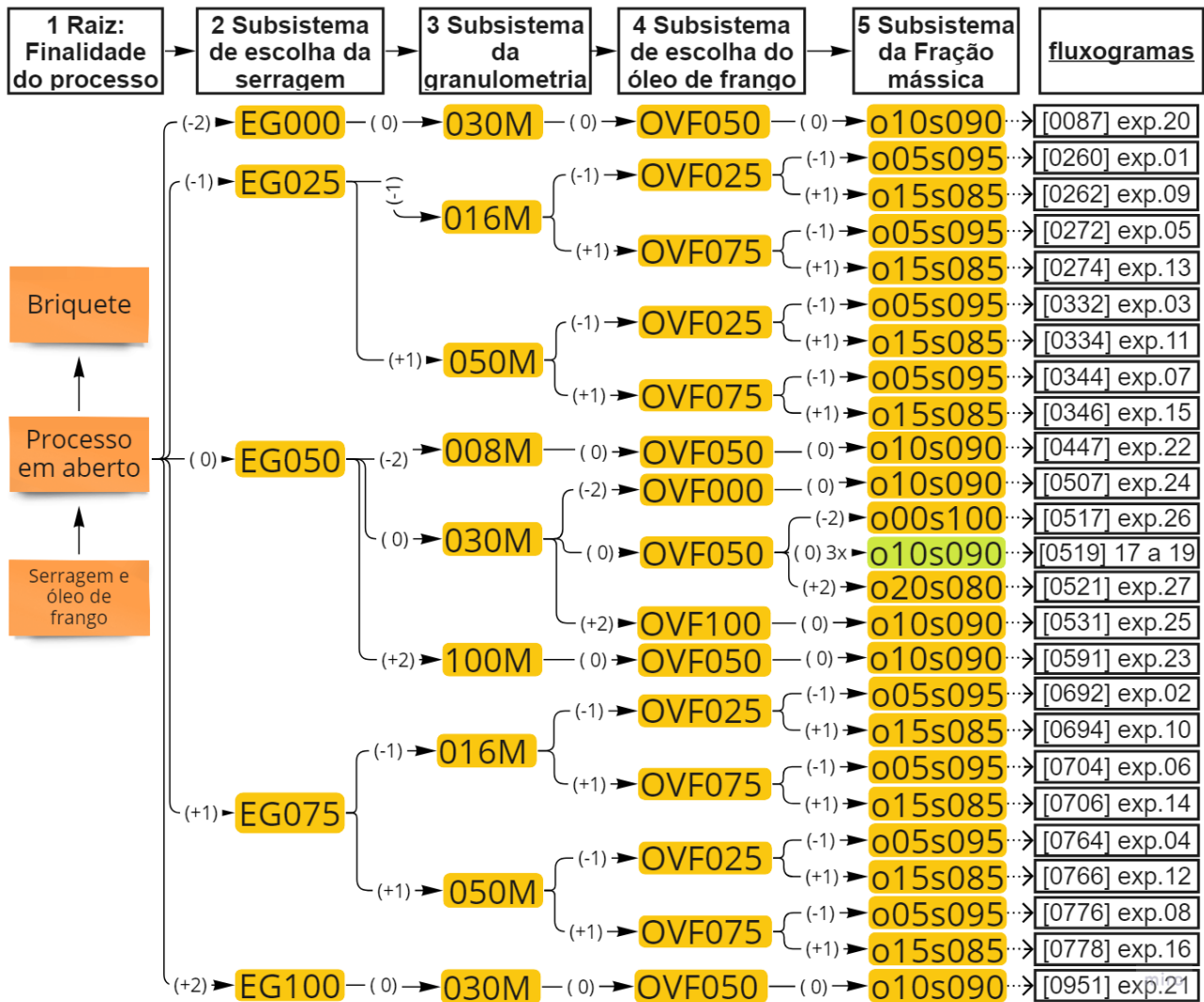
Nota: Números entre parênteses são os códigos indicando níveis variando de -2 a +2 e um nível extra (Não). Números entre colchetes representam os fluxogramas.

Fonte: O autor.

Dado o planejamento experimental, foram definidos 27 experimentos, conforme a Figura 5.2, dentre as 1.296 possibilidades existentes, observando que o fluxograma da Árvore de estado [0519] foi triplicado por se tratar do Ponto Central, então houve a aplicação de 25 fluxogramas mais duas repetições do ponto central totalizando os 27 experimentos. Esta redução se

dá, pois, a luz da estatística, estes 27 experimentos são bem representados diminuindo o tempo de experimentação e uso de matéria-prima.

Figura 5.2 - Os 27 fluxogramas para experimentos.



Fonte: O autor.

5.2 REGRAS HEURÍSTICAS E FLUXOGRAMA BASE

As regras heurísticas são compiladas a partir de regras práticas baseadas em experiências acumuladas de desenvolvimento de projetos, tanto individuais quanto coletivos e fundamentadas em literatura científica. Essas regras são aplicadas a cada subsistema, ou estado, iniciando na raiz do problema. Elas são particularmente eficazes em situações que evoluem de um estado para outro, resultando em um fluxograma único e detalhado para análise. A solução resultante, embora não necessariamente ótima, é considerada a mais promissora com base na qualidade das regras aplicadas (PERLINGEIRO, 2005). Portanto, foram criadas para cada

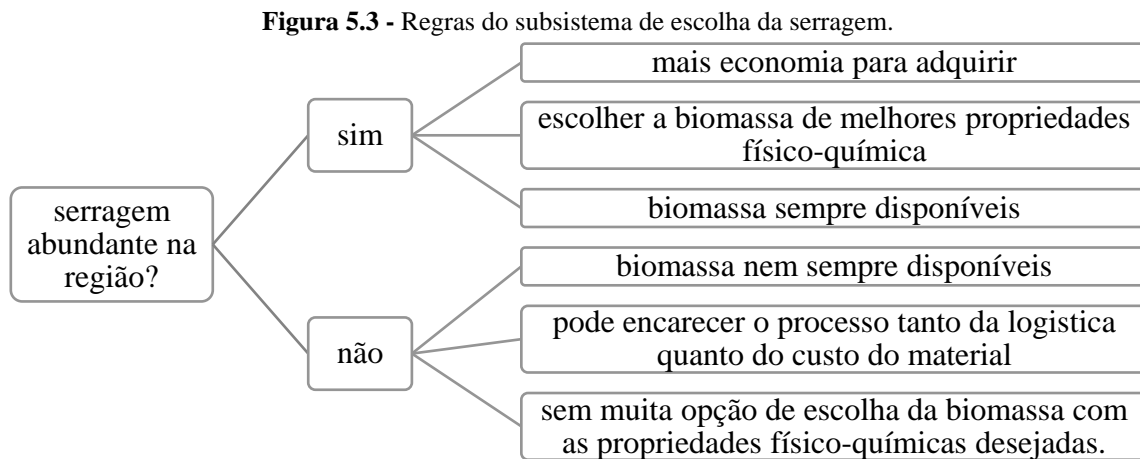
subsistema envolvendo regras heurísticas com o objetivo de otimizar a árvore de decisão, identificar o ramo promissor, vizinhos estruturais e o fluxograma promissor.

5.2.1 Subsistema de Escolha da Serragem

Este subsistema foi regido por duas regras principais detalhadas na Figura 5.3.

1ª regra → **Priorização de Serragens Locais:** foca em usar serragens locais, buscando praticidade e economia, mesmo que não atendam completamente aos critérios qualidade.

2ª regra → **Seleção Baseada em Qualidade de Serragem:** Enfatiza a escolha de serragens com propriedades ótimas para a fabricação de briquetes, priorizando a qualidade acima do custo e disponibilidade local.



Fonte: O autor.

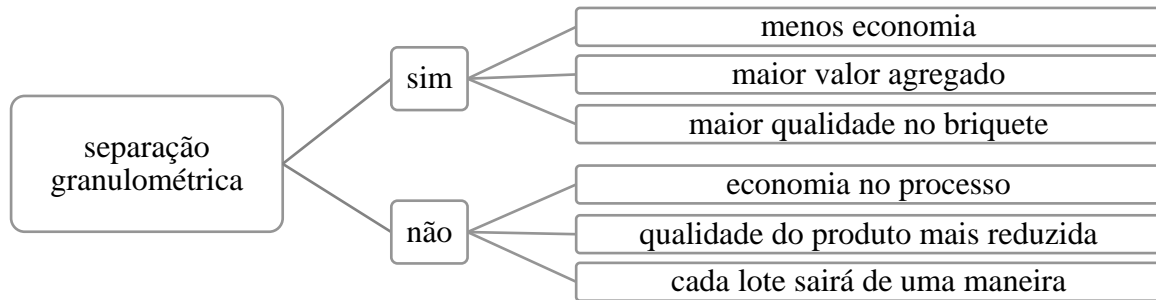
5.2.2 Subsistema da Granulometria da Serragem

A eficiência do subsistema de granulometria da serragem foi assegurada por duas regras fundamentais, detalhadas na Figura 5.4, que direcionaram a escolha entre qualidade e economia no processo:

1ª regra → **Classificação de Serragens por Granulometria:** enfatiza a separação meticulosa da serragem em diferentes granulometrias para assegurar consistência e qualidade superior nos briquetes, focando em uniformidade e desempenho do produto.

2ª regra → **Economia no Processo de Serragem:** propõe a não separação por granulometria, visando reduzir custos e simplificar o processo de fabricação dos briquetes, mesmo que isso possa resultar em variações na qualidade do produto.

Figura 5.4 - Regras do subsistema de escolha da granulometria da serragem.



Fonte: O autor.

5.2.3 Subsistema da Escolha do Óleo de Frango (Aglutinante)

Quatro regras definiram este subsistema, detalhadas na Figura 5.5.

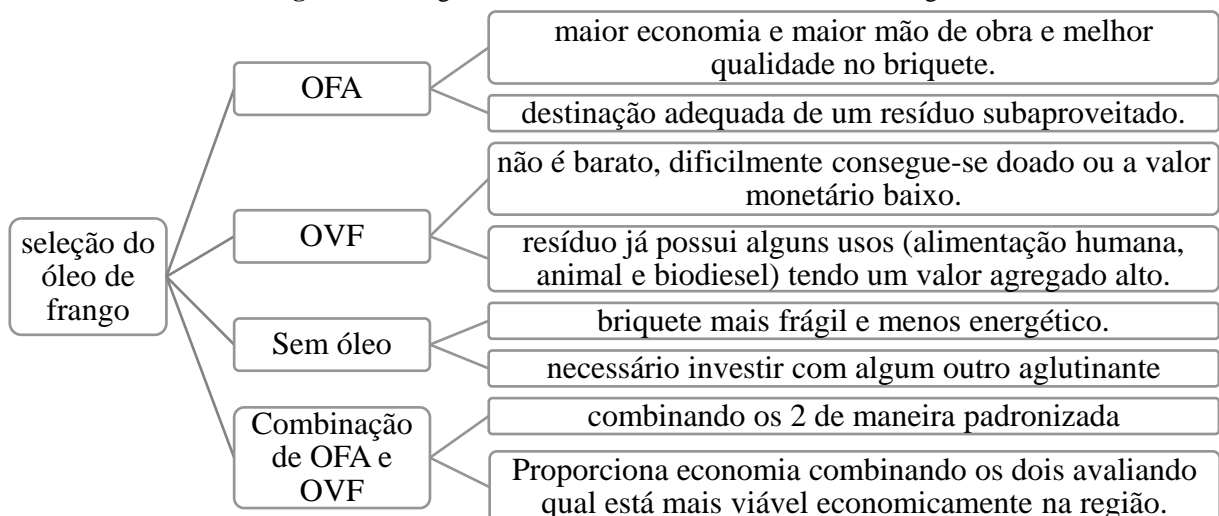
1ª regra → Coleta OFA de Mercados Locais: aumentando a mão de obra para coleta, mas evitando deslocamentos para indústrias de abate.

2ª regra → Aquisição de OFV de Indústrias de Abate De Frango: minimizando a mão de obra, apesar de possíveis custos associados.

3ª regra → Combinar o OVF e OFA: para equilibrar economia, qualidade e padronização do produto.

4ª regra → Não utilizar Óleo de Frango algum: apesar de diminuir a mão de obra, os briquetes apenas de serragem vão carecer de algum elemento aglutinante e rico energeticamente.

Figura 5.5 - Regras do subsistema de escolha do óleo de frango.



Fonte: O autor.

5.2.4 Subsistema da Fração Mássica

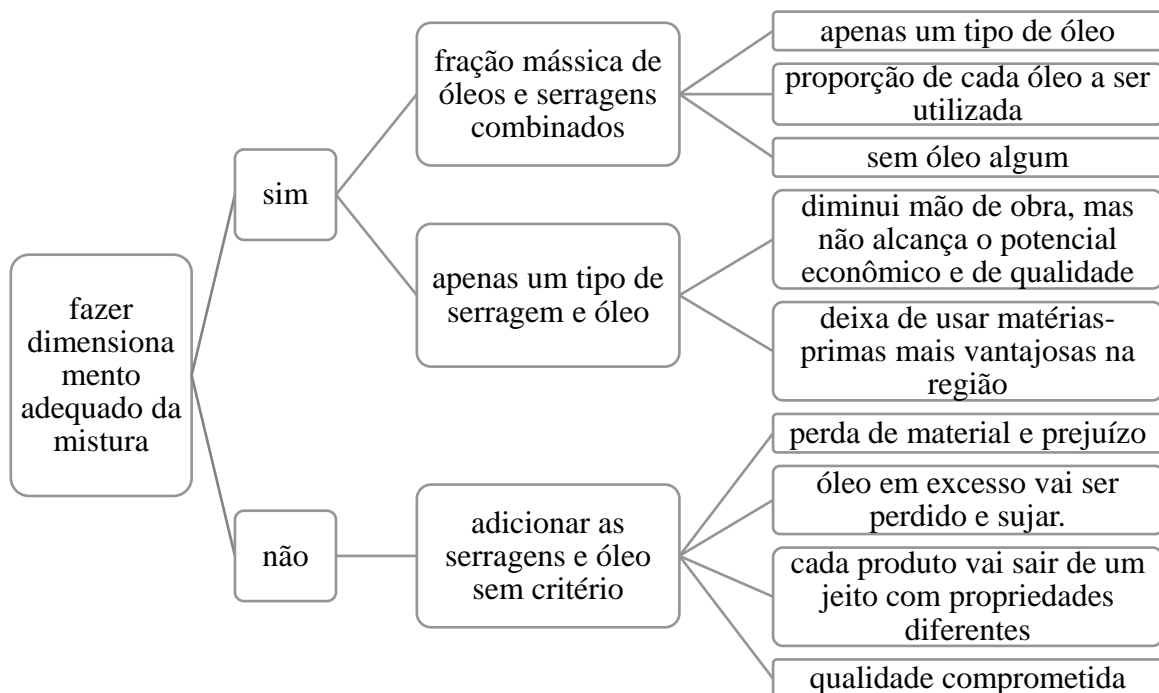
Foram definidas três regras as quais estão detalhadas na Figura 5.6.

1ª regra → Otimização da Proporção de Serragem e Óleo: Enfatiza a importância de ajustar precisamente a proporção em massa entre serragem e óleo na mistura, buscando eficiência e qualidade.

2ª regra → Utilizar uma Única Serragem com um Tipo Específico de Óleo: Recomenda a utilização de um único tipo de serragem combinada com um tipo específico de óleo de frango, visando à simplicidade e consistência do produto.

3ª regra → Sem Combinação Ideal de Resíduos Diversos: Propõe a mistura de todos os resíduos disponíveis sem definir uma proporção, buscando economia na mão de obra, tempo e simplificação dos processos, mas com a qualidade comprometida e desperdício de material.

Figura 5.6 - Regras do subsistema de fração mássica.



Fonte: O autor.

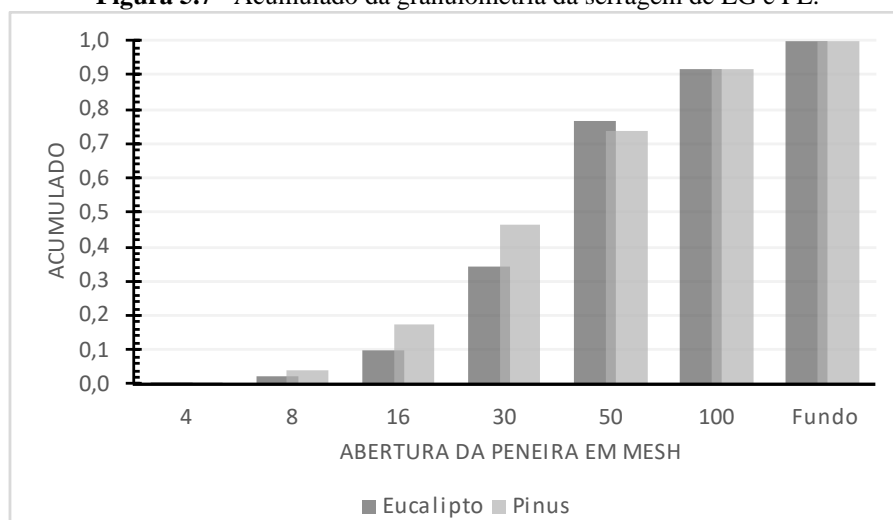
5.3 RESULTADO DA CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA

A fim de obtenção dos dados, foram realizados os seguintes experimentos e análises com as biomassas: i - Análise granulométrica; ii – análise imediata; iii – massa específica; iv – poder calorífico superior e v – Análise termogravimétrica (TGA).

5.3.1 Análise Granulométrica das Serragens e Pó de Serra

Coletou-se 100 g de serragem de EG e a mesma quantidade de PE e foi avaliada a distribuição granulométrica cujos resultados estão apresentados na Figura 5.7. A fração fina obtida de ambas as serragens em comparação as outras frações foram insuficiente, sendo necessário triturar as frações mais espessas a fim de que se obtivessem partículas mais finas. Observou-se então que economicamente fica mais oneroso produzir briquetes com granulometria fina cujas partículas passaram pela peneira de #50 mesh em diante, sendo desejado briquetes feitos com frações mais abundantes que compreendem as que ficaram retida nas peneiras de #16 a #50 mesh.

Figura 5.7 - Acumulado da granulometria da serragem de EG e PE.



Fonte: O autor.

5.3.2 Análise Imediata das Matérias-Primas

As análises realizadas incluíram (a) teor de umidade (XBU), (b) compostos voláteis (T.V), (c) teor de cinzas (T.CZ) e (d) teor de carbono fixo (T.CF). Essas análises foram feitas em triplicata, utilizando aproximadamente três gramas de amostras. A média e o desvio padrão foram calculados, conforme apresentado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Dados da análise imediata dos resíduos.

Resíduo	Base úmida				Base seca		
	XBU(%)	T.V(%)	T.CZ(%)	T.CF(%)	T.V(%)	T.CZ(%)	T.CF(%)
EG	12,81 ± 0,13	64,81 ± 7,99	0,41 ± 0,14	21,98±8,05	74,33 ± 9,14	0,46 ± 0,16	25,21 ± 9,25
PE	17,22 ± 0,42	61,37 ± 3,25	1,19 ± 0,15	20,22±3,03	74,12 ± 3,64	1,44 ± 0,19	24,44 ± 3,75
OVF	1,23 ± 1,15	93,76 ± 2,21	0,06 ± 0,13	4,95 ± 3,33	94,95 ± 3,35	0,06 ± 0,13	4,99 ± 3,34
OFA	0,28 ± 0,24	97,51 ± 1,37	0,09 ± 0,13	2,12 ± 1,58	97,79 ± 1,56	0,09 ± 0,13	2,12 ± 1,57

Fonte: O autor.

Observa-se na Tabela 5.1 que os óleos, em geral, possuem baixo teor de carbono fixo, o que compromete sua performance como combustível, apesar do alto teor de voláteis. Isto porque o que contribui mais energeticamente de forma positiva é o carbono fixo, seguido pelo teor de voláteis. As cinzas influenciam negativamente, pois quanto maior o teor de cinzas, maior a perda energética do combustível. Geralmente, o teor de compostos voláteis é maior, enquanto o teor de cinzas é o menor, mas pode haver exceções. Nota-se que o teor de umidade nos óleos é baixo, não atingindo a 1,5% para o OVF e ficando abaixo de 0,5% para o OFA. Foi feita a operação unitária de decantação por pelo menos 24 h, coletando apenas a porção superior que deveria estar praticamente isenta de umidade. Diante desse resultado, duas hipóteses foram levantadas: (a) havia alguma umidade intrínseca ao OVF resultante do envase na LAR ou (b) durante a secagem em estufa por 24 h a 105 ± 1 °C, despreendeu-se uma pequena quantidade de voláteis das amostras, levando à suposição de que aquilo que se despreendeu foi apenas a umidade presente.

