

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ
Escola Politécnica

INGRYD MAYER KRINSKI

**AVALIAÇÃO DA ADIÇÃO DE BORRA DE CAFÉ NA PRODUÇÃO
E CARACTERIZAÇÃO DE BRIQUETES DE BIOMASSA**

CURITIBA
Março - 2021

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ
Escola Politécnica

INGRYD MAYER KRINSKI

**AVALIAÇÃO DA ADIÇÃO DE BORRA DE CAFÉ NA PRODUÇÃO
E CARACTERIZAÇÃO DE BRIQUETES DE BIOMASSA**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

**Orientador: Prof. Viviana Cocco Mariani,
Dra.**

CURITIBA
Março - 2021

Dados da Catalogação na Publicação
Pontifícia Universidade Católica do Paraná
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/PUCPR
Biblioteca Central
Pamela Travassos de Freitas – CRB 9/1960

K92a
2021 Krinski, Ingrid Mayer
Avaliação da adição de borra de café na produção e caracterização de briquetes de biomassa / Ingrid Mayer Krinski ; orientadora: Viviana Cocco Mariani.– 2021.
81 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2021
Bibliografia: f. 71-75

1. Engenharia mecânica. 2. Briquetes. 3. Borra de café. 4. Madeira de compressão. 5. Resíduos agrícolas. I. Mariani, Viviana Cocco. II. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD 20. ed. – 620.1



Pontifícia Universidade Católica do Paraná–PUCPR
Escola Politécnica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica-PPGEM

TERMO DE APROVAÇÃO

Ingryd Mayer Krinski

Avaliação da adição de borra de café na produção e caracterização de briquetes de biomassa

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de mestre no Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Eliton Fontana

Prof. Dr. Eliton Fontana
Universidade Federal do Paraná, UFPR, Relator

Maria José Jerônimo de Santana Ponte
Prof.^a Dr.^a Maria José Jerônimo de Santana Ponte
Universidade Federal do Paraná, UFPR

Emerson Martim
Prof. Dr. Emerson Martim
Pontifícia Universidade Católica do Paraná, PUCPR

Viviana Cocco Mariani
Prof.^a Dr.^a Viviana Cocco Mariani
Pontifícia Universidade Católica do Paraná, PUCPR, orientadora

Curitiba, 03 de março de 2021

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Agradeço a minha família por todo o amor, suporte e orientação em todos os momentos da minha vida.

A minha orientadora Viviana Cocco Mariani pela orientação inegavelmente eficiente e segura, pelas valiosas sugestões e estímulos oferecidos.

A PUC-PR pelo apoio concedido.

Aos amigos e funcionários da PUC pela amizade e parceria ao longo desta jornada.

Acima de tudo, a Deus, pois é Dele todo o conhecimento proveniente.

Resumo

O presente estudo utiliza o processo de briquetagem pela busca em reaproveitar os resíduos agrícolas em especial resíduos de borra de café, gerados tanto na produção florestal quanto nos processos industriais. A compressão de materiais lignocelulósicos concentra a energia disponível em termos de volume (poder calorífico) e facilita o manuseio e armazenamento destes materiais. O presente trabalho objetiva verificar a influência na qualidade do briquete com a adição de borra de café nos tratamentos com serragem das espécies de pinus e cambará, através da avaliação das características físico-química, mecânica e energética dos briquetes gerados a partir da briquetagem destes resíduos. Para isto foram conduzidos vários testes com os briquetes, analisando as propriedades umidade, cinzas, matéria volátil, carbono fixo, granulometria, massa específica aparente e energética, resistência à tração por compressão diametral e poder calorífico superior para cada tratamento. Os briquetes foram produzidos em prensa hidráulica de 12 toneladas e foram utilizados em triplicatas para cada composição, sem uso de aglutinantes e apenas em temperatura ambiente. Analisando a classificação granulométrica das matérias-primas, observa-se que a serragem de pinus apresenta maior proporção de finos entre os materiais. A borra de café apresentou maior granulometria entre as matérias estudadas. No processo de briquetagem observa-se que o maior impeditivo na adição de borra de café nos tratamentos com serragens está relacionado com a alta umidade presente na borra. Os briquetes com maior composição de resíduo celulósico apresentam maior resistência à tração por compressão, sendo que os tratamentos com cambará apresentaram melhores resultados se comparados com os de serragem de pinus, atingindo o valor máximo de 554,23 N. Conclui-se que a adição da borra de café nos tratamentos de serragem de pinus e cambará podem interferir positivamente em alguns parâmetros. A borra de café pode ser considerada uma matéria-prima de alta qualidade quando adicionada em tratamentos com serragens na produção de biocombustíveis sólidos.