Entre as serragens analisadas, a de EG apresentou os melhores teores em todos os aspectos, destacando-se como a melhor escolha em comparação ao PE. Quanto aos óleos de frango, não é possível definir de maneira segura, apenas com os resultados da análise imediata, qual apresentou melhor resultado de forma geral, pois pelo desvio padrão tanto do OFA quanto OVF não garantem qual de fato possui melhores resultados. No entanto, os resultados indicam que o OFA possui vantagem, visto que, em comparação com o OVF, apenas o teor de carbono fixo aponta desempenho inferior do OFA.

5.3.3 Massa Específica das Matérias-Primas

Calculou-se a massa específica dos óleos de frango por meio de proveta de 50 mL de vidro no volume máximo e balança analítica obtendo os seguintes resultados:

A massa específica do OVF foi de $0,898 \text{ g.cm}^{-3}$ enquanto do OFA foi de $0,922 \text{ g.cm}^{-3}$. A massa específica das serragens medidas no picnômetro foi de $0,730 \text{ g.cm}^{-3}$ para o EG e $0,419 \text{ g.cm}^{-3}$ para o PE. Na literatura não foi encontrado a massa específica das serragens de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis*, apenas da madeira verde ou seca ou serragem solta.

5.3.4 Poder Calorífico Superior (PCS) das Matérias-Primas

Foi obtido o poder calorífico superior (PCS) das matérias-primas (Tabela 5.2). Observa-se que os PCS dos óleos são bem maiores em relação às serragens, fazendo com que seja interessante utilizar o máximo de óleo possível na composição da mistura.

Tabela 5.2 - PCS das matérias-primas para base dos briquetes.

Resíduo	EG	PE	OFA	OVF
PCS (MJ/kg)	19,505	19,701	40,028	40,461
PCS (kcal/kg)	4661,812	4708,657	9566,932	9670,422

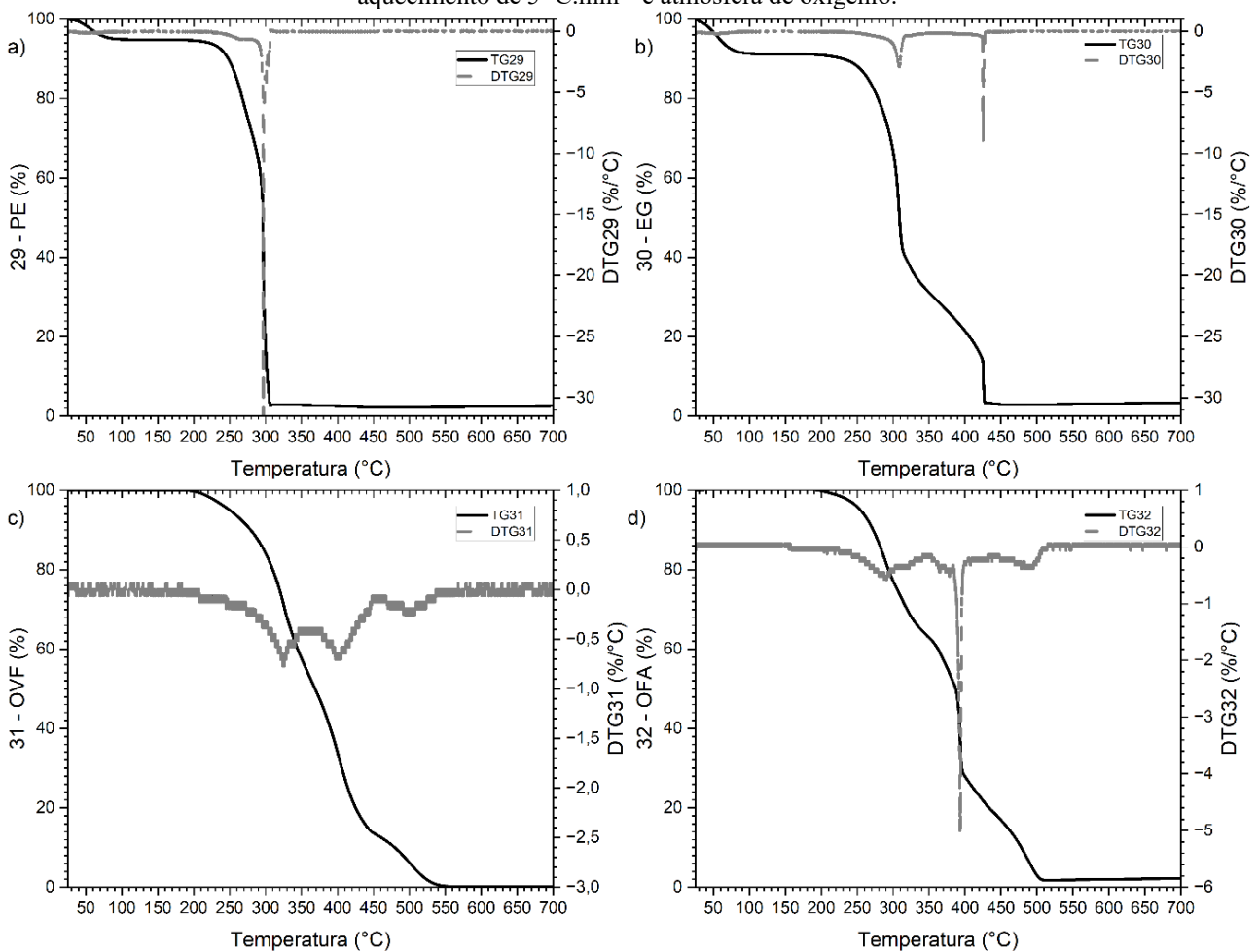
Fonte: O autor.

A diferença de PCS entre as serragens, do EG para o PE, foi de 1,00%, enquanto para os óleos essa diferença foi de 1,08%, com valor superior para o OVF. É uma diferença que não pode ser ignorada, pois para grandes quantidades, esta diferença pode ser significativa.

5.3.5 Análise Termogravimétrica (TGA) das Matérias-Primas

É apresentado na Figura 5.8 o gráfico da análise termogravimétrica acompanhada da primeira derivada para evidenciar as faixas de perda de massa. Cada uma destas regiões pode significar a liberação ou deterioração de alguma substância presente em cada matéria-prima.

Figura 5.8 - Análise termogravimétrica das matérias-primas: a) 29 - PE; b) 30 - EG; c) 31 - OVF; d) 32 - OFA, taxa de aquecimento de $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ e atmosfera de oxigênio.



Fonte: O autor.

Por meio da análise da Figura 5.8 foram divididas faixas de temperatura para cada evento térmico e a análise da massa residual, dividindo então em duas seções de discussões. Esta divisão se faz necessária por questão de organização.

5.3.5.1 *Eventos térmicos*

A seguir são apresentadas estimativas aproximadas das faixas de temperatura em que os principais componentes de cada uma das matérias-primas podem degradar durante a análise termogravimétrica. Vale ressaltar que essas estimativas são suscetíveis a variações, dependendo de várias condições experimentais, incluindo a composição exata das amostras e as condições de análise.

a) Serragem de Madeira (PE e EG):

Água livre: A água livre presente na serragem foi liberada a partir do início do aquecimento, mas se acentua a 100 °C.

Água intrinsecamente ligada: a perda da água residual ligada com a estrutura das serragens de forma intrínseca, ocorreu em uma faixa de temperatura em torno de 100 a 250 °C.

Hemicelulose: a degradação da celulose e da hemicelulose da madeira ocorreu em uma faixa de temperatura ampla, geralmente entre 200 e 3150°C (YANG et al., 2007).

Celulose: a degradação da celulose pode se iniciar próximo da hemicelulose, 210 °C, mas segue até uma temperatura máxima de 400 °C (YANG et al., 2007).

Lignina: a lignina é mais resistente e geralmente requer temperaturas mais elevadas para degradação, tipicamente a partir de 160°C a 700°C ou mais (YANG et al., 2007).

b) Óleo Visceral de Frango:

Glicerol: geralmente começa a degradar em torno de 200°C a 320°C.

Ácidos Graxos: a degradação dos ácidos graxos pode ocorrer em uma faixa ampla, geralmente entre 250°C e 400°C, com variações dependendo dos ácidos graxos específicos presentes.

Fosfolipídios: A degradação dos fosfolipídios geralmente começa em torno de 300°C a 400°C.

c) Óleo de Frango Assado:

Ácidos Graxos: podem degradar na mesma faixa de temperatura, geralmente entre 250°C e 400°C.

Compostos Voláteis: podem começar a ser liberados em temperaturas mais baixas, geralmente a partir de 100°C, mas as temperaturas mais significativas provavelmente serão observadas em torno de 200°C a 300°C, quando ocorrer a degradação térmica dos resíduos de cozimento.

5.3.5.2 *Massa residual no TG*

Quanto ao teor de cinzas, nota-se que para o OVF praticamente não sobrou nenhum resíduo após a combustão completa (burnout), deixando apenas 0,075%. Já o OFA apresentou um teor de cinzas de 2,250%, uma diferença de 2,175%. Ao comparar os resultados da análise imediata, embora os valores absolutos difiram, a tendência é a mesma: o teor de cinzas para o OVF é menor do que o do OFA, com uma diferença de 0,03%. Isso pode ocorrer porque o frango assado recebeu uma carga de temperos variados, e parte das substâncias podem ter se solubilizado no óleo, conferindo um aumento no teor de cinzas.

Por outro lado, ao comparar o PCS dos óleos de frangos, o OFA não fica muito atrás, apresentando uma diferença de apenas de 0,433 MJ/kg, sendo o OVF 1,070% com maior PCS em relação ao OFA. Com base nisso uma opção alternativa de baixo custo para escolha de aglutinante do briquete e potencializador de energia continua sendo o OFA, sendo vantajoso o uso do OVF apenas para o próprio produtor deste óleo.

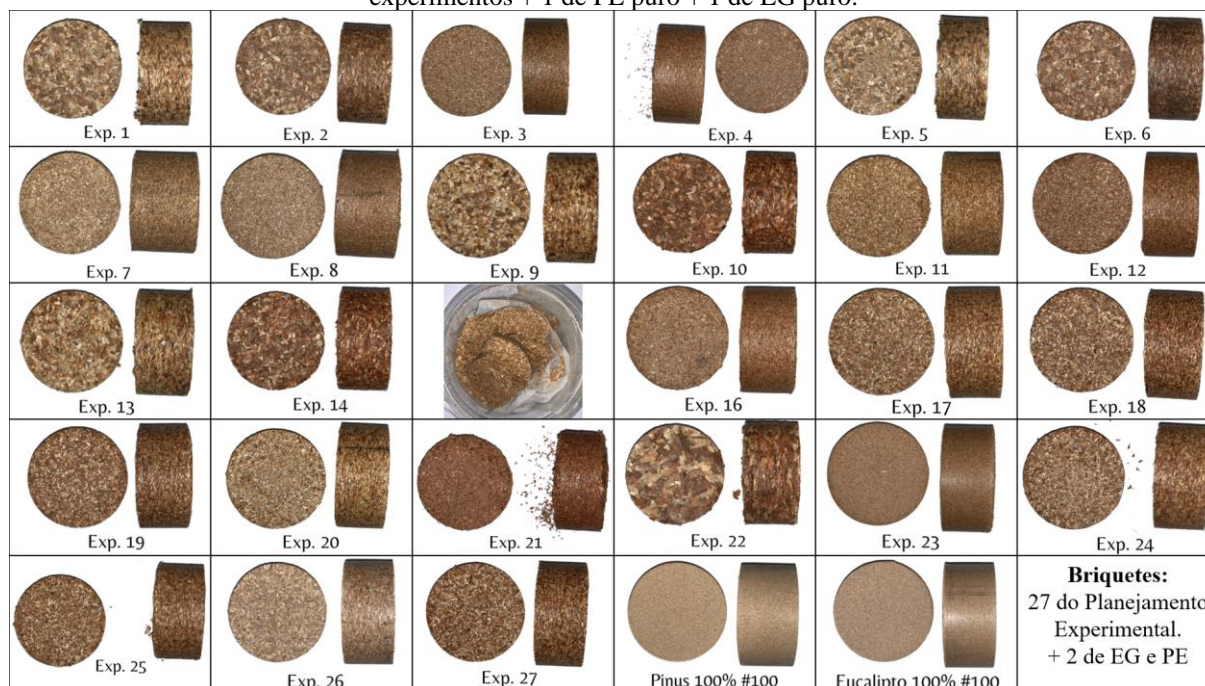
Em relação as serragens, o EG apresentou 3,394% de massa residual enquanto o PE apresentou 2,604%, uma diferença de 0,790%. Comparando com a análise imediata, a ordem é a mesma: o EG apresentou maior teor de cinzas em relação ao PE, com uma diferença, em base úmida, de 0,78% a mais para o EG. A temperatura final de degradação de todas as matérias-primas aconteceu em torno de 550 °C, sendo que o OVF foi o que mais avançou em temperatura, enquanto o PE foi degradado totalmente em torno de 450 °C.

5.4 RESULTADO DA CARACTERIZAÇÃO DOS BRIQUETES

Após a confecção dos briquetes, procedeu-se a medição das dimensões utilizando um paquímetro digital e massa de cada um por meio de balança analítica. Para garantir a preservação dos briquetes, estes foram acondicionados individualmente em recipientes transparentes de plástico e armazenados em uma caixa de plástico, que foi colocada em um ambiente protegido da luz para evitar qualquer influência externa. As medições de massa e dimensões foram repetidamente realizadas nos períodos de 3, 10, 15 e 18 meses após a produção, permitindo a avaliação de mudanças físicas ao longo do tempo. Os briquetes também foram

organizados e fotografados para documentação, conforme exibido na Figura 5.9, sob condição de iluminação adequada para possibilitar comparações objetivas em termos de cor, textura e outros aspectos visuais. É importante notar que as dimensões dos briquetes nas fotografias não estão em escala real, mas permitem a observação de variações visuais, alterações na coloração, tamanho das partículas e, em alguns casos, sinais de desfragmentação.

Figura 5.9 - Vista frontal e lateral dos briquetes (40 g) produzidos a partir do planejamento experimental: 27 experimentos + 1 de PE puro + 1 de EG puro.



Fonte: O autor.

A fim de obtenção dos dados, foram realizados os seguintes experimentos e análises com os briquetes: i – análise imediata estimada; ii – massa específica; iii – poder calorífico superior; iv – Análise termogravimétrica (TGA); e v – resistência mecânica.

5.4.1 Análise Imediata Estimada dos Briquetes

Por meio dos resultados expressos na Tabela 5.1 estimou-se a análise imediata dos briquetes produzidos partindo da premissa que não houve transformação química durante a produção dos briquetes, logo a composição de matéria não se modificou, a não ser pela perda de matéria durante o processo na transferência de massa tanto para a briquetadeira quanto para desenformar. Desta forma, a partir da Equação 4.10 que é genérica, foram desenvolvidas as Equações 5.1 até a 5.4. Utilizou-se a Equação 5.1 para cálculo estimado do teor de umidade.

$$XBU_{\text{Briq}\%} = XBU_{EG\%} \cdot m_{EG\%} + XBU_{PE\%} \cdot m_{PE\%} + XBU_{OVF\%} \cdot m_{OVF\%} + XBU_{OFA\%} \cdot m_{OFA\%} \quad (5.1)$$

Em que $XBU_{\text{Briq}\%}$ é o teor de umidade estimado no briquete a partir do somatório de cada produto entre o teor de umidade de cada resíduo pela fração mássica de cada resíduo que compõe o briquete. Análogo a Equação 5.1 e a Equação 4.10 o mesmo cálculo é feito para os demais componentes como o teor de voláteis $T_V(\%)$ na Equação 5.2, teor de cinzas $T_{CZ}(\%)$ na Equação 5.3 bem como o teor de carbono fixo $T_{CF}(\%)$ na Equação 5.4.

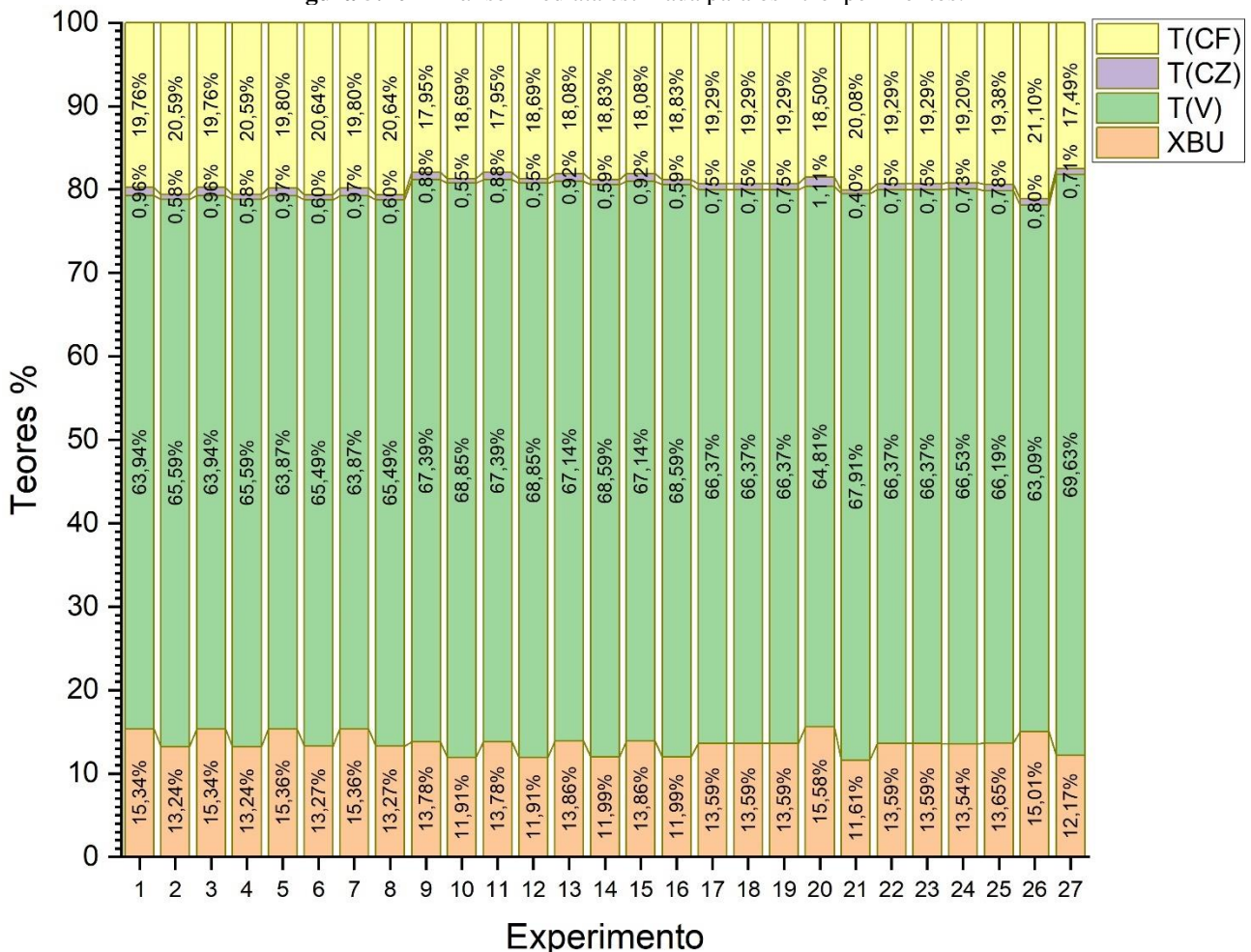
$$T_{V.\text{Briq}\%} = T_{V.EG\%} \cdot m_{EG\%} + T_{V.PE\%} \cdot m_{PE\%} + T_{V.OVF\%} \cdot m_{OVF\%} + T_{V.OFA\%} \cdot m_{OFA\%} \quad (5.2)$$

$$T_{CZ.\text{Briq}\%} = T_{CZ.EG\%} \cdot m_{EG\%} + T_{CZ.PE\%} \cdot m_{PE\%} + T_{CZ.OVF\%} \cdot m_{OVF\%} + T_{CZ.OFA\%} \cdot m_{OFA\%} \quad (5.3)$$

$$T_{CF.\text{Briq}\%} = T_{CF.EG\%} \cdot m_{EG\%} + T_{CF.PE\%} \cdot m_{PE\%} + T_{CF.OVF\%} \cdot m_{OVF\%} + T_{CF.OFA\%} \cdot m_{OFA\%} \quad (5.4)$$

Aplicando as equações supracitadas, foram obtidos os dados estimados dos teores da análise imediata expressos e esboçou-se o gráfico de barras empilhadas, Figura 5.10.