Palavras-chave: Briquetes; Borra de café; Compressão Diametral; Resíduos Agrícolas.

Abstract

The present study uses the briquetting process by seeking to reuse agricultural residues and coffee grounds residues, generated in both production and forestry in industrial processes. The compaction of lignocellulosic materials concentrates the available energy in terms of volume and facilitates the handling and storage of these materials. The present work aims to verify the influence on the quality of the briquette with the addition of coffee grounds in the treatments with sawdust of pine and *cambará*, through the evaluation of the physical-chemical, mechanical and energetic characteristics of the briquettes produced from the briquetting of these residues. For this, several tests were carried out with the briquettes, analyzing the properties of moisture, ash, volatile matter, fixed carbon, granulometry, apparent and energetic density, tensile strength by diametrical compression and superior calorific power for each treatment. The briquettes were found in a 12 tonnes hydraulic press and were used in triplicates for each composition, without the use of binders and temperature. Analyzing the granulometric classification of raw materials, it is observed that a pine sawdust has a higher proportion of fines among the materials. Coffee grounds had a higher granulometry among the studied materials. In the briquetting process, it is observed that the greatest impediment in the addition of coffee grounds in sawdust treatments is related to the high humidity present in the grounds. Briquettes with a higher composition of cellulosic residue have greater resistance to compression by traction, and treatments with *cambará* independent better results compared to those of sawdust from pine, reaching a maximum value of 554.23 N. It is concluded that the addition of coffee grounds in pine and *cambará* sawdust treatments can positively interfere in some parameters. Coffee grounds can be considered a high quality raw material when added in sawdust treatments to produce solid biofuels.

Keywords: Agricultural waste; Briquettes; Coffee grounds; Diametrical compression.

Sumário

Agradecimentos	2
Resumo	3
Abstract.....	4
Sumário	5
Lista de Figuras	7
Lista de Quadros	9
Lista de Tabelas	10
Capítulo 1	11
Introdução.....	11
1.1 Considerações Iniciais	11
1.2 Objetivos	15
1.3 Justificativa	15
1.4 Organização do trabalho	16
Capítulo 2	17
Revisão Bibliográfica	17
2.1 Resíduos lignocelulósicos	17
2.2 O processo de briquetagem	26
2.3 Fatores que afetam a qualidade dos briquetes	29
Capítulo 3	34
Materiais e Métodos.....	34
3.1 Borra de café e serragens	34
3.2 Análise Imediata	35
3.3 Análise Mecânica	39
3.4 Análise Calorífica	42
Capítulo 4	44
Resultados e Discussões.....	44
4.1 Análise Imediata	44
4.2 Análise Mecânica	48
4.3 Análise Calorífica	64
Capítulo 5	68

Conclusões	68
Referências Bibliográficas	71
Apêndice.....	76
A1 – Resultados das triplicatas dos briquetes de serragem de Pinus sp. com adição de borra de café.....	76
A2 – Análise estatística das triplicatas dos briquetes de serragem de Pinus sp. com adição de borra de café.....	77
B1 – Resultados das triplicatas dos briquetes de serragem de Cambará com adição de borra de café.....	79
B2 – Análise estatística das triplicatas dos briquetes de serragem de Cambará com adição de borra de café.....	80