Figura 5.10 - Análise imediata estimada para os 27 experimentos.



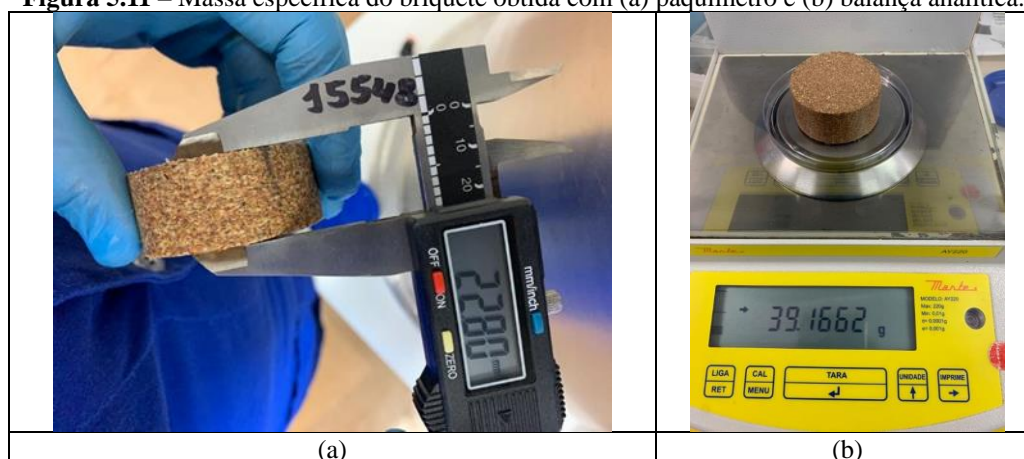
Fonte: O autor.

Nota-se que os teores no geral se aproximam aos valores obtidos para as serragens e observa-se que a combinação com o óleo não alterou de forma que comprometesse os briquetes em relação aos teores de umidade, cinzas, voláteis e carbono fixo na análise imediata, vindo o óleo a cumprir seu papel de ligante sem causar prejuízos.

5.4.2 Massa Específica dos Briquetes

Para determinar a massa específica dos briquetes produzidos, utilizou-se um paquímetro para medir suas dimensões e calcular o volume, e uma balança analítica para medir a massa, conforme ilustrado na Figura 5.11.

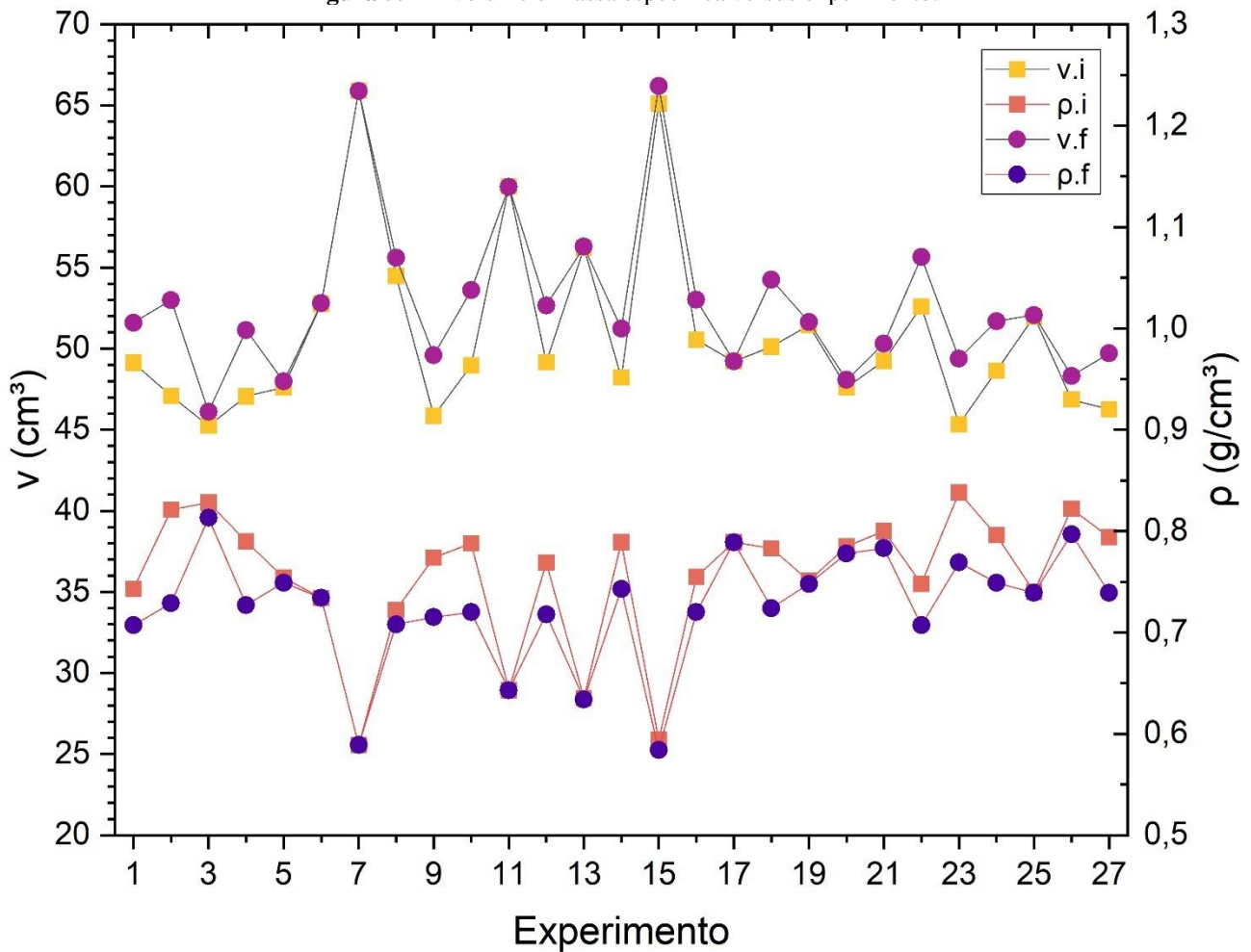
Figura 5.11 – Massa específica do briquete obtida com (a) paquímetro e (b) balança analítica.



Fonte: O autor.

Após aferições, determinou-se o valor dos volumes e as massas específicas dos briquetes, conforme o gráfico apresentado na Figura 5.12. Ao longo de três meses após a produção, observou-se que a maioria dos briquetes sofreu um aumento de volume e, conseqüentemente, uma diminuição na massa específica para a mesma massa. Este fenômeno pode ser atribuído à absorção de umidade e à expansão do material. Conforme discutido por (GRANADO et al., 2021) a densificação de biomassa pode levar a mudanças nas propriedades físicas ao longo do tempo devido à interação com o ambiente.

Figura 5.12 - Volume e massa específica versus experimento.



Nota: v.i – volume inicial; ρ.i – massa específica inicial; v.f – volume final; ρ.f – massa específica final;

Fonte: O autor.

O volume dos 27 briquetes produzidos pelo planejamento experimental aumentou, em média, $4,2\% \pm 3,7\%$, com a maior variação sendo de 12,6% e a menor 0,0%. Paralelamente, a massa específica reduziu em média $3,9\% \pm 3,4\%$, com a maior variação de 11,2% e a menor de 0,0%. Houve alguns experimentos, que é o caso dos experimentos 6, 7, 11, 13, 17, 19 e 25, em que não se notaram mudança aparente no volume ou na massa específica, variando menos que 0,5%.

5.4.3 Poder Calorífico Superior dos Briquetes

A partir do PCS das biomassas medido por uma bomba calorimétrica, os resultados foram organizados em ordem decrescente de PCS na Tabela 5.3. O PCS obtido é apresentado tanto nas unidades de $MJ.kg^{-1}$ e $kcal.kg^{-1}$. Há uma tendência em relação ao teor de óleo, pois quanto maior for, maior é o PCS. Os óleos empregados desempenham o papel de ligantes para manter os briquetes coesos bem como enriquecimento energético.

Tabela 5.3 - Disposição da fração mássica com o PCS obtidos em bomba calorimétrica.

Exp.	Mesh	EG m%	PE m%	OVF m%	OFA m%	SOMA m%	óleos m%	PCS (MJ/kg)	PCS (kcal/kg)	Diferença% PCS Máximo
27	30	40,00	40,00	10,00	10,00	100,00	20	23,02	5501,44	100,00
9	16	21,25	63,75	3,75	11,25	100,00	15	22,63	5408,23	88,38
14	16	63,75	21,25	11,25	3,75	100,00	15	22,49	5374,29	84,14
15	50	21,25	63,75	11,25	3,75	100,00	15	22,42	5359,47	82,30
20	30	0,00	90,00	5,00	5,00	100,00	10	22,24	5315,97	76,87
10	16	63,75	21,25	3,75	11,25	100,00	15	22,24	5314,30	76,66
12	50	63,75	21,25	3,75	11,25	100,00	15	22,09	5280,12	72,40
19	30	45,00	45,00	5,00	5,00	100,00	10	22,09	5279,64	72,34
13	16	21,25	63,75	11,25	3,75	100,00	15	22,02	5262,43	70,19
24	30	45,00	45,00	0,00	10,00	100,00	10	21,96	5248,57	68,46
11	50	21,25	63,75	3,75	11,25	100,00	15	21,84	5218,94	64,77
17	30	45,00	45,00	5,00	5,00	100,00	10	21,63	5170,66	58,75
21	30	90,00	0,00	5,00	5,00	100,00	10	21,61	5164,92	58,03
16	50	63,75	21,25	11,25	3,75	100,00	15	21,48	5134,33	54,22
18	30	45,00	45,00	5,00	5,00	100,00	10	21,47	5131,94	53,92
22	8	45,00	45,00	5,00	5,00	100,00	10	21,43	5121,42	52,61
25	30	45,00	45,00	10,00	0,00	100,00	10	21,37	5107,80	50,91
2	16	71,25	23,75	1,25	3,75	100,00	5	21,07	5036,81	42,06
1	16	23,75	71,25	1,25	3,75	100,00	5	21,05	5032,03	41,46
23	100	45,00	45,00	5,00	5,00	100,00	10	20,99	5016,50	39,52
3	50	23,75	71,25	1,25	3,75	100,00	5	20,92	4998,81	37,32
4	50	71,25	23,75	1,25	3,75	100,00	5	20,69	4945,99	30,73
5	16	23,75	71,25	3,75	1,25	100,00	5	20,69	4945,03	30,61
7	50	23,75	71,25	3,75	1,25	100,00	5	20,59	4922,09	27,75
6	16	71,25	23,75	3,75	1,25	100,00	5	20,52	4903,69	25,45
8	50	71,25	23,75	3,75	1,25	100,00	5	20,03	4786,10	10,79
26	30	50,00	50,00	0,00	0,00	100,00	0	19,66	4699,58	0,00

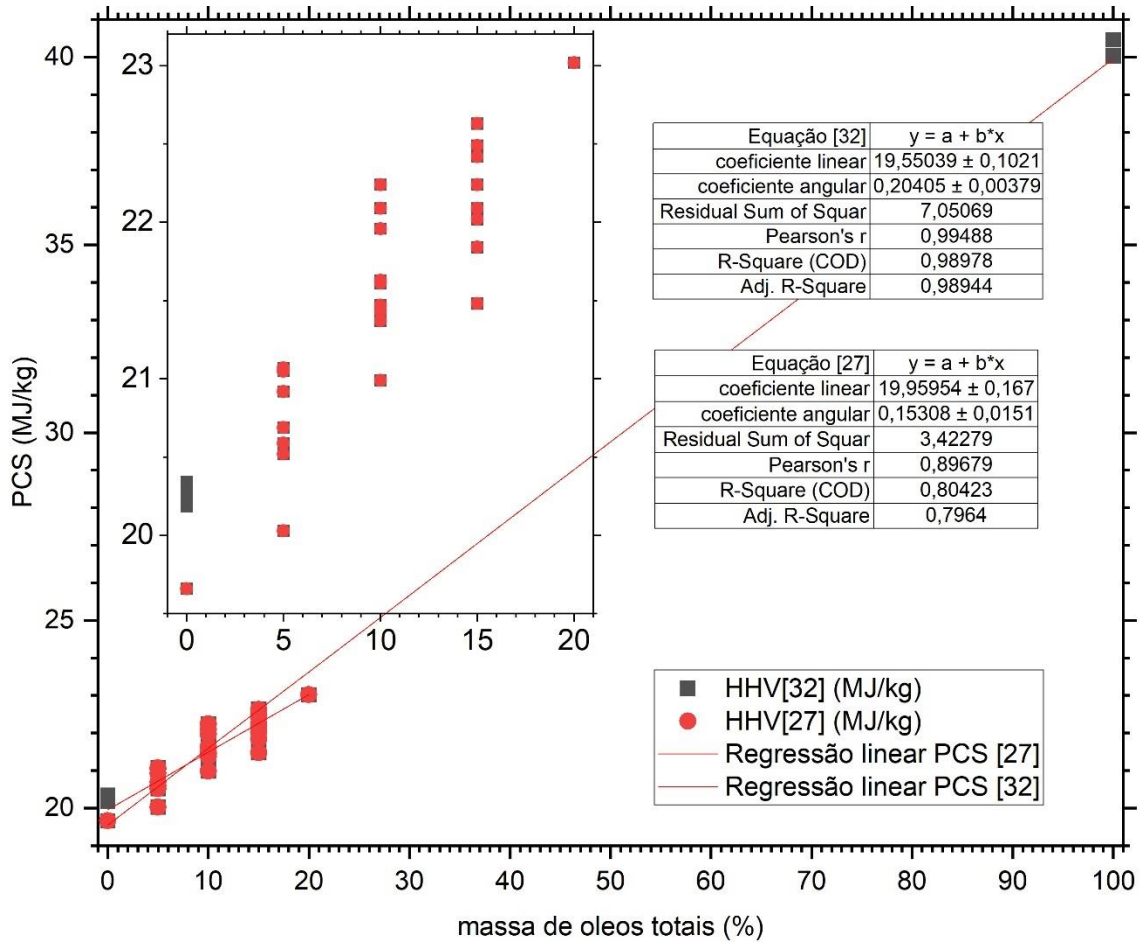
Fonte: O autor.

Analisando a Tabela 5.3 observa-se o experimento n° 27 que possui 20% em massa de óleos, foi o de maior PCS, no entanto este despreendeu um pouco de óleo sendo percebido durante o processo de desmoldagem. Percebe-se que há uma tendência naqueles experimentos que possuem os maiores teores de óleos em sua composição estão entre os de maior PCS.

A última coluna da Tabela 5.3 expressa o equivalente em porcentagem do PCS considerando 100% o briquete que apresentou maior valor de PCS, que no caso é o experimento de número 27, e 0% aquele que apresentou menor valor de PCS, correspondendo ao experimento de número 26. Os demais briquetes estão nesta faixa de 0 a 100% servindo para observar a variação em termos energéticos, entre os briquetes com diferentes composições.

A Figura 5.13 mostra a correlação entre o poder calorífico superior (PCS) com os 27 briquetes agrupados por teor de óleo na faixa de 0 a 20%, variando em 5%. Foi adicionado ainda o PCS do OVF e OFA puros, com a finalidade de avaliar a tendência na variação do PCS com o teor dos óleos de frango.

Figura 5.13 - Correlação do PCS e teor de óleos de frango.



Fonte: O autor.

A partir de regressão linear dos dados do PCS obtido das 27 amostras, chegou-se à Equação 5.5.

$$\text{PCS}[27] = 19,95954 + 0,15308 \cdot m_{oleo} \quad R^2 = 0,7964 \quad (5.5)$$

Observa-se que a equação anterior possui um coeficiente de correlação bom, sendo aceitável para a predição. Ao adicionar os dados de PCS dos dois óleos na regressão linear, o OVF e o OFA, este coeficiente de correlação aumenta para um valor muito próximo a 1, chegando-se à Equação 5.6.

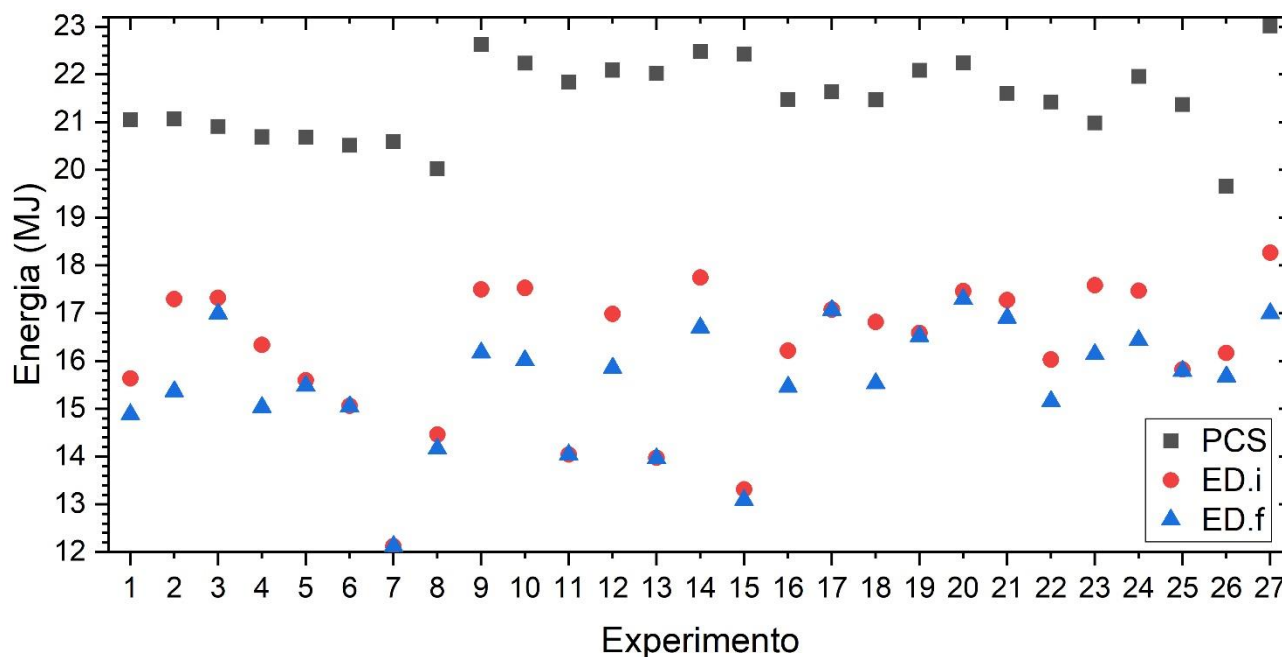
$$\text{PCS}[32] = 19,55039 + 0,20405 \cdot m_{oleo} \quad R^2 = 0,98944 \quad (5.6)$$

O RSS (Soma dos Quadrados dos Resíduos) mede a discrepância entre os dados observados e os valores estimados pelo modelo de regressão. Quanto menor o valor do RSS, melhor

o modelo se ajusta aos dados. No conjunto (PCS[32]) da Equação 5.6, o RSS é 7,05069, enquanto no conjunto PCS[27] da Equação 5.5 o RSS é 3,42279. Portanto, o modelo PCS[27] teve melhor desempenho em termos de RSS, indicando que ele se ajustou melhor aos dados observados, isso sugere que é mais preciso na previsão dos valores de y (PCS) com base em x (massa de óleos totais %). Por outro lado, ao comparar os dois modelos em relação aos demais componentes (Coeficiente de Correlação de Pearson, R^2 e R^2 ajustado), entende-se que o modelo PCS[32] obteve melhor performance.

Uma forma de mensurar a energia de um combustível por volume é a densidade energética (DE) que é o produto do PCS com ρ do combustível. Na Figura 5.14 é apresentado a energia dos 27 briquetes produzidos na forma de PCS como (MJ/kg), a DE dos briquetes imediatamente após serem produzidos como MJ/L(i) e a DE dos briquetes 3 meses depois de fabricados como MJ/L(f).

Figura 5.14 - Energia (MJ) do PCS e DE correlacionado aos 27 experimentos.



Fonte: O autor.

Nota-se que a densidade energética (DE) possui valores sempre menores em relação ao PCS por conta da massa específica de todos os briquetes serem menor do que $1,00 \text{ g/cm}^3$. Ao comparar as densidades energéticas é visto que ao passar dos 3 meses em que os briquetes ficaram em repouso e guardado em abrigo, houve uma expansão do volume e conseqüentemente houve a diminuição da massa específica e atrelado a isso a densidade energética. A média de densidade energética inicial (DE.i) foi de $16,213 \text{ MJ/L} \pm 1,526 \text{ MJ/L}$, o menor valor registrado foi

12,126 MJ/L e o maior 18,267 MJ/L. Enquanto a média da densidade energética final (DE.f) foi de $15,556 \pm 1,259$ MJ/L.

É vantajoso adicionar um dos óleos de frango como ligante, pois em todas as composições analisadas, observou-se uma melhora na densidade energética e poder calorífico superior dos briquetes. Ao analisar qual melhor óleo de frango utilizar, observou-se que o OVF possui maior PCS, no entanto seu custo é muito mais expressivo em relação ao OFA. Sendo assim foi necessário análises mais aprofundadas para definir o melhor. Deve-se levar em consideração a disponibilidade destes óleos em uma determinada região além de outros custos envolvidos como: mão-de-obra, embalagens, transporte, incentivo fiscal, imposto e outros.

5.4.4 Estatística do Poder Calorífico Superior (PCS)

Foi feita a análise estatística para a variável dependente Poder Calorífico Superior com as variáveis independentes. Os resultados das estimativas dos efeitos, conforme apresenta na Tabela 5.4, foram obtidos considerando apenas aqueles com p-valor < 5% dentre os doze (12) fatores no total.

Tabela 5.4 - Efeitos estimados do PCS

Fator	Efeito	Erro padrão	t (12)	p
Mean/Interc.	21,63400	0,141071	153,3552	0,000000
(1)X1 (L)	-0,23483	0,099752	-2,3542	0,036436
(2)X2 (L)	-0,29317	0,099752	-2,9389	0,012396
X2 (Q)	-0,25021	0,105803	-2,3648	0,035735
(3)X3 (L)	-0,28917	0,099752	-2,8988	0,013355
(4)X4 (L)	1,52900	0,099752	15,3280	0,000000

Dado que: X₁ = Proporção das Serragens entre a fração mássica de serragem na mistura (%); X₂ = Granulometria em Mesh das Serragens; X₃ = Proporção dos óleos de frango na fração mássica dos óleos na mistura (%); X₄ = Fração mássica de óleo mistura (%). (L) indica um efeito linear e (Q) indica um efeito quadrático.

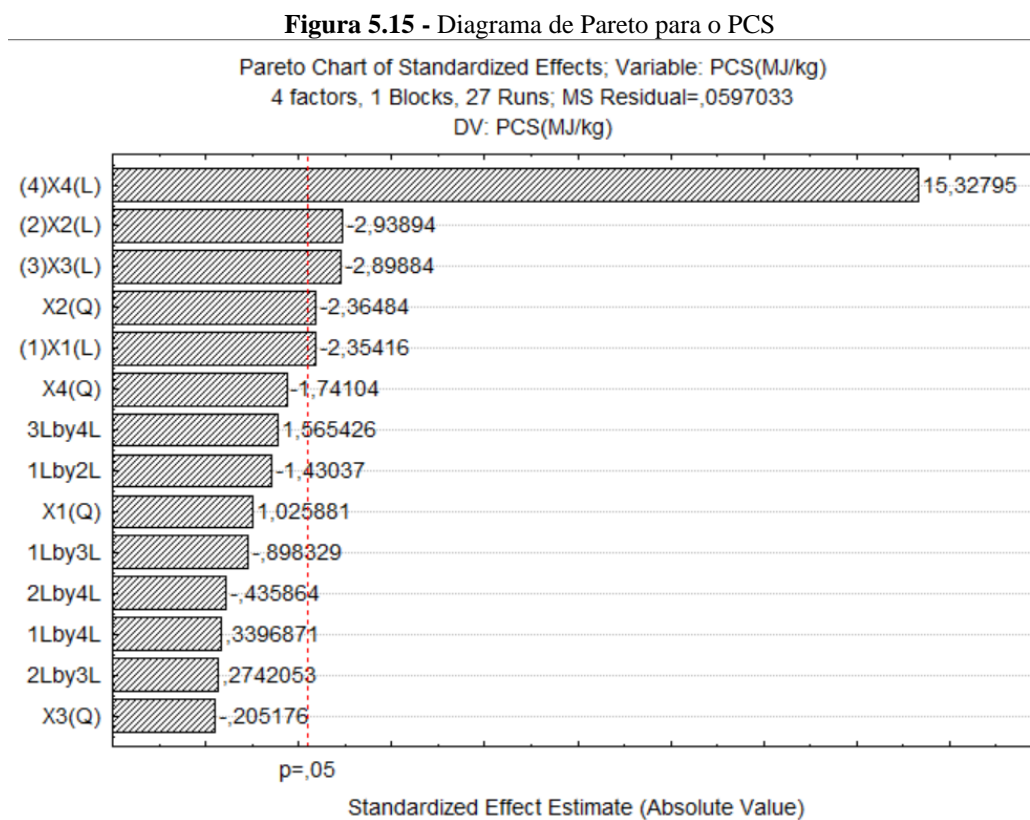
Fonte: O autor.

Com base nos dados obtidos, considerando apenas os coeficientes significativos gerados na análise estatística ($p < 0,05$) da Tabela 5.4, cujo $R^2 = 0,9582$, determinou-se a equação de regressão linear para o PCS, na Equação 5.7.

$$PCS = 21,63400 - 0,23483 \cdot X_1 - 0,29317 \cdot X_2 - 0,25021 \cdot X_2^2 - 0,28917 \cdot X_3 + 1,52900 \cdot X_4 \quad (5.7)$$

O único fator significativo que aparece na forma quadrática é o X₂, relacionado à granulometria das serragens, e seu efeito é inversamente proporcional. Isso significa que, quanto

menor a granulometria (ou seja, partículas mais finas), maior será o PCS. Partículas menores permitem uma compactação mais eficiente, resultando em um desempenho energético melhor. Utilizando o valor t de cada fator analisado, representou-se o diagrama de Pareto para que fosse possível analisar de forma gráfica por meio da Figura 5.15 evidenciando os fatores significativos.

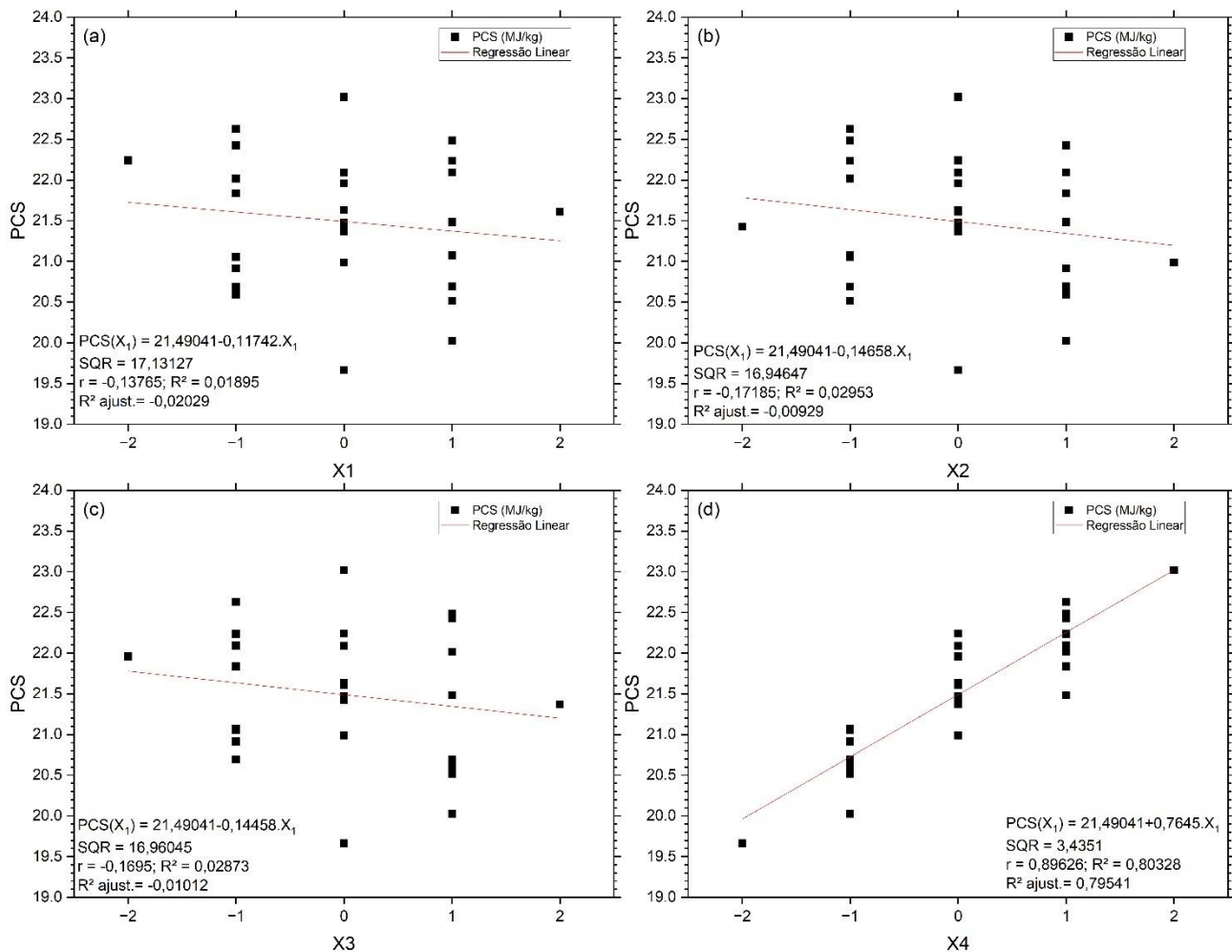


Fonte: O autor.

O fator linear fração mássica do óleo, representado por (4)X4(L), foi o mais significativo, com uma participação diretamente proporcional. Isso indica que quanto maior o teor de óleo, maior será o PCS. Os outros fatores significativos são: (2)X2(L) e X2(Q), que representam a granulometria em mesh da serragem, sendo o primeiro linear e o segundo quadrático, ambos com efeitos negativos, ou seja, inversamente proporcionais. Outro fator significativo é o (3)X3(L), relacionado ao tipo de óleo de frango, e finalmente (1)X1(L), relacionado à escolha da serragem. Ambos os últimos fatores também são inversamente proporcionais.

Todos os fatores lineares foram significativos, exceto X₂ que também apresentou um efeito quadrático significativo. Com os fatores todos codificados entre -2 a +2, a correlação individual com a variável resposta PCS foi determinada, como mostrado na Figura 5.16.

Figura 5.16 - Coeficiente de Determinação Ajustado (R^2 ajust.) versus PCS: a) X_1 com $R^2 = -0,020$, b) X_2 com $R^2 = -0,009$, c) X_3 com $R^2 = -0,010$ e d) X_4 com $R^2 = 0,796$.



Fonte: O autor.

Estes dados corroboraram com a análise estatística quando evidenciaram a grande correlação entre X_4 e o PCS mostrando que o aumento da fração mássica de óleo, aumentou o PCS. Ao mesmo tempo, as variáveis X_1 , X_2 e X_3 apresentaram o coeficiente de correlação quadrático (R^2) muito baixo, sendo respectivamente 0,01894, 0,02953 e 0,02873, não sendo possível afirmar com precisão qual a tendência a ser seguida de cada um.

Comparando as Figura A.1, Figura A.2, Figura A.3, Figura A.4, Figura A.5 e Figura A.6, presentes no SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DO PCS, em que são apresentados dois fatores atrelados a variável resposta PCS, o efeito de cada fator foi classificado conforme o Quadro 5.1.

Estes fatores relacionam cada variável às outras três e a avaliação foi feita por meio da superfície de resposta de cada par de variáveis atrelado a variável resposta PCS. Por exemplo, analisa-se o efeito de X_1 em X_2 , X_3 e X_4 e da mesma forma para outros fatores observando se a interação foi Forte, Média ou Fraca.

Quadro 5.1 - Análise e comparação dos gráficos de superfície de resposta das quatro variáveis independentes com os 3 níveis de maior intensidade.

Avaliação Intensidade	X ₁	X ₁ com			X ₂	X ₂ com			X ₃	X ₃ com			X ₄	X ₄ com		
		X ₂	X ₃	X ₄		X ₁	X ₃	X ₄		X ₁	X ₂	X ₄		X ₁	X ₂	X ₃
Forte	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	o20 s080	+2	+2	+2
Média	EG000 PE100	-2	-2	-2	030M	0	0	0	OVF000 OFA100	-2	-2	-2	o15 s085	+1	+1	+1
Fraca	EG025 PE075	-1	-1	-1	016M	-1	-1	-1	OVF025 OFA075	-1	-1	-1	o10 s090	0	0	0

Fonte: O autor.

Notou-se que:

Para X₁ - Proporção das Serragens entre a fração mássica de serragem na mistura (%), observa-se que a escolha entre o EG em relação ao PE, não apresentou uma diferença muito expressiva, não havendo diferença entre escolher um ou outro na composição do briquete. O critério para escolher um ou outro teve a ver com outros parâmetros como: resistência mecânica, custo de cada um e durabilidade.

Para X₂ - Granulometria em Mesh das Serragens, a faixa melhor de granulometria entre #16 a #30 mesh, favoreceu maiores valores de PCS mesmo sendo bem sutil a diferença entre outras faixas granulométricas.

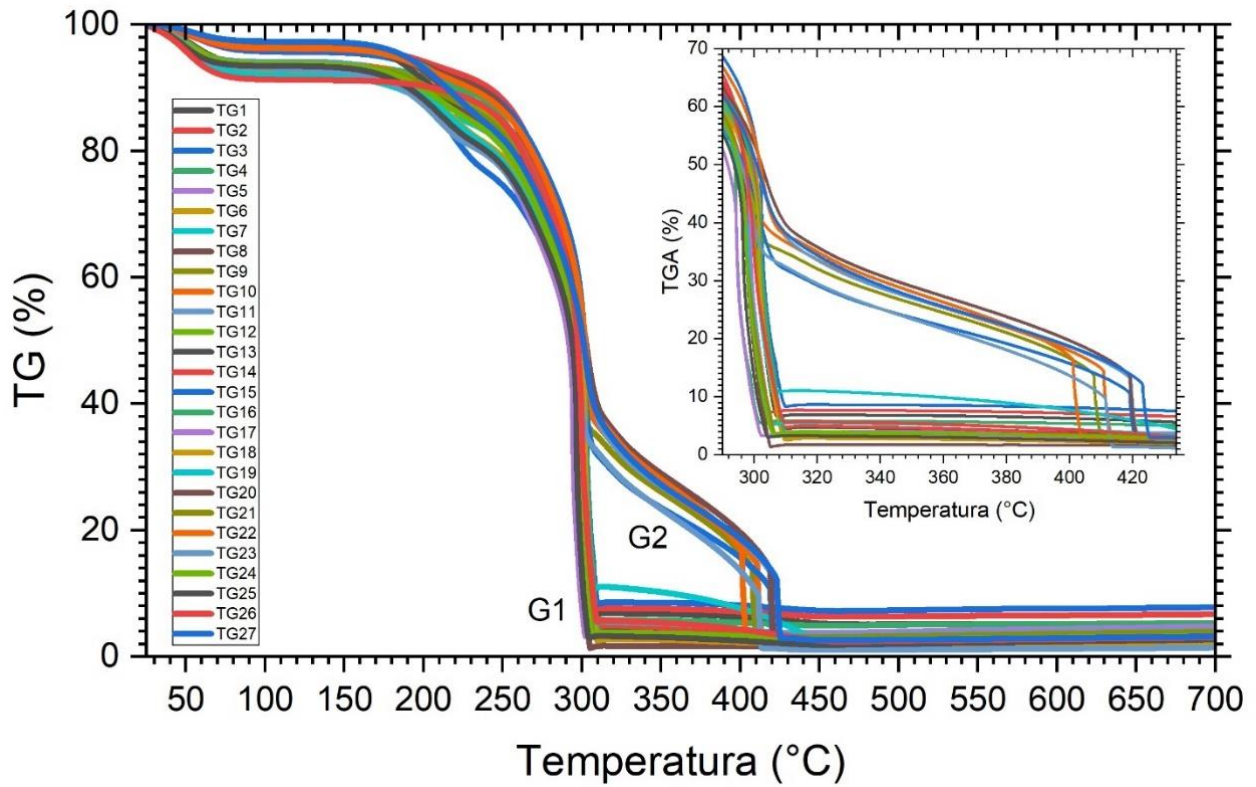
Para X₃ - Proporção dos óleos de frango na fração mássica dos óleos na mistura, os resultados, apesar de não muito conclusivo, apontaram para maior uso do OFA. Esta escolha se mostrou prudente devido aos custos de obtenção da matéria-prima do óleo de frango assado ser muito baixo ou até mesmo ser obtido de forma gratuita.

Para X₄ - Fração mássica de óleo na mistura (%), os resultados apontaram fortemente que quanto maior a fração mássica de óleo, maior é o PCS do briquete. Ressaltando que há um limite de uso pois o óleo pode ser perdido na etapa da prensagem do briquete. Além disso, o excesso de óleo pode comprometer a resistência mecânica dos briquetes, tornando-os menos coesos e mais suscetíveis à desintegração durante o manuseio e o transporte.

5.4.5 Análise Termogravimétrica (TGA)

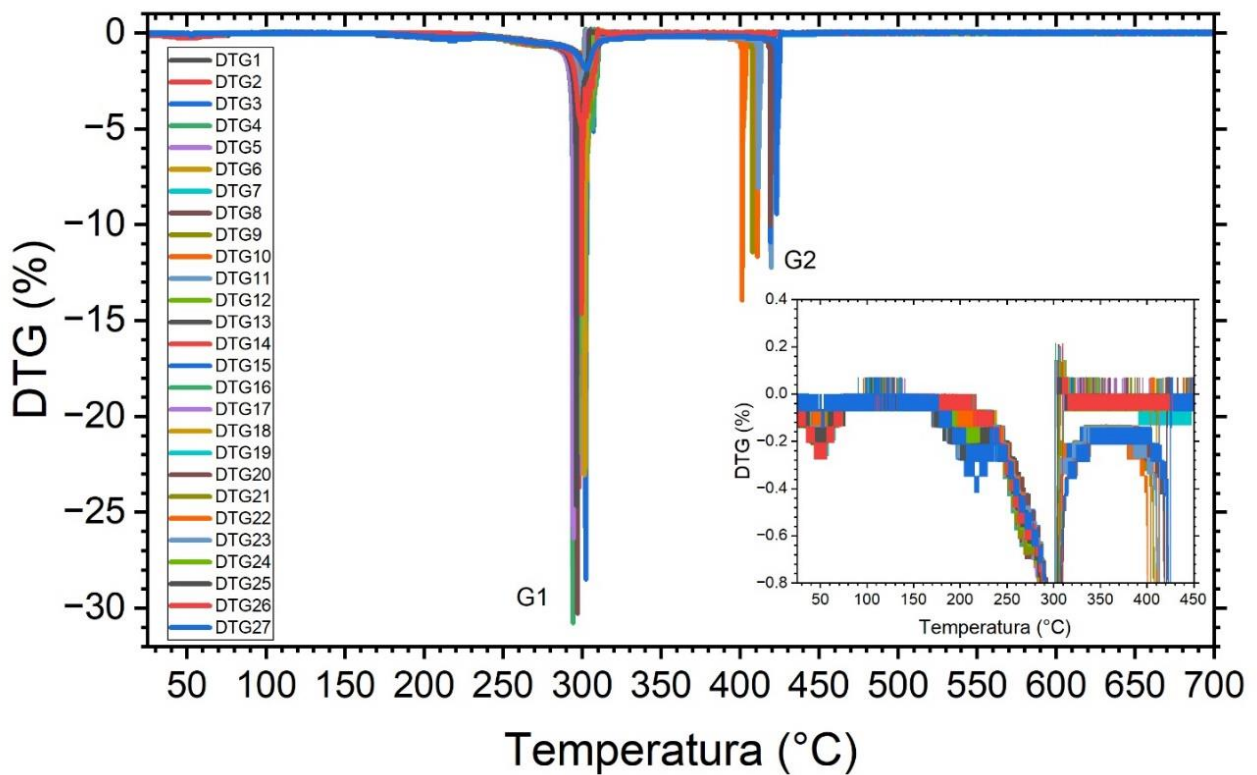
Realizou-se a análise termogravimétrica para quantificar faixas de degradação térmica e liberação de umidade e compostos voláteis das misturas. Identificou-se que a transição para cinzas ocorreu consistentemente após a exposição a 560 °C, como ilustrado na Figura 5.17, ressaltando a resistência térmica dos materiais a temperaturas elevadas e a DTG na Figura 5.18.