Lista de Figuras

Figura 1 – Usinas termelétricas a biomassa em operação e potência instalada por estado em set. de 2003.	12
Figura 2 – Fontes de biomassa e seus processos de conversão.	18
Figura 3 - Cadeia produtiva até a etapa primária do setor de florestas plantadas.	20
Figura 4 - Cadeia produtiva do processamento secundário ao consumo final do setor de florestas plantadas. Fonte: IBÁ, 2018.	21
Figura 5 – Distribuição e produção brasileira de café em 2015 (percentual calculado sobre as 43.235.000 milhões de sacas).	23
Figura 6 – Evolução do consumo interno de café no Brasil de 1990 a 2018.	23
Figura 7 – Esquema ilustrativo dos resíduos gerados na indústria do café.	25
Figura 8 – Prensa (a) mecânica, (b) de rolos e (c) hidráulica, respectivamente.	27
Figura 9 – Efeito da temperatura e teor de umidade na massa específica dos briquetes de painço.	30
Figura 10 – Efeito da temperatura e teor de umidade na resistência ao impacto dos briquetes de painço.	32
Figura 11 – Efeito da temperatura no teor de matéria volátil em diferentes materiais.	33
Figura 12 – Serragem de (a) Pinus, (b) Borra de café e (c) Serragem de Cambará.	34
Figura 13 - Teor de umidade do pó de serra de pinus sp.	36
Figura 14 - Equipamento para (a) calcinação da amostra e (b) mufla, respectivamente. ...	37
Figura 15 – (a) Sistema de peneiramento (b) Prensa hidráulica.	39
Figura 16 - Representação das dimensões dos briquetes (a) medição do diâmetro, (b) espessura e (c) diâmetro.	41
Figura 17 – (a) Equipamento do ensaio de resistência à compressão diametral (b) Equipamento de Poder Calorífico Superior.	42
Figura 18 – Perfis do teor de umidade nos briquetes com erro padrão.	45
Figura 19 – Perfis do teor de cinzas nos briquetes com erro padrão.	46
Figura 20 – Perfis do teor de matéria volátil nos briquetes.	47
Figura 21 – Perfis do teor de carbono fixo nos briquetes com erro padrão.	48
Figura 22 - Classificação granulométrica da serragem de pinus.	49
Figura 23 - Classificação granulométrica da serragem de cambará.	50
Figura 24 - Classificação granulométrica da borra de café.	51

Figura 25 – Briquetes de (a) serragem de cambará e (b) serragem de cambará com adição de borra de café, respectivamente.	52
Figura 26 – Briquetes de serragem de pinus com adição de borra de café.	52
Figura 27 – Briquetes de serragem de cambará com adição de borra de café.	53
Figura 28 – Ilustração de resultados da compactação das amostras com alta adição de borra de café.	53
Figura 29 – Perfis da massa específica aparente dos briquetes com adição de borra de café nos tratamentos de serragem de pinus e cambará com erro padrão.	56
Figura 30 - Comparativo da mesma quantidade de biomassa em (a) granel e em (b) briquete.	56
Figura 31 – Briquete de serragem de pinus após ensaio de resistência por compressão diametral.	57
Figura 32 – Briquete de serragem de pinus com adição de borra de café no equipamento EMIC.	58
Figura 33 – Briquetes de serragem de pinus com adição de borra de café após ensaio mecânico.	58
Figura 34 – Briquete de serragem de cambará com adição de borra de café no equipamento EMIC.	59
Figura 35 – Briquete de serragem de cambará após ensaio mecânico.	59
Figura 36 – Briquete de serragem de cambará com adição de borra de café após ensaio mecânico.	60
Figura 37 – Briquete C-06 após ensaio mecânico.	60
Figura 38 – Perfis do comportamento mecânico dos briquetes de pinus.	61
Figura 39 - Perfis do comportamento mecânico das triplicatas dos briquetes C-01.	62
Figura 40 – Perfis do comportamento mecânico dos briquetes de cambará com adição de borra de café.	63
Figura 41 – Valores do PCS da serragem de pinus e da serragem de cambará com adição da borra de café com erro padrão.	65
Figura 42 – Valores da massa específica energética dos briquetes com erro padrão.	66

Lista de Quadros

Quadro 1 - Massa e espessura média dos briquetes de borra de café e serragem de pinus e cambará.....	54
Quadro 2 – Resultados da adição da borra de café nos parâmetros das amostras.	69

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Resíduos gerais gerados por tipo de atividade.	22
Tabela 2 – Poder calorífico superior das biomassas.	33
Tabela 3 – Amostras de briquetes com serragem de pinus sp.	35
Tabela 4 - Amostras de briquetes com serragem de cambará.	35
Tabela 5 – Dimensões das peneiras.	40
Tabela 6 – Valores do teor de umidade médio dos briquetes.	44
Tabela 7 – Valores médios do teor de cinzas, matéria volátil e carbono fixo nos briquetes.	48
Tabela 8 – Massa específica aparente média dos briquetes com adição de borra de café nos tratamentos de serragem de pinus e cambará.	55
Tabela 9 - Resultados de resistência à compressão diametral dos briquetes de serragem de pinus.	61
Tabela 10 - Resultados da resistência à tração por compressão diametral das triplicatas do briquete de serragem de cambará sem adição de borra de café e sua média.	63
Tabela 11 - Resultados do ensaio de resistência à compressão diametral dos briquetes de serragem de cambará.	64
Tabela 12 - Massa específica energética média dos briquetes.	66

Capítulo 1

Introdução

1.1 Considerações Iniciais

Os maiores desafios para o desenvolvimento sustentável da sociedade contemporânea são representados pelo grau de geração de resíduos e o crescimento no consumo de energia pelas indústrias. Ambos os desafios estão associados ao crescimento populacional e ao desenvolvimento industrial. Embora estes fatores colaborem com o problema, eles também exigem soluções para realizar a destinação mais adequada ambientalmente e economicamente (KONGPRASERT, 2019).