Figura 5.17 – Análise termogravimétrica dos 27 experimentos realizados



Fonte: O autor

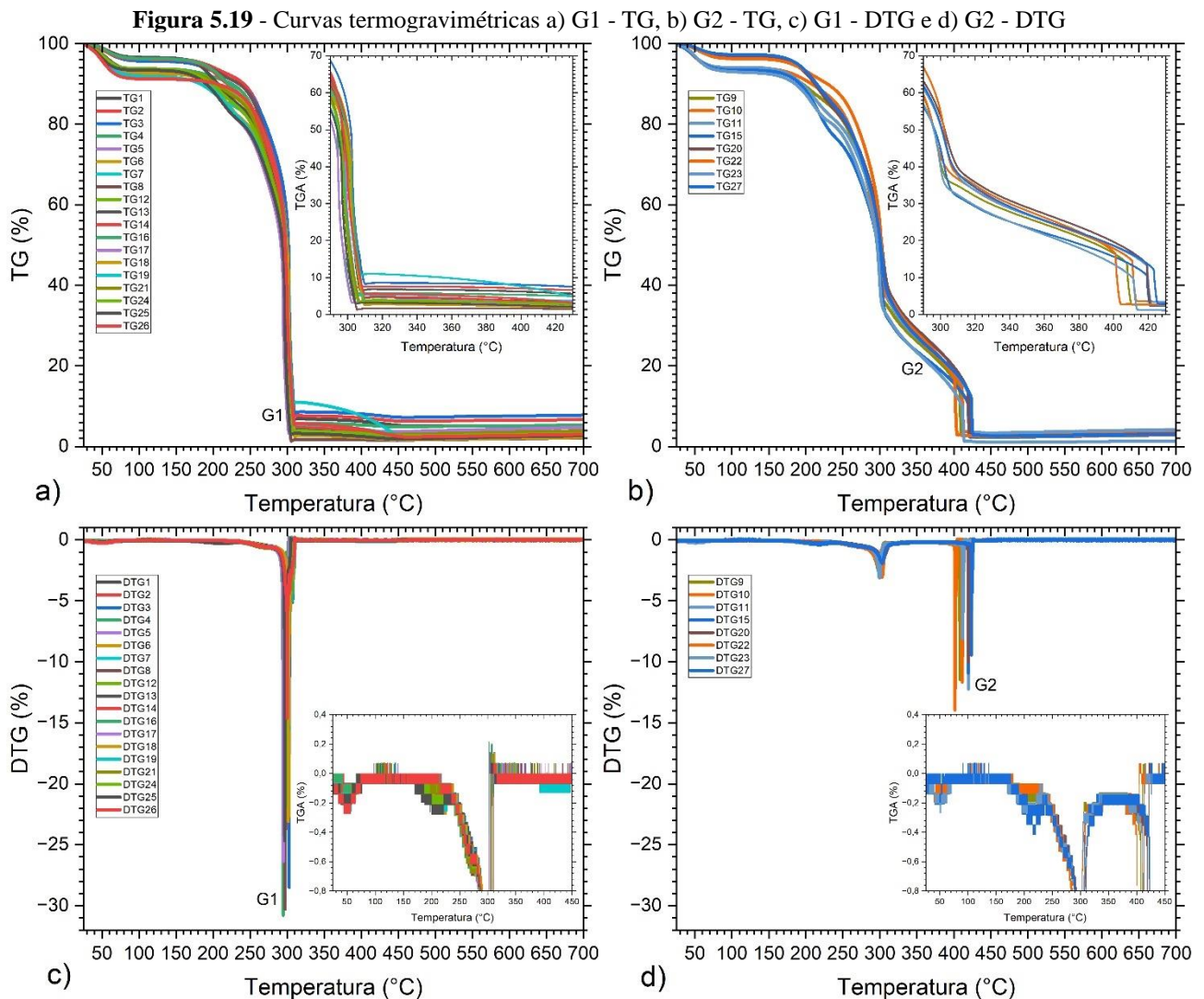
Figura 5.18 – Derivada das curvas termogravimétricas dos 27 experimentos realizados



Fonte: O autor

A análise das curvas termogravimétricas e da primeira derivada (DTG) revelou que algumas amostras exibiram degradação concentrada na faixa de temperatura de 250 a 350 °C (Grupo 1 - G1). Em contraste, o Grupo 2 (G2) apresentou dois picos significativos de perda de massa, nos intervalos de 250 a 350 °C e 390 a 430 °C, respectivamente, detalhados na Figura 5.18.

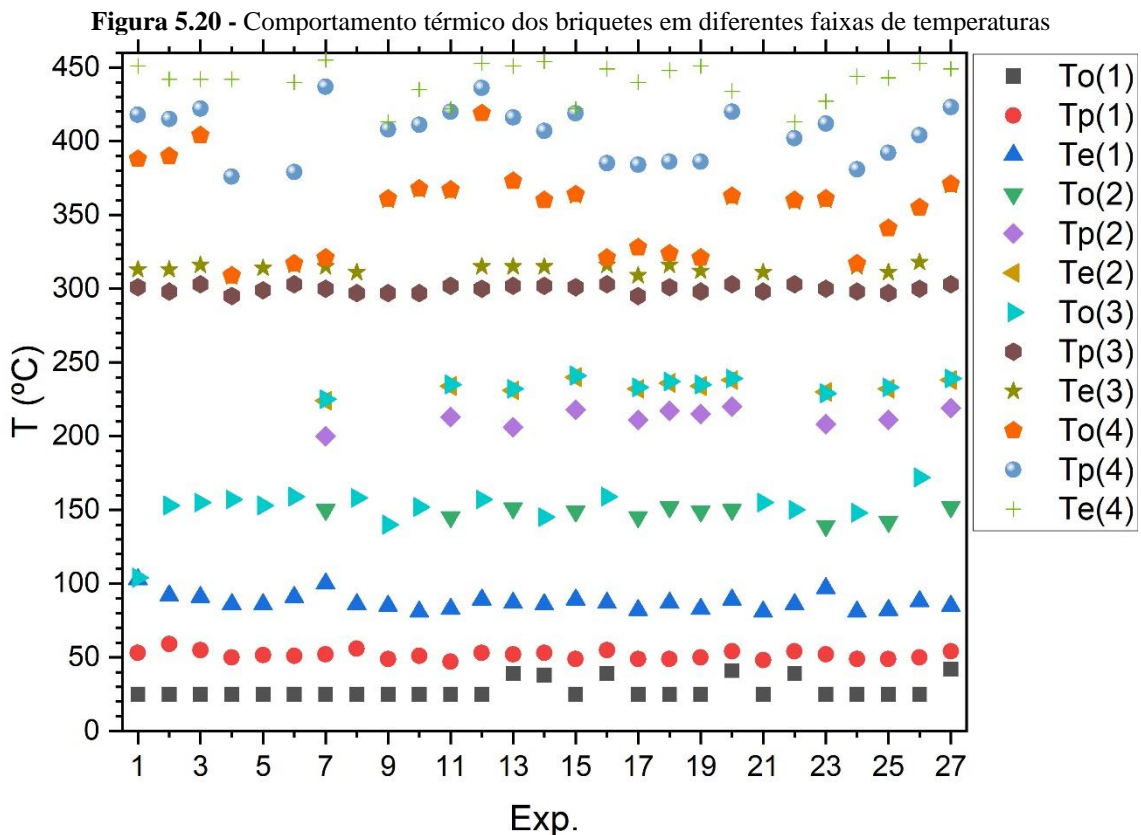
Os perfis termogravimétricos de G1 e G2 foram analisados detalhadamente, diferenciando-se em padrões de degradação térmica. A Figura 5.19 organiza esses resultados, com o Grupo 1 exibindo degradação térmica mais homogênea e concentrada entre 250 e 350 °C, sugerindo características similares de degradação. O Grupo 2, com degradação bifásica, indica componentes com diferentes estágios de estabilidade térmica na composição dos briquetes. A coluna 1 no gráfico é dedicada ao Grupo 1 e a coluna 2 ao Grupo 2. A primeira linha destaca as curvas TG e a segunda linha as respectivas derivadas DTG.



Fonte: O autor

A diferenciação entre G1 e G2 é fundamental para entender a dinâmica da liberação de energia dos briquetes e permite a otimização do seu uso como combustível em diferentes aplicações industriais. A análise gráfica proporcionou um entendimento aprofundado das propriedades térmicas dos materiais, o que é essencial para a seleção do briquete apropriado conforme o requisito específico do processo de combustão. Para obter informações detalhadas sobre as análises termogravimétricas (TG) e derivadas termogravimétricas (DTG) dos 27 experimentos, consulte o Apêndice B, onde os dados estão organizados da seguinte forma: Figura B.1 experimentos de 1 a 6, Figura B.2 - experimentos de 7 a 14, Figura B.3 – experimentos de 15 a 22 e Figura B.4 - experimentos de 23 a 27 e o 28 (extra).

Posteriormente, as temperaturas associadas a cada evento térmico foram determinadas: a temperatura inicial (T_o), marcando o início da perda de massa; a temperatura de pico (T_p), correspondendo ao ponto de máxima taxa de perda de massa; e a temperatura final (T_e), indicando o encerramento do processo de perda de massa. Essas temperaturas, relativas às quatro fases observadas, são claramente ilustradas na Figura 5.20.

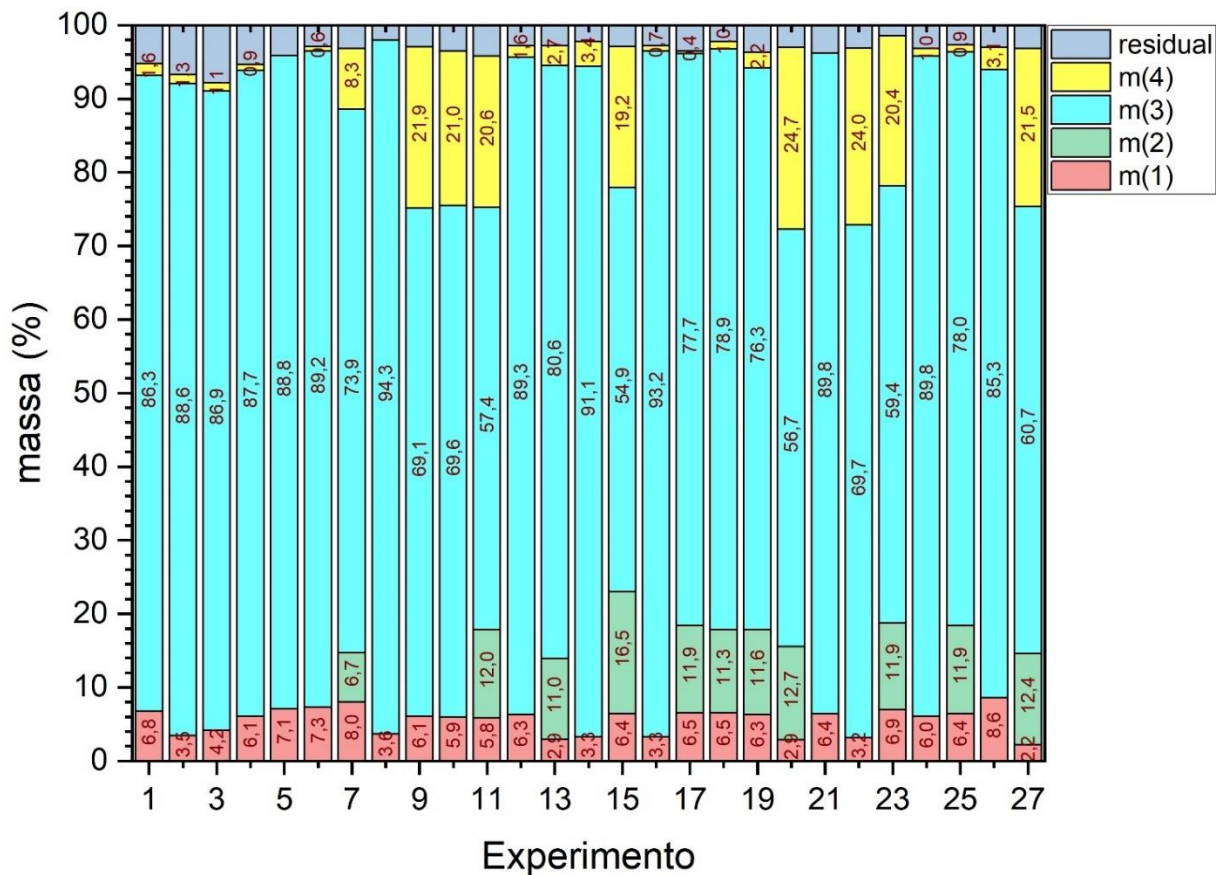


Fonte: O autor

Após a quarta fase, não se evidenciou perda de massa significativa, resultando em um resíduo inorgânico conhecido como cinzas, que resistiu a temperaturas de até 700 °C. Vale

ressaltar que a análise térmica realizada proporcionou entendimentos fundamentais acerca da estabilidade térmica e das propriedades dos briquetes em diversas condições, contribuindo de forma substancial para a compreensão do comportamento dos materiais durante o processo de termogravimetria. Além disso, quantificou-se a massa em cada uma das quatro fases analisadas. Cada fase compreende os intervalos entre a temperatura inicial (T_0) e a temperatura final de degradação (T_e), conforme apresentado na Figura 5.21.

Figura 5.21 – Teor de massa degradada em cada faixa do TG



Fonte: O autor

A primeira fase, denominada m(1), abrange temperaturas de 25 a 103 °C e corresponde à perda de umidade. A segunda fase, m(2), engloba a faixa de temperatura de 139 a 240 °C, com uma degradação mais acentuada da água residual em alguns casos, ocorrendo nos experimentos 7, 11, 13, 15, 17, 18, 19, 20, 23, 25 e 27. Em seguida, há uma terceira fase chamada m(3), com uma faixa de temperatura de 104 a 370 °C, exibindo a maior perda de massa em todos os experimentos. Nesta fase, hemicelulose, celulose e matéria volátil são degradadas, e nos experimentos em que a degradação não foi evidente na fase m(2), a água ligada é perdida. Em alguns experimentos, a degradação conclui nesta fase, como é o caso dos experimentos 5, 8 e 21,

degradando lignina e carbono fixo. Isso ocorre porque todas as etapas de degradação estão concentradas de uma vez só. Finalmente, há uma última fase, m(4), compreendendo a faixa de temperatura de 321 a 455 °C, onde aqueles que não se degradaram completamente na fase anterior passam pela degradação de lignina e carbono fixo. Os valores da massa residual, que são a parte inorgânica, ou seja, as cinzas, estão apresentadas no Quadro 5.2.

Quadro 5.2 – Teor de Cinzas em ordem crescente no final do processo de Termogravimetria (TG)

Experimento	23	8	14	18	25	12	13	16	15	6	9	20	26	22
Cinzas TG	1,405	2,098	2,211	2,229	2,68	2,772	2,777	2,788	2,916	2,925	2,969	2,992	3,024	3,136
Experimento	27	7	24	17	10	19	21	11	5	1	4	2	3	
Cinzas TG	3,157	3,187	3,195	3,497	3,515	3,696	3,883	4,221	4,744	5,232	5,322	6,688	7,798	

Fonte: O autor

Como combustível eficiente, não é desejável que os briquetes se degradem rapidamente, considerando que tais materiais são tipicamente utilizados em fornos de padaria e caldeiras. Portanto, é preferível utilizar aqueles que conseguiram atingir a quarta fase de degradação térmica, correspondente ao G2, e tenham consumido pelo menos 5% de sua massa nessa fase, com resíduo mínimo ao final da combustão. Conseqüentemente, os briquetes que atenderam a este critério foram os obtidos nos experimentos 7, 9, 10, 15, 20, 22, 23 e 27. Dentre estes experimentos, a maioria teve um conteúdo de óleo superior a 10%, exceto pelo experimento 7, que registrou 5%. A presença de cinzas nos combustíveis está inversamente proporcional à sua eficiência energética, dessa forma é prudente dar preferência aqueles briquetes que apresentaram o menor teor de cinzas, em destaques são aqueles que estão disponíveis na primeira linha do Quadro 5.2.

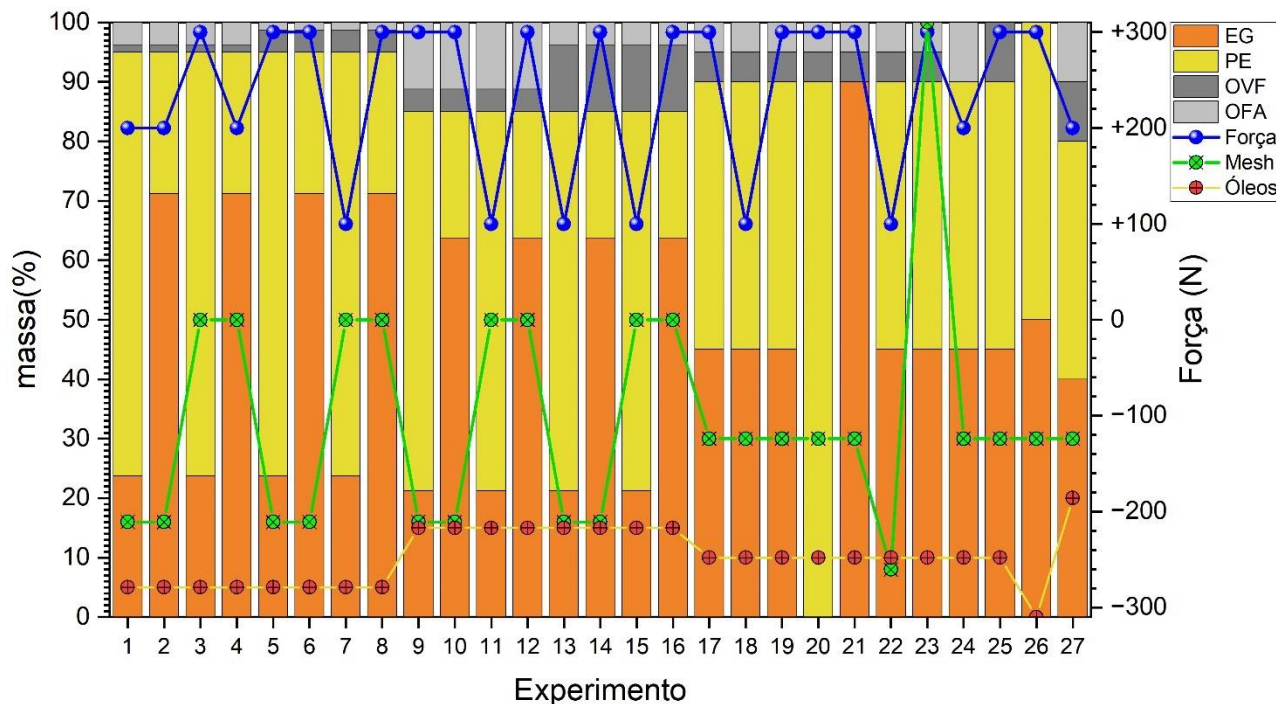
5.4.6 Resistência Mecânica

Os resultados do ensaio de compressão são apresentados na Figura 5.22. A Força (N) é lida no eixo y direito, variando de -300 a +300 N. No eixo y esquerdo, a variável "massa (%)" refere-se ao percentual de massa de EG, PE, OVF, OFA e Óleos (a soma dos óleos OVF e OFA). A mesma escala foi utilizada para ler a granulometria em mesh com os valores 8, 16, 30, 50 e 100 mesh.

Analisando a relação entre a carga de ruptura e o teor de cada matéria-prima, a granulometria, o teor de óleos totais, não foi constatada nenhuma correlação significativa. Na seção 5.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA é apresentada uma análise estatística sobre a resistência mecânica

relacionando com outros fatores. Os briquetes que se romperam com a carga de 300 N foram: 3, 5, 6, 8, 9, 10, 12, 14, 16, 17, 19, 20, 21, 23, 25 e 26.

Figura 5.22 - Carga de ruptura do briquete x características de cada briquete



Fonte: O autor

5.4.7 Análise do Custo por Tonelada de Briquete

A análise do custo de produção de cada briquete foi realizada levando em consideração o custo dos materiais brutos envolvidos em cada fração de massa dos briquetes, bem como o custo total dos óleos utilizados por tonelada, conforme a Tabela 5.5. Foi levada em consideração a cotação de 5 reais por dólar americano de modo que simplifique os cálculos e globalize os resultados de modo que seja possível comparar com outras produções ao redor do mundo.

Tabela 5.5 - Cálculo dos custos dos briquetes por matérias-primas.