Com base nessas informações, nos últimos anos, a busca por fontes energéticas alternativas e sustentáveis cresceu e, dentro deste contexto, a utilização de biomassa residual é vista como uma alternativa para a redução do consumo de combustíveis fósseis e para a amenização dos impactos gerados ao meio ambiente (KONGPRASERT, 2019).

A utilização da biomassa também pode ser defendida quanto a sua reutilização e a neutralização de carbono, a qual equivale a zero emissões globais de dióxido de carbono para a atmosfera (MADIEDO, L; FAES, E; BARRIOCANAL, C; 2019).

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (2016), a energia oriunda da biomassa no corresponde a 8,83% do total nacional. A biomassa utilizada na geração de eletricidade no Brasil ocorre principalmente dos setores: Sucroalcooleiro; Papel e Celulose; Arrozeiro e Agroindústrias. Os resíduos mais utilizados nas agroindústrias são o bagaço de cana-de-açúcar, resíduos de madeira (serragens) e casca de arroz (ANEEL, 2016).

No ano de 2003 haviam registrados 217 termelétricas a biomassa operando no Brasil, conforme mostra Figura 1, com capacidade instalada superior a 2.600 MW.

No Brasil são produzidos anualmente cerca de 330 toneladas de resíduos de biomassa. No entanto, muitas vezes estes resíduos não são aproveitados energeticamente devido a algumas características inadequadas da biomassa, como: baixo valor de poder calorífico e de massa específica, alto teor de umidade e, conseqüentemente, altos custos no transporte e estocagem da biomassa (FELFI *et al.*, 2011).