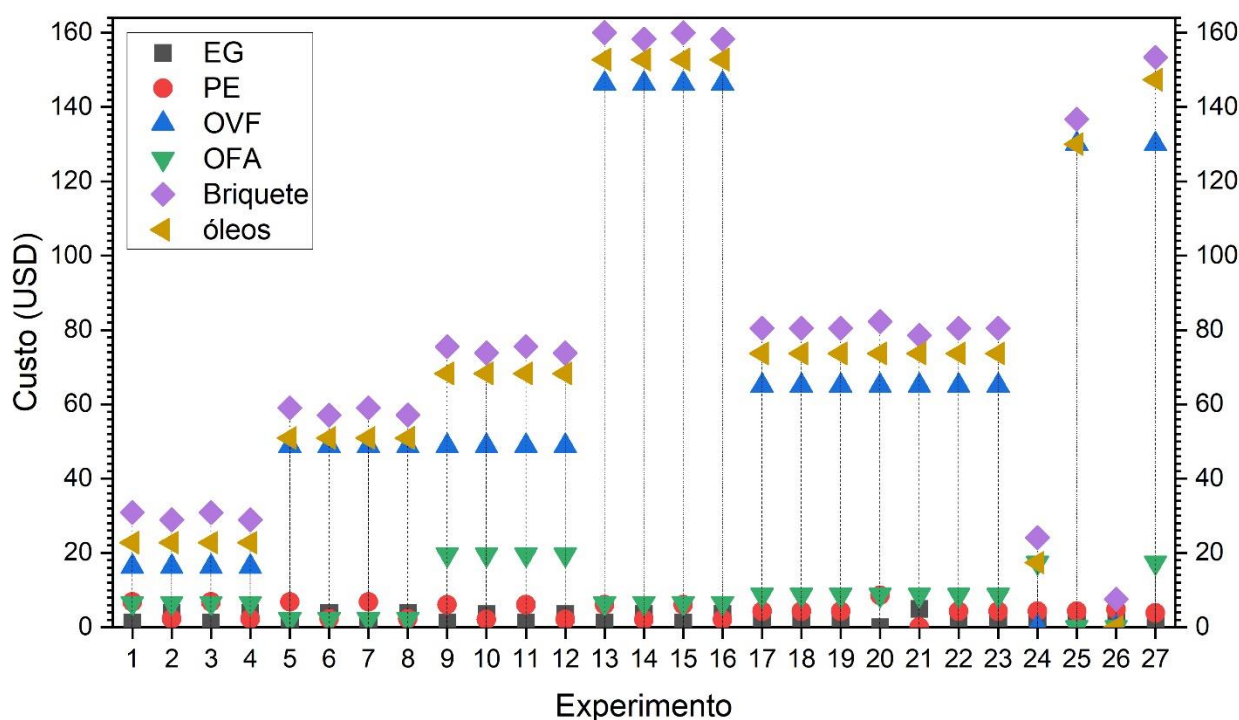
Matéria-prima	ρ (kg/m ³)	Custo (BRL/m ³)	Custo (BRL/t)	Custo (USD/m ³)	Custo (USD/t)
EG	730	R\$ 20,00	R\$ 27,40	\$ 4,00	\$ 5,48
PE	419	R\$ 20,00	R\$ 47,73	\$ 4,00	\$ 9,55
OVF	898	R\$ 5.837,00	R\$ 6.500,00	\$ 1.167,40	\$ 1.300,00
OFA	922	R\$ 800,00	R\$ 867,68	\$ 160,00	\$ 173,54

Nota: A cotação adotada foi de 1 USD = 5 BRL.

Fonte: O autor.

Esta análise revela que os óleos representam a maior parcela do custo, observando o resultado em tonelada, o OVF é notavelmente mais caro, custando aproximadamente 7,5 vezes mais do que o OFA por unidade de massa. Vale destacar se considerar que a obtenção do OFA seja de forma gratuita ou mais barata, sem dúvida seu uso se torna muito mais vantajoso em comparação ao OVF, mesmo havendo custos adicionais como a mão de obra. Os custos associados à serragem são significativamente menores em comparação aos dos óleos, apesar do custo da serragem de *Eucalyptus grandis* (EG) ser aproximadamente 1,74 vezes maior que o da serragem de *Pinus elliottii* (PE) por unidade de massa. Apesar do valor em metro cúbico ser o mesmo, mas ao converter para tonelada, há uma diferença devido a densidade, ou seja, a cada metro cúbico comprado, é mais vantajoso o EG por ser mais denso. Contudo, a escolha entre estes dois tipos de serragem tem um impacto relativamente menor nas economias gerais de custo. Ao analisar a Figura 5.23 é possível observar o custo de cada briquete expresso em dólar americano (USD). Esta análise não quantificou a mão de obra, frete e nem outros gastos adicionais, puramente se utilizou os custos das matérias-primas da região.

Figura 5.23 – Custo (USD) do Briquete e do Material Bruto em Função do Número do Experimento.



Fonte: O autor

Os experimentos que envolveram uma alta proporção de OVF resultaram em custos significativamente mais elevados em comparação um com outro, tornando seu uso desvantajoso. Isso é evidente em casos como os experimentos 13, 14, 15, 16, 25 e 27, onde o uso

deste óleo não é recomendado, a menos que a própria indústria, que tem acesso a este óleo específico, pretenda produzir esses briquetes. Por outro lado, os demais experimentos podem ser considerados como opções viáveis, baseadas em análises adicionais.

5.4.8 Vida Útil do Briquete

A análise da vida útil dos briquetes é fundamental para determinar sua aplicabilidade prática e eficiência como fonte de energia ao longo do tempo. Neste estudo, os briquetes foram armazenados em condições controladas para simular um ambiente de armazenamento ideal. Cada briquete foi acondicionado individualmente em potes de plástico, protegidos da luz e mantidos em uma caixa grande para minimizar a exposição a variáveis ambientais externas. Esta seção discute os resultados observados durante o período de armazenamento.

a) t0 – Medição Inicial: os briquetes foram armazenados logo após a produção e os primeiros testes. As medições iniciais registraram as dimensões e características físicas.

b) t3 – Medição após três meses: após três meses foi realizada a segunda medição. Durante este período inicial, observou-se uma estabilidade notável em termos de integridade física e características visuais. As medições dimensionais realizadas após três meses indicaram uma variação mínima, sugerindo uma boa preservação da estrutura dos briquetes.

c) t10 – Medição após dez meses: uma terceira avaliação foi conduzida após dez meses de produção. As medições indicaram continuidade na estabilidade observada inicialmente, com poucas alterações nas medidas físicas. A aparência visual dos briquetes permaneceu praticamente inalterada, exceto pela amostra 15, que se despedaçou após as medições. Fotografias de todos os briquetes foram tiradas após o ocorrido.

d) t15 – Medição após quinze meses: a partir do décimo quinto mês de armazenamento, alguns briquetes começaram a mostrar sinais de fragilidade e desintegração. Esse fenômeno foi progressivamente observado em um número maior de amostras, sugerindo o início de um processo de deterioração estrutural.

e) t18 – Medição após dezoito meses: ao atingir dezoito meses de armazenamento, a maioria dos briquetes apresentou desintegração total, indicando o fim da sua vida útil sob as condições de teste estabelecidas.

Notou-se que dentre aqueles que apresentaram com os maiores valores de volumes iniciais, conforme mostrado na Figura 5.12, a maioria se desintegrou, como é o caso dos

briquetes 7, 11, 13 e 15. Seguidos dos briquetes que apresentaram variação de volume acentuada, conforme visto na Figura 5.12 que é um fator contribuinte para a desintegração, quase todos se desintegraram, que é o caso dos experimentos 2, 4, 10, 18 e 23.

Os resultados sugerem que os briquetes possuem uma vida útil efetiva de até cerca de quinze meses em condições de armazenamento apropriadas, sendo recomendado o seu uso dentro desse período para assegurar o desempenho energético ótimo. Observou-se que briquetes com massa específica inicial mais alta e volume inicial reduzido são menos suscetíveis a alterações estruturais significativas, evidenciando que uma maior massa específica inicial contribui para a estabilidade e durabilidade do briquete.

Mudanças mínimas em volume e massa específica são essenciais para manter a integridade dos briquetes. Uma variação considerável, principalmente na redução da massa específica, pode ser um sinal de fragilização, possivelmente devido à perda de massa interna ou ao incremento na porosidade. Tais fatores são determinantes para a resistência e eficácia dos briquetes enquanto combustível. Quando o aumento do volume é expressivo, a resistência mecânica dos briquetes pode ser comprometida.

5.4.9 Fluxograma Base Escolhido

O fluxograma base foi estabelecido utilizando regras heurísticas e algoritmos decisórios, focando na produção de briquetes de alta qualidade e eficiência econômica. Levando em consideração os resultados do Poder Calorífico Superior (PCS) e a variação da massa específica aparente dos briquetes, além do aspecto de economia no uso do óleo de frango assado, as regras escolhidas para cada subsistema foram alinhadas com o objetivo de trazer uma diferenciação competitiva no processo tradicional de produção de briquetes:

- a) Subsistema de escolha da serragem: 2ª regra.
- b) Subsistema da granulometria: 1ª regra.
- c) Subsistema da escolha do óleo de frango: 3ª regra.
- d) Subsistema da fração mássica: 1ª regra.

Essa abordagem resultou na seleção do Experimento 9, correspondente ao fluxograma número [262] com a sequência: EG025 – 016M – CVO025 – o15s085, representando 21.25% de EG, 63.75% de PE, 3.75% de OVF e 11.25% de OFA em massa.

5.4.10 Vizinhos Estruturais Definidos

A seleção de vizinhos estruturais é realizada modificando apenas um subsistema, mantendo os demais inalterados sempre que possível. Os critérios para selecionar os vizinhos estruturais são: manter o conteúdo total de óleo em 15% (o15s085), não aumentar o conteúdo de OVF além dos 25% estabelecidos (OVF025) na mistura, a granulometria pode ser qualquer uma por não trazer diferença significativa e não selecionar quantidade desconhecida de serragem simbolizado por “EG???” , nem de teor entre óleos de frango simbolizado por “CVO???” e nem proporção desconhecida de óleos totais no briquete (o<=20%). Definiu-se os vizinhos estruturais obtidos em ordem numérica ascendente são: 46, 226, 256, 298, 334, 370, 406, 478, 694 e 910. Fluxogramas não foram selecionados com vizinhos estruturais foram: 259, 260, 261, 263, 264, 268, 274, 280, 286 e 1126. Em resumo, o fluxograma primário e vizinhos estruturais são apresentados na Tabela 5.6, mostrando as rotas tecnológicas de cada subsistema envolvido.

Tabela 5.6 - Vizinhos estruturais por subsistema

Subsistema	2	3	4	5	Fluxogramas	Selecionado
Fluxograma primário	EG025	016M	OVF025	o15s085	[0262]	--
Seleção de serragem	EG000	016M	OVF025	o15s085	[0046]	Sim
	EG050	016M	OVF025	o15s085	[0478]	Sim
	EG075	016M	OVF025	o15s085	[0694]	Sim
	EG100	016M	OVF025	o15s085	[0910]	Sim
	EG???	016M	OVF025	o15s085	[1126]	Não
Granulometria	EG025	008M	OVF025	o15s085	[0226]	Sim
	EG025	030M	OVF025	o15s085	[0298]	Sim
	EG025	050M	OVF025	o15s085	[0334]	Sim
	EG025	100M	OVF025	o15s085	[0370]	Sim
	EG025	NoM	OVF025	o15s085	[0406]	Sim
Seleção de óleo	EG025	016M	OVF000	o15s085	[0256]	Sim
	EG025	016M	OVF050	o15s085	[0268]	Não
	EG025	016M	OVF075	o15s085	[0274]	Não
	EG025	016M	OVF100	o15s085	[0280]	Não
	EG025	016M	OVF???	o15s085	[0286]	Não
Fração de massa	EG025	016M	OVF025	o00s100	[0259]	Não
	EG025	016M	OVF025	o05s095	[0260]	Não
	EG025	016M	OVF025	o10s090	[0261]	Não
	EG025	016M	OVF025	o20s080	[0263]	Não
	EG025	016M	OVF025	o<=20%	[0264]	Não

Fonte: O autor

5.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para compreender os fatores que influenciam cada resultado, foi realizada uma análise estatística abrangente. Esta análise correlaciona diversas variáveis relacionadas ao experimento, incluindo poder calorífico superior (PCS), resistência mecânica medida pela força aplicada, variação da massa específica ($\Delta\rho$ %), variação da densidade energética (ΔDE %), e o teor de cinzas obtido na termogravimetria (TG). Além disso, foram consideradas variáveis como a fração mássica de cada matéria-prima, fração mássica total de óleos, e granulometria em Mesh. A análise estatística é crucial para identificar quais fatores têm impacto significativo nos resultados, adotando um nível de significância de $p < 0,05$. Os resultados dessa análise estão apresentados no Quadro 5.3.

Quadro 5.3 - Análise estatística do tipo básica avaliando o valor p abaixo da diagonal com valor 1 e r acima da diagonal evidenciando na cor vermelha os dados significativos para $p < 0,05$.

Variável	Mesh	EG (%)	PE (%)	OVF (%)	OFA (%)	óleos totais (%)	PCS (MJ/kg)	F (N)	$\Delta\rho$ (%)	ΔDE (%)	CinzasTG
Mesh	1	0,3249	-0,284	-0,0994	-0,1526	-0,1855	-0,2268	-0,0273	0,019	0,184	-0,1718
EG (%)	p=,098	1	-0,9757	-0,0749	-0,0749	-0,1103	-0,236	0,3343	0,0058	0,173	-0,2215
PE (%)	p=,151	p=,000	1	-0,0749	-0,0749	-0,1103	0,0382	-0,3027	0,0432	0,0199	0,1879
OVF (%)	p=,622	p=,710	p=,710	1	-0,0769	0,6794	0,5192	-0,1135	-0,1927	-0,4883	-0,1381
OFA (%)	p=,447	p=,710	p=,710	p=,703	1	0,6794	0,6993	-0,0811	-0,1089	-0,6996	0,3445
Óleos totais (%)	p=,354	p=,584	p=,584	p=,000	p=,000	1	0,8968	-0,1432	-0,222	-0,8742	0,152
PCS (MJ/kg)	p=,255	p=,236	p=,850	p=,006	p=,000	p=,000	1	-0,1115	-0,281	-0,9674	0,1993
Força (N)	p=,893	p=,088	p=,125	p=,573	p=,688	p=,476	p=,580	1	-0,1356	0,0536	0,0805
$\Delta\rho$ (%)	p=,925	p=,977	p=,831	p=,336	p=,589	p=,266	p=,156	p=,500	1	0,3085	0,0611
ΔDE (%)	p=,358	p=,388	p=,922	p=,010	p=,000	p=,000	p=,000	p=,791	p=,117	1	-0,2054
CinzasTG	p=,392	p=,267	p=,348	p=,492	p=,078	p=,449	p=,319	p=,690	p=,762	p=,304	1

Fonte: O autor

Esta análise permite identificar as relações entre as variáveis. Nota-se que o poder calorífico superior (PCS) tem uma correlação direta com o óleo visceral de frango (OVF), com $r = 0,5192$ e $p = 0,006$, e com o óleo de frango assado (OFA), com $r = 0,6993$ e $p = 0,000$. O PCS também está diretamente relacionado aos óleos totais (soma do OVF e OFA), com $r = 0,8968$ e $p = 0,000$, indicando que um maior teor de óleo nos briquetes resulta em um PCS mais alto. Observa-se também uma correlação inversa entre o PCS e a variação da densidade energética (ΔDE), com $r = -0,9674$ e $p = 0,000$, devido ao uso do PCS na equação para calcular a DE. Não foram encontradas correlações significativas da força aplicada com outras variáveis, indicando que não é possível determinar quais tipos de briquetes tiveram melhor desempenho em termos de resistência mecânica. Similarmente, não houve correlações relevantes para a variação de massa específica.

5.6 OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (ODS)

Após analisar cada um dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU (ODS), selecionou-se o seguinte:

- a) ODS 7 - Energia Acessível e Limpa: os briquetes de biomassa oferecem uma solução viável para energia renovável.
- b) ODS 9 - Indústria, Inovação e Infraestrutura: inovações no processo de produção dos briquetes reforçam a infraestrutura energética sustentável.
- c) ODS 12 - Consumo e Produção Responsáveis: a pesquisa evidencia práticas sustentáveis de produção, utilizando resíduos agroindustriais.
- d) ODS 13 - Ação Contra a Mudança Global do Clima: a utilização da biomassa residual ao invés de consumir recursos naturais apenas para a produção de briquetes de biomassa contribui para a redução de emissões de gases de efeito estufa.
- e) ODS 15 - Vida Terrestre: o estudo promove o uso sustentável de recursos florestais residuais e a conservação da biodiversidade.

5.7 CONCLUSÕES PONTUAIS

A análise preliminar indica que a serragem de *Eucalyptus grandis* (EG) e *Pinus elliottii* (PE) não apresentam diferenças significativas em termos gerais. Observa-se que o PE exibe um valor ligeiramente superior de Poder Calorífico Superior (PCS) de 19,701 MJ/kg, comparado ao EG com 19,505 MJ/kg. Entretanto, os briquetes de EG com granulometria de #100 mesh demonstraram uma variação de volume menor em comparação com os briquetes de PE da mesma granulometria, sugerindo uma maior resistência mecânica nos briquetes que contêm uma maior proporção de EG, mas estes valores são bem sutis não sendo tão relevante quanto definir qual escolher.

Quanto ao uso de óleo de frango é bem promissor tanto o OVF e o OFA usados individual ou misturados contribuindo para o aumento significativo do PCS, diminuição no teor de cinzas, melhora na performance na análise termogravimétrica. No entanto a proporção mássica deve ser no máximo 15% de óleos, pois a partir deste ponto traz perdas por exsudação do óleo e diminuição da resistência mecânica. Deve ser considerado também a questão econômica, pois o OVF possui um custo elevado com relação ao OFA.

Realizou-se uma análise estatística, utilizando o teste de Turkey considerando o intervalo de confiança em 95%, com as variáveis independentes (X_1 a X_4) com a variável resposta o

poder calorífico superior (PCS). Em outro momento fez uma análise estatística contemplando todas as variáveis existente uma em relação a outra. Confirmou a relação do PCS com os óleos e houve uma correlação com ΔDE e uma correlação dos óleos com ΔDE . As demais variáveis não foram significativas.

CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES

Nos experimentos realizados, verificou-se a formação adequada dos briquetes, embora, em determinadas amostras, tenha ocorrido desprendimento de fragmentos. Notou-se que os briquetes com 20% de teor de óleo durante a prensagem exibiram exsudação de óleo, o que indica a necessidade de limitar o teor de óleo a um máximo de 15% para minimizar perdas. As análises de PCS demonstraram que um aumento na quantidade de óleo na composição dos briquetes tende a elevar o PCS, sugerindo a preferência por briquetes com maior teor de óleo. O óleo contribui não apenas para a coesão e resistência mecânica dos briquetes, mas também atua como aglutinante e intensificador energético, refletido no acréscimo do PCS. Dentre os 27 experimentos conduzidos, salienta-se o experimento número 27, associado ao fluxograma [0521] com 20% de óleo, que, apesar de exibir o maior valor de Poder Calorífico Superior (PCS), apresentou incertezas quanto à retenção de óleo após a fabricação, comprometendo sua viabilidade. Observa-se que a árvore de estados compreende 1296 fluxogramas, agrupados em conjuntos de 6.

Constata-se que a produção de briquetes utilizando serragem e óleo de frango é viável e ecologicamente favorável, proporcionando uma aplicação útil para esses resíduos e uma alternativa para a fabricação de briquetes mais resistentes, sem a necessidade de insumos adicionais, como aglutinantes sintéticos. Considerando a existência de uma planta de produção de briquetes, os custos mais relevantes envolvem primordialmente a logística das matérias-primas. O óleo visceral de frango, também conhecido como gordura abdominal de frango, implica em custos elevados, sendo recomendável seu uso somente por indústrias produtoras. Por outro lado, o óleo de frango assado, usualmente adquirido de lanchonetes e padarias, apresenta um custo reduzido, em torno de R\$ 1,00 por litro, constituindo uma opção econômica.

Quanto à seleção das serragens, tanto *Eucalyptus grandis* (EG) quanto *Pinus elliottii* (PE) podem ser utilizados, isoladamente ou em combinação, dependendo exclusivamente dos custos de aquisição de cada um, pois a diferença entre eles foi sutil. A separação das serragens por faixas granulométricas não se mostrou significativa, embora tenha sido observada uma melhoria sutil na faixa de #8 até #30 mesh.

Experimento 9, correspondente ao fluxograma ótimo [0262], representando pela sequência: EG025 – 016M – CVO025 – o15s085, composto por 21.25% de EG, 63.75% de PE, 3.75% de OVF e 11.25% de OFA em massa. Os vizinhos estruturais são 46, 226, 256, 298, 334, 370, 406, 478, 694 e 910.

Esta tese traz grandes contribuições tanto a nível acadêmico quanto tecnológico ao atual estado da arte, permitindo que outros pesquisadores explorem este trabalho para desenvolver

alternativas na produção de briquetes a partir de serragens com óleo e gorduras. Adicionalmente, fornece importantes contribuições para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 7, 9, 12, 13 e 15. Por meio da produção de briquetes de biomassa, a pesquisa apresenta uma alternativa energética sustentável, promovendo inovação tecnológica. Essa abordagem contribui não só para a mitigação das mudanças climáticas e a preservação da vida terrestre, mas também para padrões de consumo e produção responsáveis. A relevância acadêmica e tecnológica deste trabalho reside na criação de fundamentos para pesquisas futuras no desenvolvimento de soluções energéticas sustentáveis e na gestão eficiente de recursos.

CAPÍTULO 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dessa tese, outros pesquisadores poderão investigar a produção de briquetes utilizando as mesmas matérias-primas ou parte delas, fazendo outras combinações para explorar mais este estudo. Será possível ainda utilizar outras serragens e gordura animal ou vegetal para produzir briquetes utilizando as metodologias abordadas neste estudo. É possível adaptar este estudo para a produção de péletes.

- a) Investigação das Variações de Volume: Investigar mais a fundo as causas das variações de volume e como elas podem ser mitigadas ou controladas.
- b) Influência da Granulometria: Investigar mais a fundo a influência da granulometria de uma só serragem de madeira se traz diferenças significativas ou não na produção de briquetes.
- c) Melhoria dos Ensaio Mecânicos: Utilizar máquinas de ensaios mecânicos para briquetes com maior sensibilidade na aferição da aplicação de carga ou utilizar um Texturômetro para esta aplicação.
- d) Desenvolvimento de Novas Composições: Explorar outras combinações de matérias-primas, incluindo diferentes tipos de serragens e gorduras, para otimizar a produção de briquetes.
- e) Otimização de Processos: Desenvolver métodos para otimizar o processo de produção de briquetes a partir do que foi apresentado nesta tese, visando aumentar a eficiência, reduzir custos e melhorar a qualidade do produto.
- f) Análise da Viabilidade Econômica: Avaliar a viabilidade econômica da produção de briquetes, considerando os custos de matéria-prima, mão de obra, produção e distribuição.
- g) Análise de Mercado e Estratégias de Comercialização: Investigar o mercado potencial para briquetes, identificando os principais consumidores, canais de distribuição e estratégias de marketing eficazes para a promoção do produto.
- h) Desenvolvimento de Tecnologias de Combustão Eficiente: Pesquisar e desenvolver tecnologias de combustão que otimizem o uso de briquetes em diferentes aplicações, maximizando a eficiência energética e minimizando as emissões poluentes.
- i) Avaliação do Potencial de Redução de Emissões: Estudar o potencial dos briquetes em contribuir para a redução de emissões de gases de efeito estufa em comparação com combustíveis fósseis, considerando diferentes cenários de uso.
- j) Desenvolvimento de Sistemas de Logística e Distribuição: Investigar estratégias para otimizar a logística e distribuição dos briquetes, visando reduzir custos e impactos ambientais associados ao transporte e armazenamento.

REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR 7222: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 5, 1994.
- ABPA. Relatório Anual. **Associação Brasileira de Proteína Animal**, p. 75, 2023.
- BARROS, L. DE O. **Densidade Energética De Briquetes Produzidos a Partir De Resíduos Agrícolas**. [s.l: s.n.].
- BUZIN, P. J. W. K. DE. **Desenvolvimento de Briquetes Autorredutores a Partir de Carepas de Processamento Siderúrgico para Utilização em Forno Elétrico a Arco**. Porto Alegre: UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, 2009.
- CARVALHO, N. R. DE et al. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DA BIOMASSA USADA COMO COMBUSTÍVEL SÓLIDO EM UMA CALDEIRA. **Química Nova**, v. 44, n. 1, p. 35–40, 2021.
- CEPEA/ESALQ/USP. **Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada CEPEA/ESALQ/USP**. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/br>>. Acesso em: 8 set. 2021.
- CRISÓSTOMO, M. C. et al. Caracterização Energética De Madeira De E. Grandis, Pinus Sp., T. Vulgaris E P. Lecointei. p. 49–61, 2021.
- DA SILVA, M. J. et al. Engine-generator diesel cycle under five proportions of biodiesel and diesel. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 3, p. 320–326, 2012.
- DA SILVA, S. B. et al. Influence of physical and chemical compositions on the properties and energy use of lignocellulosic biomass pellets in Brazil. **Renewable Energy**, v. 147, p. 1870–1879, 2020.
- DAL-BÓ, V. et al. Process synthesis for coffee husks to energy using hierarchical approaches. **Renewable Energy**, v. 142, p. 195–206, 2019.
- DAL-BÓ, V. **ESTUDO DA SECAGEM DA POLPA DO ABACATE (Persea americana)**. [s.l.] Universidade Federal de São Carlos, 2021.
- DE MORAES, M. D. et al. Characterization of Khaya ivorensis (A. Chev) biomass, charcoal and briquettes. **SCIENTIA FORESTALIS**, v. 47, n. 121, p. 34–44, mar. 2019.
- FILIPPETTO, D. Briquetagem de resíduos vegetais : viabilidade técnico-econômica e potencial de mercado - dissertação de mestrado. **Universidade Estadual De Campinas**, p. 61, 2008.
- FLORES, B. D. et al. Comportamento De Carbonização De Briquetes De Ferro-Coque. p. 5285–5296, 2014.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATION, F. **Food and Agriculture Organization of the United Nation**. Disponível em: <<https://www.fao.org/faostat/en/#data/QI>>.

GIL, M. V. et al. Mechanical durability and combustion characteristics of pellets from biomass blends. **BIORESOURCE TECHNOLOGY**, v. 101, n. 22, p. 8859–8867, nov. 2010.

GRANADO, M. P. P. et al. Effects of pressure densification on strength and properties of cassava waste briquettes. **Renewable Energy**, v. 167, p. 306–312, 2021.

IBGE. Sistema IBGE de Recuperação Automática. p. 1–3, 2021.

IBGE. **IBGE**.

JANKOVIĆ, B. et al. The assessment of spontaneous ignition potential of coals using TGA–DTG technique. **Combustion and Flame**, v. 211, p. 32–43, 2020.

KALIYAN, N.; MOREY, R. V. Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 3, p. 1082–1090, 2010.

KIRUBAKARAN, M.; ARUL MOZHI SELVAN, V. Experimental investigation on the effects of micro eggshell and nano-eggshell catalysts on biodiesel optimization from waste chicken fat. **Bioresource Technology Reports**, v. 14, p. 100658, 2021.

LIMA, J. L. et al. Impact of use of byproducts (chicken skin and abdominal fat) on the oxidation of chicken sausage stored under freezing. **Journal of Food Science**, v. 85, n. 4, p. 1114–1124, 1 abr. 2020.

LIPPEL. **Briquetes de Biomassa e Carvão**. Disponível em: <<https://www.lippel.com.br/artigos-academicos/briquetes-de-biomassa-e-carvao/?lng=br>>. Acesso em: 30 ago. 2021.

LOHRI, C. R. et al. Treatment technologies for urban solid biowaste to create value products: a review with focus on low- and middle-income settings. **REVIEWS IN ENVIRONMENTAL SCIENCE AND BIO-TECHNOLOGY**, v. 16, n. 1, p. 81–130, mar. 2017.

MENDOZA MARTINEZ, C. L. et al. Production and characterization of coffee-pine wood residue briquettes as an alternative fuel for local firing systems in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 123, p. 70–77, 2019.

NAÇÕES UNIDAS. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 3 mar. 2024.

NARZARY, A.; BRAHMA, J.; DAS, A. K. Utilization of waste rice straw for charcoal briquette production using three different binder. **Cleaner Energy Systems**, v. 5, n. April, p. 100072, 2023.

NASCIMENTO, L. P. SALMONELLA NO PROCESSO DE TRATAMENTO DE A qualidade da água e sua utilização no processamento avícola. p. 52–62, 2000.

OBI, O. F. Evaluation of the effect of palm oil mill sludge on the properties of sawdust briquette. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 1749–1758, 2015.

PARIKH, J.; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. **Fuel**, v. 84, n. 5, p. 487–494, 2005.

PERLINGEIRO, C. A. G. Engenharia de Processos. **Editora Blucher, São Paulo**, 2005.

RABAÇAL, M.; FERNANDES, U.; COSTA, M. Combustion and emission characteristics of a domestic boiler fired with pellets of pine, industrial wood wastes and peach stones. **Renewable Energy**, v. 51, n. x, p. 220–226, 2013.

RAVICHANDRAN, P.; CORSCADDEN, K. Comparison of gaseous and particle emissions produced from leached and un-leached agricultural biomass briquettes. **FUEL PROCESSING TECHNOLOGY**, v. 128, p. 359–366, 2014.

RÍOS-BADRÁN, I. M. et al. Production and characterization of fuel pellets from rice husk and wheat straw. **Renewable Energy**, v. 145, p. 500–507, 2020.

RODRIGUES, I.; GOMES, F.; CAVALCANTE, R. RELAÇÃO ENTRE PODER CALORÍFICO SUPERIOR E TEOR DE CINZAS DA MADEIRA DE UM CLONE DE EUCALIPTO CULTIVADO SOB DIFERENTES ESPAÇAMENTOS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE. n. 1, 2017.

SHOBHANA-GNANASERKHAR et al. Biodiesel production via simultaneous esterification and transesterification of chicken fat oil by mesoporous sulfated Ce supported activated carbon. **Biomass and Bioenergy**, v. 141, n. August, p. 105714, 2020.

SOARES, L. DE S. et al. Utilização de Resíduos de Borra de Café e Serragem na Moldagem de Briquetes e Avaliação de Propriedades. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 20, n. 2, p. 550–560, jun. 2015.

TAKAMATSU, T. The nature and role of process systems engineering. **Computers and Chemical Engineering**, v. 7, n. 4, p. 203–218, 1983.

TEÓFILO, R. F.; FERREIRA, M. M. C. Quimiometria II: planilhas eletrônicas para cálculos de planejamentos experimentais, um tutorial. **Química Nova**, v. 29, n. 2, p. 338–350, 2006.

TSUCHIYA, Y.; YOSHIDA, T. Pelletization of brown coal and rice bran in Indonesia: Characteristics of the mixture pellets including safety during transportation. **Fuel Processing Technology**, v. 156, p. 68–71, 2017.

TUMULURU, J. S. et al. Erratum: A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 5, n. 6, p. 720, 2011.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA), F. A. S. **PSD Online**. Disponível em: <<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/home>>. Acesso em: 11 jan. 2024.

VALDES, C. F. et al. Energy evaluation of pelletized mixtures of IWTP sludge and coal-fired boiler ashes by co-combustion: Identification of synergistic effects. **APPLIED THERMAL ENGINEERING**, v. 124, p. 191–201, 2017.

VIJAY, M.; KRISHNAIAH, D. Evaluation of Thermal and Mechanical Analysis for Loose Biomass Making Briquettes. **International Journal for Innovative Research in Science & Technology**, v. 3, n. 02, p. 24–27, 2016.

WU, S. et al. High-strength charcoal briquette preparation from hydrothermal pretreated biomass wastes. **FUEL PROCESSING TECHNOLOGY**, v. 171, p. 293–300, mar. 2018.

YANG, H. et al. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, v. 86, n. 12–13, p. 1781–1788, 2007.

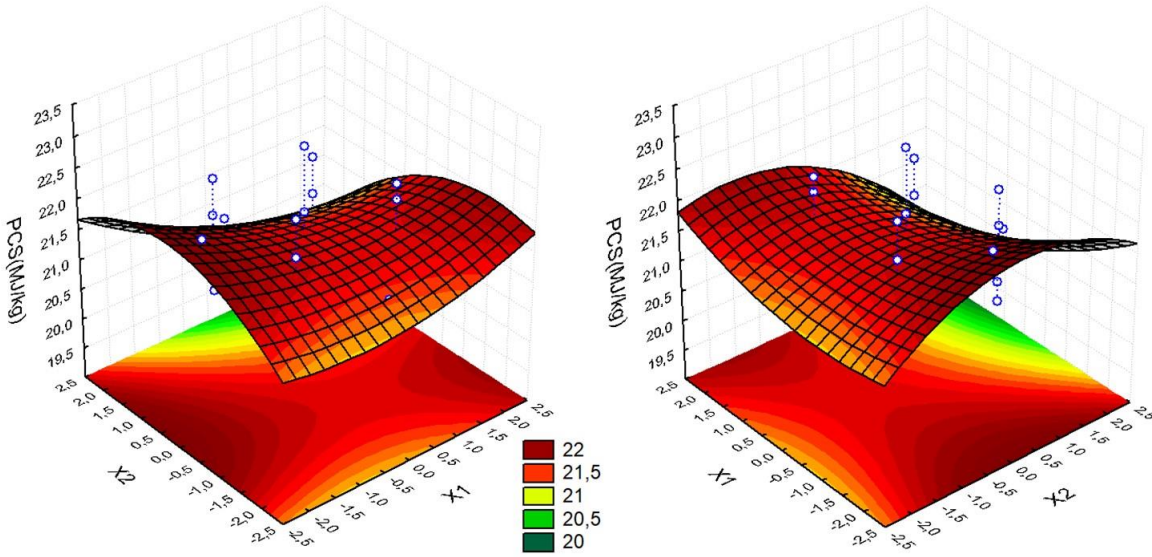
ZANELLA, K. Produção de briquetes de carvão vegetal por meio do beneficiamento do bagaço da laranja (*Citrus sinensis*) Produção de briquetes de carvão vegetal por meio do beneficiamento do bagaço da laranja (*Citrus sinensis*). 2018.

ZENG, T. et al. Blended biomass pellets as fuel for small scale combustion appliances: Effect of blending on slag formation in the bottom ash and pre-evaluation options. **Fuel**, v. 212, n. September 2016, p. 108–116, 2018.

APÊNDICE A SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DO PCS

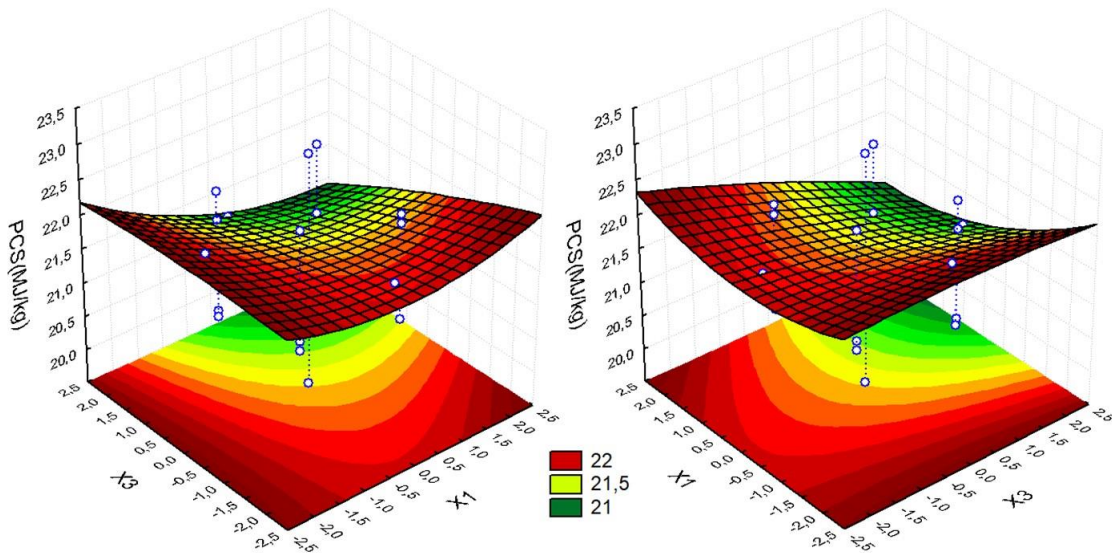
Todas os seis (6) gráficos projetados possuem MS Residual = 0,0597.

Figura A.1 – Superfície de resposta de X1-Proporção das Serragens entre a fração mássica de serragem na mistura, X2-Granulometria em Mesh das Serragens versus PCS.



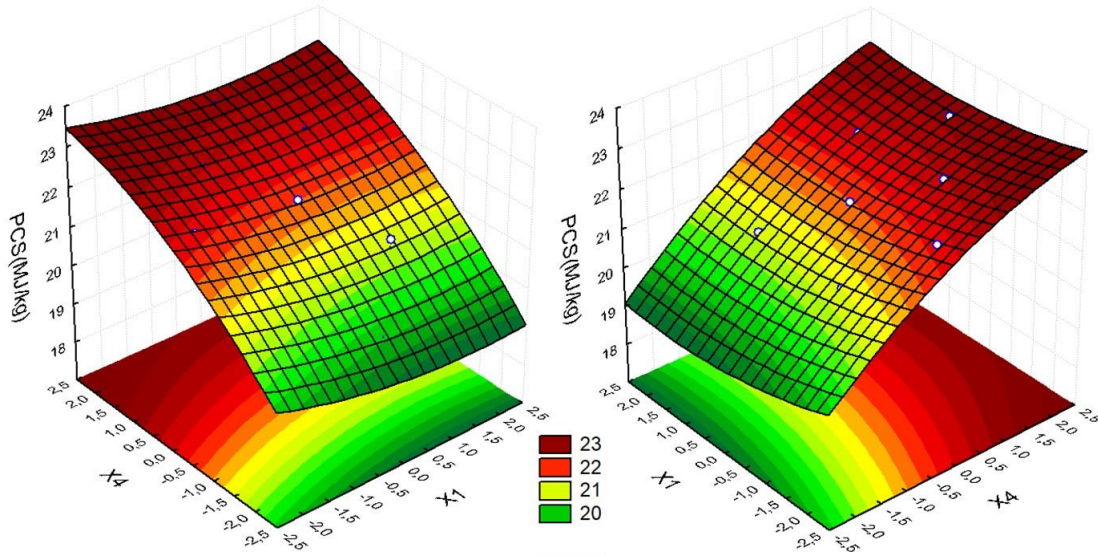
Fonte: O autor.

Figura A.2 – Superfície de resposta de X1-Proporção das Serragens entre a fração mássica de serragem na mistura, X3-Proporção dos óleos de frango na fração mássica dos óleos na mistura versus PCS.



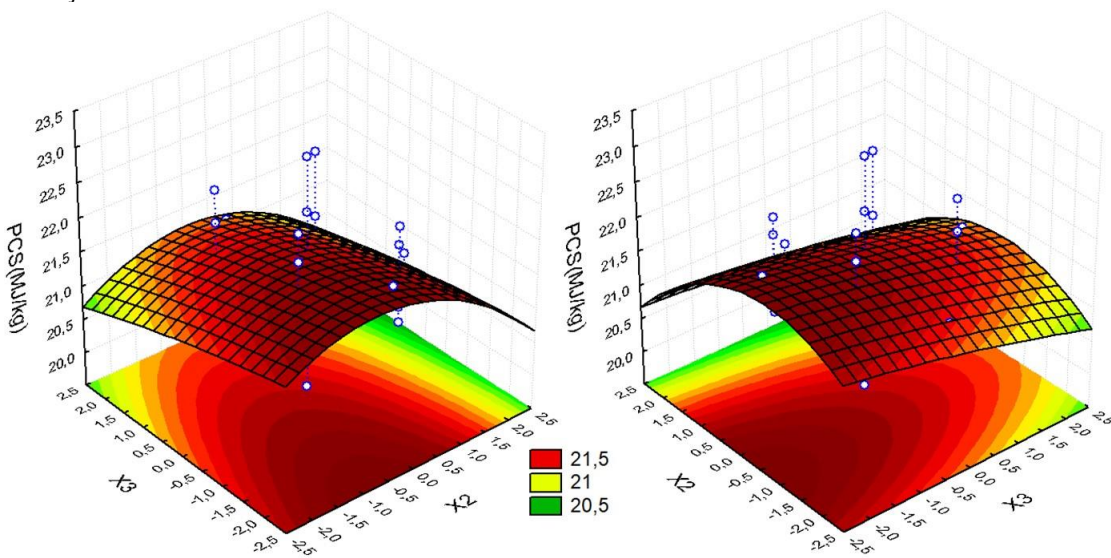
Fonte: O autor.