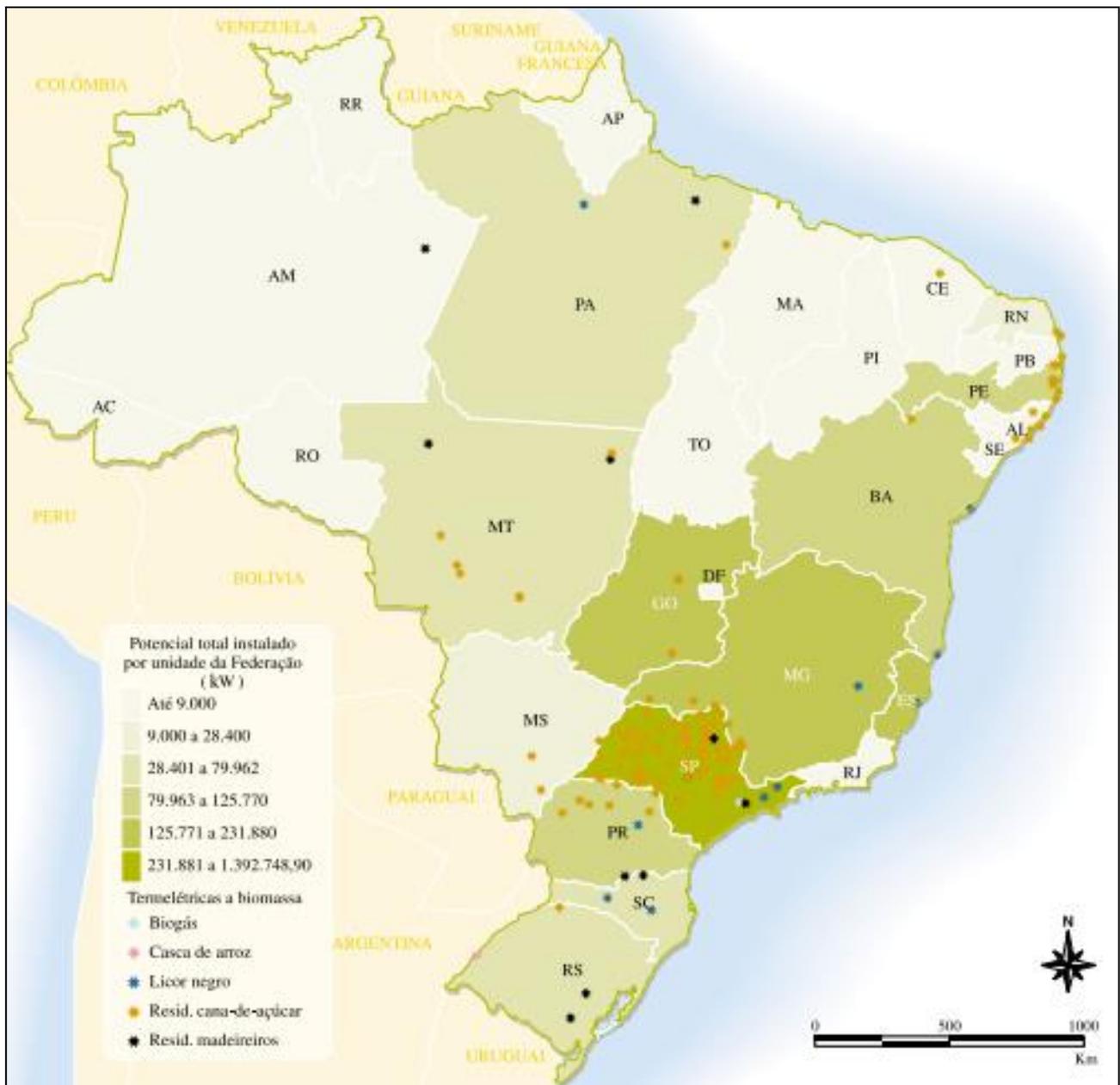


Figura 1 – Usinas termelétricas a biomassa em operação e potência instalada por estado em set. de 2003.

Fonte: ANEEL, 2005.

Estas características podem ser alteradas, transformando a biomassa em um produto final com elevado potencial para a matriz energética brasileira, uma das alternativas é através da compactação destes resíduos por meio da briquetagem. Pois a compactação é o processo mais indicado para o melhor aproveitamento energético dos resíduos. Além do conseqüente aumento da concentração energética, a compactação da biomassa contribui para a uniformidade do tamanho e do formato do produto, aumento da massa específica, redução no teor de materiais voláteis, facilita o armazenamento e transporte e agrega valor à biomassa residual (LUBWAMA; YIGA, 2017).

A compactação desses resíduos ocorre em equipamentos hidráulicos ou prensas mecânicas, gerando um produto, geralmente, na forma cilíndrica ou de disco. Este produto é denominado briquete e torna-se diretamente competitivo com outros combustíveis, como lenha e carvão vegetal, podendo ser utilizado em forno ou caldeira para a queima direta. Estabelecimentos como padarias, pizzarias, indústrias, frigoríficos e olarias recebem este material para queima.

Como forma de reduzir a exploração direta dos recursos naturais como fonte de combustíveis, utiliza-se os resíduos das atividades agroindustriais na produção de briquetes, geralmente por resíduos de madeira como o pó de serragem. No entanto, além dos resíduos de madeira, outros resíduos passaram a ser estudados para a produção de briquetes como, por exemplo, borra de café oriundas de estabelecimentos comerciais (SANT'ANNA, 2012).

De acordo com pesquisas da Associação Brasileira da Indústria do Café (ABIC, 2019), o consumo no Brasil de café cresceu 4,8% de 2017 a 2018. Estes números representam o consumo per capita de 6,02 kg/ano de café cru e 4,82 kg/ano de café torrado e moído, mantendo o Brasil como o segundo maior consumidor de café do mundo. Portanto, o grande consumo de café no Brasil leva a alta geração de resíduos de borra de café no país.

O Brasil é responsável por aproximadamente um terço da produção mundial de café, sendo classificado como o maior produtor de café no mundo, posição que se mantém nos últimos 150 anos. No ano de 2012 foram produzidas 50 milhões de sacas, ou seja, 3 milhões de toneladas de café. Em 2009 foram produzidas 2,4 milhões de toneladas de café e mais de 4% foi exportado. Em 2007 foram produzidos, aproximadamente, 70% de café arábica. Apesar de o Brasil ser o maior produtor mundial, o mercado global não é dominado apenas. Além do Brasil ser o maior produtor de café, é também o maior exportador do mundo (TERRA NOVA, 2021).

No ano de 2020, a produção de café brasileira superou as expectativas, atingindo um crescimento de 25% no volume quando comparado ao mesmo período do ano anterior. Apesar das incertezas provocadas pela pandemia da COVID-19 quanto às produções de café do ano, a produção foi alta devido os investimentos em tecnologias e a erradicação de áreas pouco produtivas.

Entre os estados brasileiros, destaca-se Minas Gerais como o maior produtor de café, com 33,46 milhões de sacas de 60 kg. Este fato confirma o aumento de mais de 36% em relação a 2019, em que o estado produziu neste ano 24 milhões de sacas. O estado

que ocupa a posição de segundo maior produtor no Brasil é o Espírito Santo, com a produção próxima de 13,6 milhões de sacas, apresentando aumento de 0,8% em relação a 2019. O terceiro maior produtor de café do país é o estado de São Paulo, com produção estimada em 6,15 milhões de sacas em 2020, crescimento superior a 41% (EM, 2020).

Em função dos dados anteriores sabe-se que a borra de café é um resíduo sólido gerado diariamente em quantidades consideráveis em residências, cafeterias, padarias entre outros locais, através da extração dos compostos solúveis do café torrado, podendo ser gerado tanto na produção do café solúvel quanto no consumo durante a preparação da bebida.

Tokimoto (2005) aponta que, anualmente, são geradas quase 6 milhões de toneladas de borra de café no mundo. Na produção de café solúvel, para cada tonelada de café é obtido, aproximadamente, meia tonelada de borra.

Os resíduos de serragem apresentam ampla disponibilidade no Brasil e também são gerados em grandes quantidades, principalmente, em empresas que processam madeiras para fabricação de móveis, papéis e outros fins. Neste trabalho, o uso de serragem de pinus e cambará na composição de briquetes relaciona-se ao potencial para briquetagem destes resíduos e pelo amplo uso destas espécies nas indústrias citadas previamente.

O resíduo de borra de café e resíduo de serragem de pinus e cambará utilizados para a elaboração de briquetes é justificado, entre diversas razões, pela fácil disponibilidade no Brasil, oportunidade de reaproveitá-los para produção de combustível de fonte renovável, contemplando aspectos ligados à bioenergia e a produção mais limpa e redução de custos através da substituição de combustíveis utilizados em sistemas de aquecimento de processos industriais, residenciais e outros estabelecimentos (MARTINEZ *et al.*, 2019).

Para otimizar o rendimento dos briquetes produzidos no processo de briquetagem, alguns parâmetros devem ser avaliados e controlados. A granulometria do café a ser utilizado é o parâmetro inicial a ser adotado como critério de controle e qualidade. Outros fatores importantes são: temperatura da produção dos briquetes e a secagem do material, pois estes influenciam de forma direta na liberação de óleo da borra de café. Para a preservação da integridade do briquete durante o transporte, deve-se considerar o seu Módulo de Elasticidade, pois, quanto maior o valor, maior a resistência do material (RAJASEENIVASAN *et al.*, 2016).

1.2 Objetivos

O objetivo do presente trabalho é a avaliação das características físico-química, mecânica e energética dos briquetes gerados a partir da compactação residual de diferentes proporções de borra de café e serragem das espécies de madeira de pinus e cambará, sob diferentes composições dos resíduos.

Para isto foram conduzidos vários testes com os briquetes, analisando as propriedades de granulometria, umidade, massa específica, matéria volátil, teor de cinzas, carbono fixo, poder calorífico superior e resistência a compressão diametral para cada composição de briquete.

Entre os objetivos específicos estão:

- Avaliar, por meio da análise imediata, o Teor de Umidade, Teor de Cinzas, Teor de Matérias Voláteis e Teor de Carbono Fixo dos resíduos de serragem de pinus *sp*, serragem de cambará com diferentes proporções de borra de café;
- Determinar e classificar a granulometria dos resíduos de serragem de pinus *sp*, serragem de cambará e de borra de café;
- Produzir briquetes com diferentes composições;
- Determinar a massa específica aparente e a Resistência à Tração por compressão diametral dos briquetes produzidos previamente;
- Realizar a análise energética dos briquetes através da determinação do poder calorífico superior dos resíduos de serragem de pinus *sp* ou serragem de cambará com adição de borra de café; e
- Determinar a massa específica energética dos briquetes produzidos.

1.3 Justificativa

A escolha do tema do presente trabalho deve-se à necessidade de minimizar impactos ambientais relacionados à alta geração, má destinação e mal aproveitamento dos resíduos lignocelulósicos. Além disso, atualmente, preza-se muito pela busca por novas fontes renováveis de energia.