Figura A.3 – Superfície de resposta de X1-Proporção das Serragens entre a fração mássica de serragem na mistura, X4-Fração mássica de óleo mistura versus PCS.



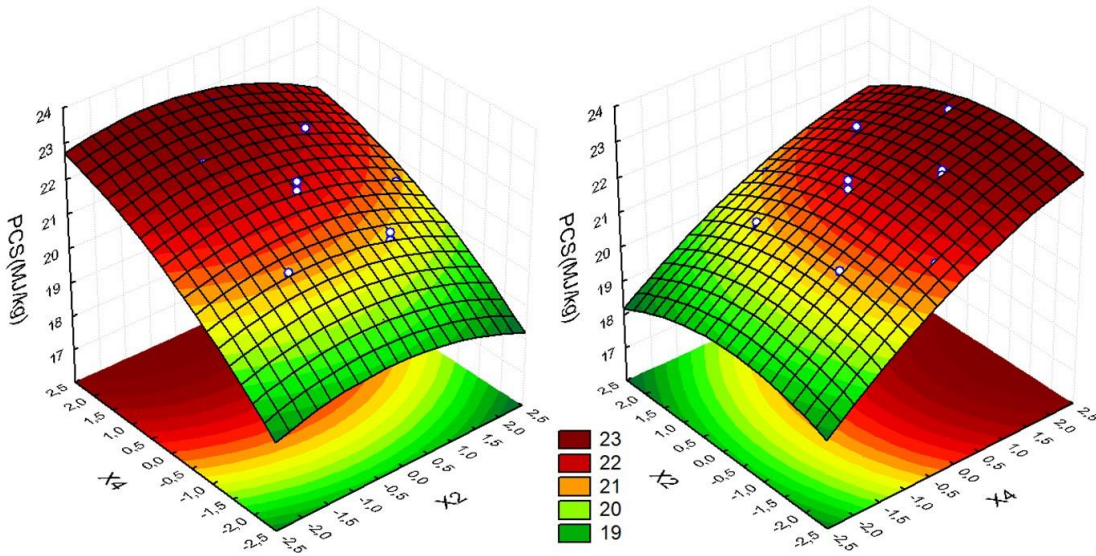
Fonte: O autor.

Figura A.4 – Superfície de resposta de X2-Granulometria em Mesh das Serragens, X3-Proporção dos óleos de frango na fração mássica dos óleos na mistura versus PCS.



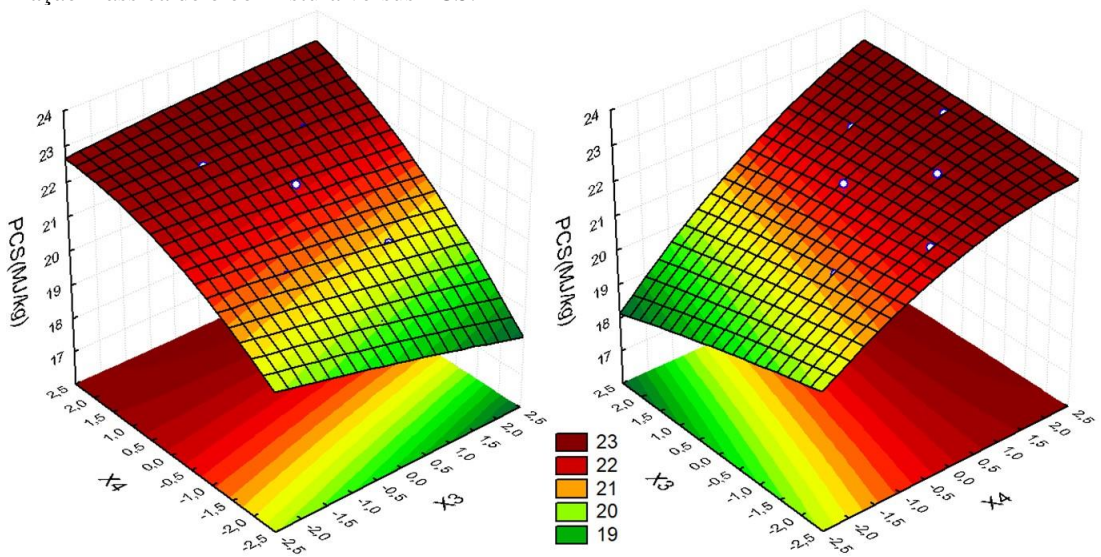
Fonte: O autor.

Figura A.5 – Superfície de resposta de X2-Granulometria em Mesh das Serragens, X4-Fração mássica de óleo mistura versus PCS.



Fonte: O autor.

Figura A.6 – Superfície de resposta de X3-Proporção dos óleos de frango na fração mássica dos óleos na mistura, X4-Fração mássica de óleo mistura versus PCS.

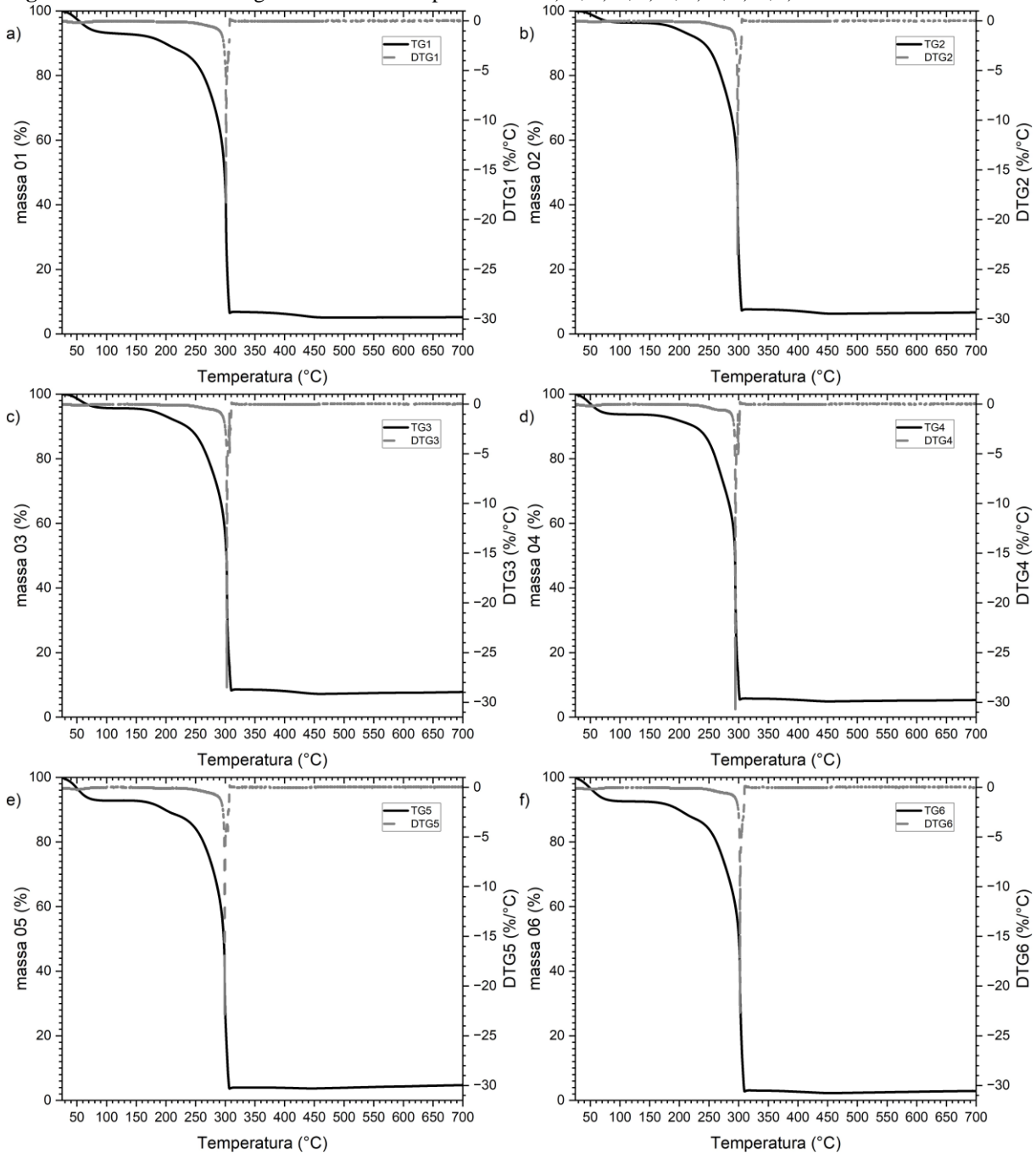


Fonte: O autor.

APÊNDICE B GRÁFICOS TG E DTG DOS BRIQUETES

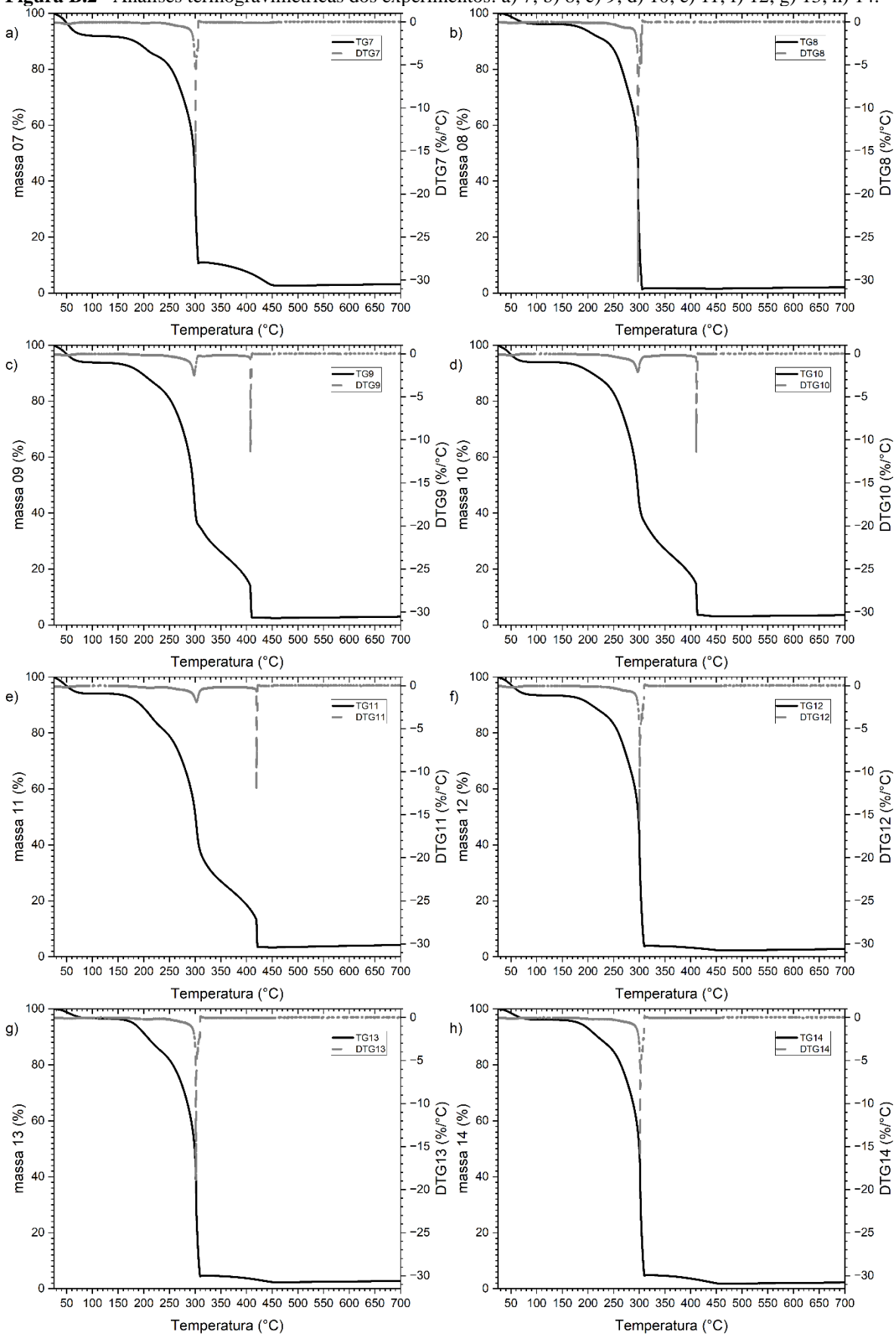
Segue os gráficos de análise termogravimétrica de cada um dos vinte e sete (27) briquetes produzidos.

Figura B.1 - Análise termogravimétrica dos experimentos: a) 1; b) 2; c) 3; d) 4; e) 5; f) 6.

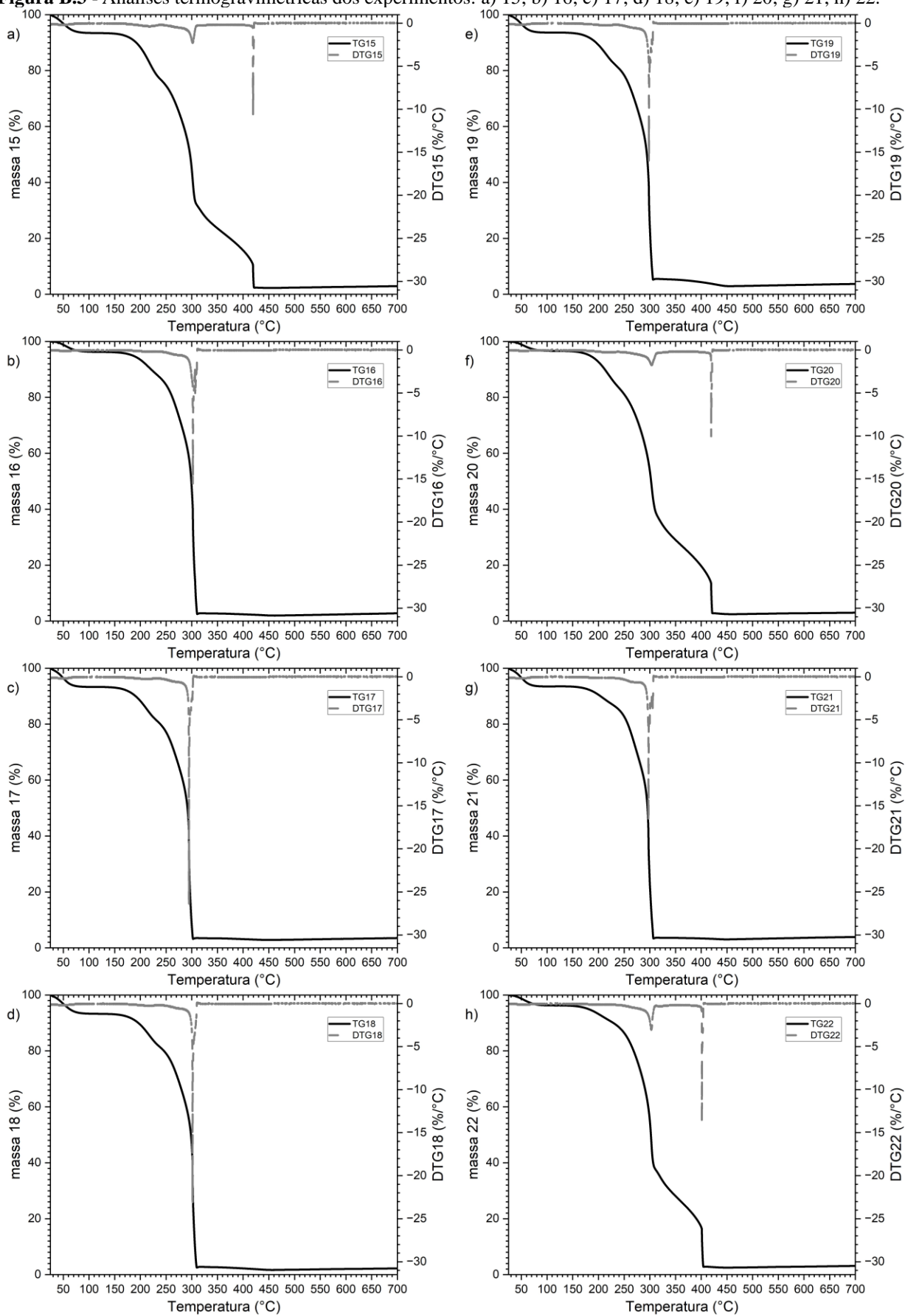


Fonte: O autor.

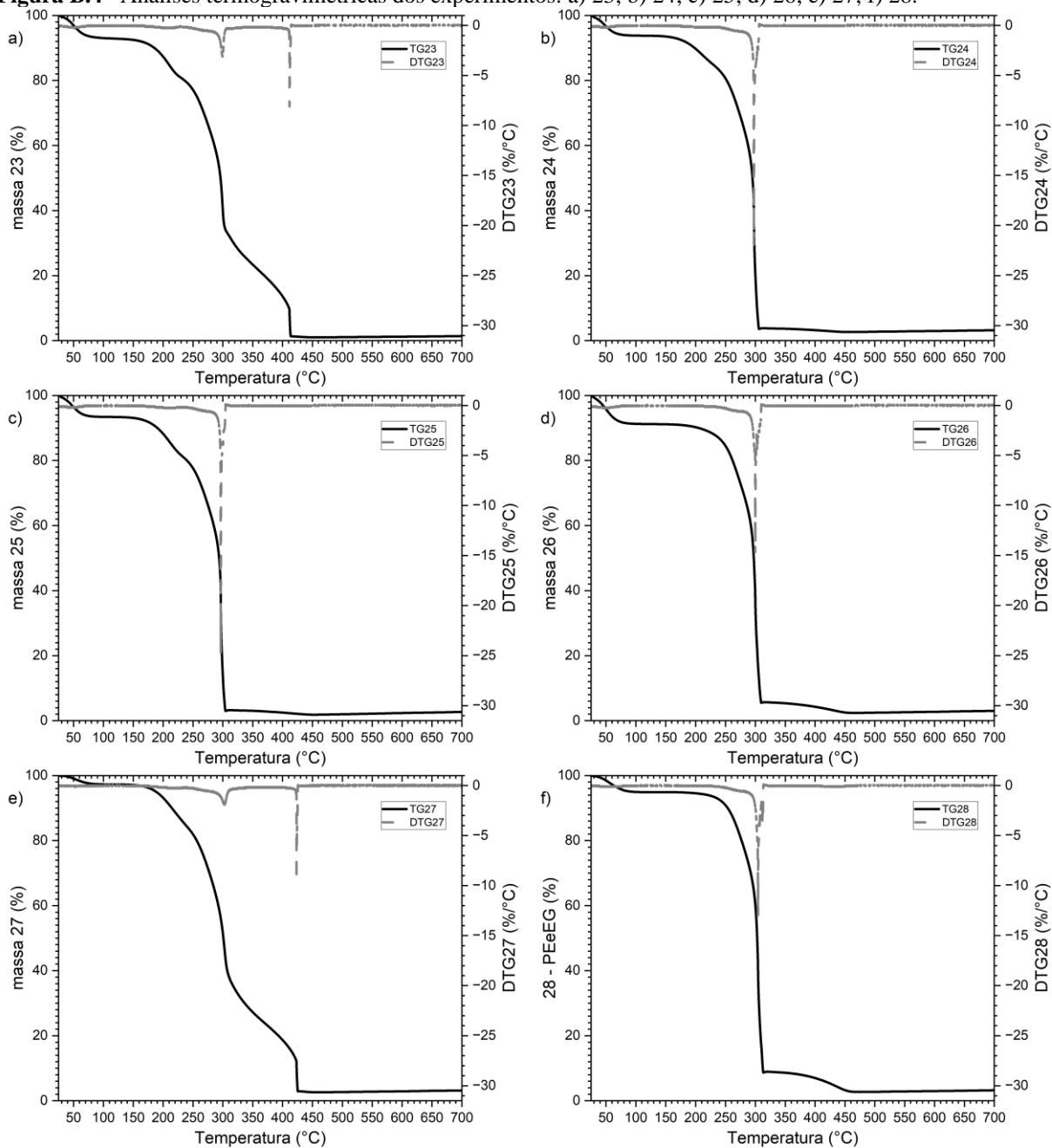
Figura B.2 - Análises termogravimétricas dos experimentos: a) 7; b) 8; c) 9; d) 10; e) 11; f) 12; g) 13; h) 14.



Fonte: O autor.

Figura B.3 - Análises termogravimétricas dos experimentos: a) 15; b) 16; c) 17; d) 18; e) 19; f) 20; g) 21; h) 22.

Fonte: O autor.

Figura B.4 - Análises termogravimétricas dos experimentos: a) 23; b) 24; c) 25; d) 26; e) 27; f) 28.

Fonte: O autor.