Estes resíduos apresentam possibilidade de reaproveitamento a partir do processo de briquetagem. Tal processo ocorre através da compactação da biomassa selecionada, podendo ser utilizado a prensa hidráulica. Este equipamento é de fácil utilização e baixo

custo de manutenção. A briquetagem dos resíduos se faz necessário devido as propriedades física, química e mecânica que interferem na sua eficiência de queima.

O trabalho refere-se ao estudo do resíduo de serragem das espécies de pinus e cambará na produção de briquetes com a adição da borra de café gerada em cafeterias. Primeiramente foi proposto adicionar a borra de café a cada 10% em proporção mássica nos tratamentos, até chegar ao limite suportado na produção dos briquetes.

No presente trabalho foram verificadas em laboratório as condições ideais dos briquetes, não só em termos de eficiência calorífica, como também mecânica e química, com o objetivo de se obter um biocombustível sólido com qualidade aceitável e com o máximo de aproveitamento da borra de café.

A partir dos resultados deste estudo pode-se concluir a melhor composição para a produção dos briquetes com estes resíduos, além de entender como cada parâmetro é influenciado por outros. Portanto, este trabalho não somente deve contribuir para o aproveitamento de resíduos, como será também um material com informações do comportamento dos briquetes produzidos com resíduos lignocelulósicos.

1.4 Organização do trabalho

Este trabalho consiste em 5 capítulos. No primeiro capítulo são apresentadas as considerações iniciais, os objetivos e a justificativa do trabalho. No segundo capítulo são descritos os resíduos lignocelulósicos, os processos de briquetagem e os fatores que afetam a qualidade dos briquetes, além disso, neste capítulo são apresentados alguns trabalhos disponíveis na literatura pertinente ao tema. No Capítulo 3, são descritos os materiais utilizados, os métodos de obtenção das propriedades dos briquetes produzidos, os ensaios e análises realizados no estudo para validação da adição de borra de café nos tratamentos com serragens de pinus e cambará. No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos neste trabalho e é descrita a análise dos resultados encontrados. O Capítulo 5 mostra as conclusões deste trabalho e são sugeridos futuros trabalhos para continuação deste trabalho.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Resíduos lignocelulósicos

Na COP21 - 21ª Conferência das Partes em Paris – o Brasil estipulou a meta de redução das emissões de GEE em 38% até o ano de 2030 (em relação as emissões de 2005). Esta meta foi defendida prevendo ações que contribuíssem para o aumento da parcela de bioenergia na matriz energética brasileira, como o incremento da biomassa, energia solar e energia eólica (MMA, 2018).

Dentre as ações estipuladas na Convenção das Nações Unidas para Combate às Mudanças Climáticas, a utilização da biomassa na matriz energética brasileira é a que possui maior potencial a curto prazo, visto que:

- A biomassa é uma fonte renovável com baixa emissão atmosférica;
- A biomassa é um material biodegradável;
- A biomassa está disponível em várias regiões do país, o que reduz custos com transportes, distâncias, gastos com energia e reduz as emissões devido a logística ser mais curta;
- A utilização da biomassa fomenta na região empregos e o desenvolvimento local;
- Comercializar a biomassa gera a transferência de recursos monetários das indústrias para o setor agrícola e rural.

No Brasil, já se utilizam algumas biomassas classificadas como florestais (ex: caatinga, eucalipto, bambu, algarobais espontâneo etc.) e não florestais (ex: frutíferas diversas, coqueiros, cana-de-açúcar, etc). Outras biomassas apresentam potencial de serem utilizadas, no entanto não possuem cadeias de produção ou tecnologia desenvolvida de forma suficiente (MMA, 2018).

A biomassa pode ser dividida em biomassa tradicional (lenha e resíduos naturais) e em biomassa moderna, gerada a partir de processos tecnológicos avançados e eficientes (briquetes, pellets, biocombustíveis líquidos etc.). Através da biomassa é possível se obter

diversas formas de energia mediante diferentes processos de conversão, conforme indica Figura 2 (MARAFON *et al.*, 2016).

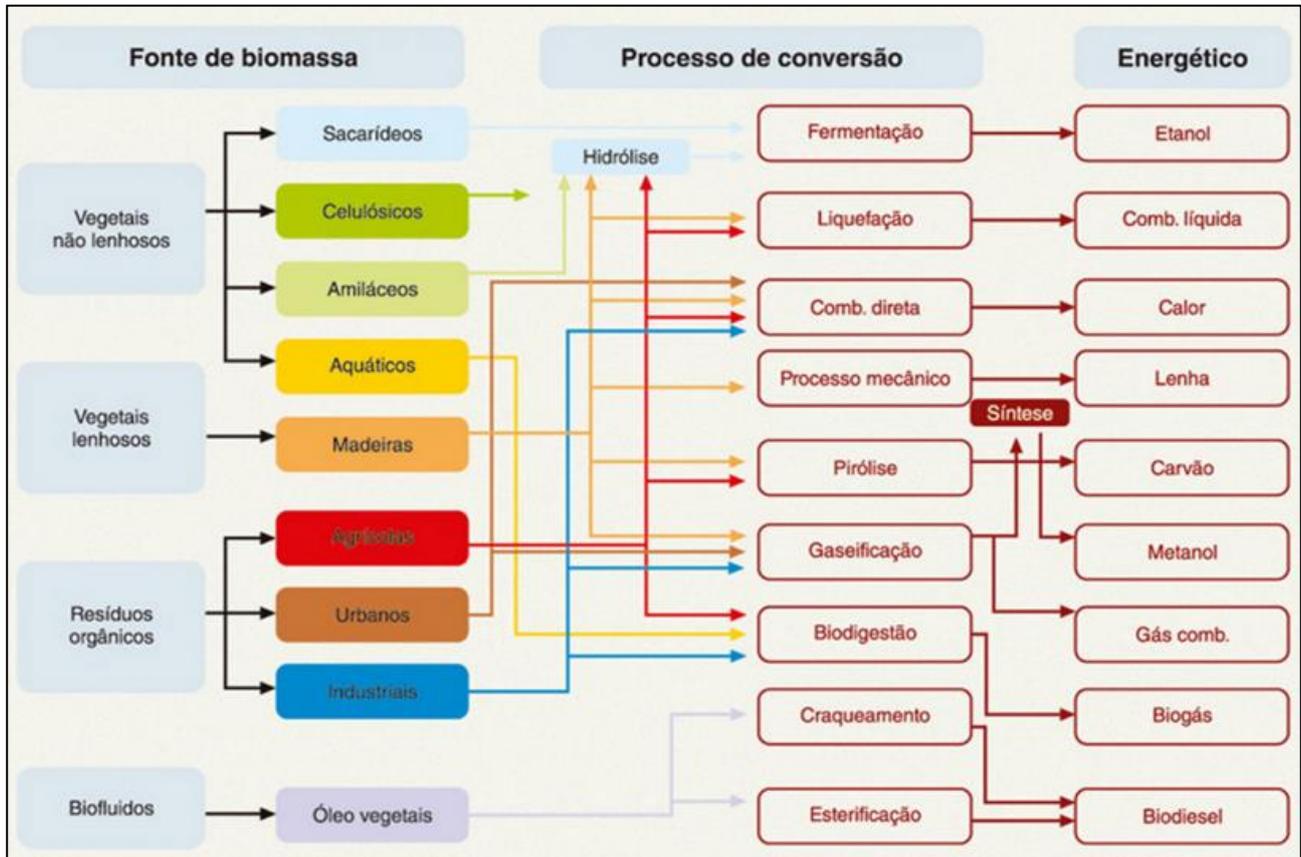


Figura 2 – Fontes de biomassa e seus processos de conversão.
 Fonte: MARAFON *et al.*, 2016.

A reutilização da biomassa pode ser dividida em dois tipos de demanda: 1) energética e 2) não energética. A demanda energética corresponde ao uso domiciliar, industrial ou comercial. De forma geral, o uso da biomassa está relacionado a geração de energia elétrica e térmica, podendo ser desde o aquecimento de água em residências ou até mesmo em geração de calor em caldeiras de grandes indústrias.

O Ministério de Minas e Energia (MME) vem promovendo discussões para aprofundar o conhecimento do uso da biomassa como fonte de energia e, entre as vantagens de sua utilização no Brasil, destacam-se:

- A localização geográfica do Brasil;
- Condições climáticas favoráveis;
- O desenvolvimento do mercado tanto na produção quanto no consumo da biomassa;

- As políticas públicas existentes que obrigam a destinação correta dos resíduos;
- Capacidade de pesquisa e desenvolvimento do Brasil para melhorias nos processos de produção.

Mundialmente, o setor florestal apresenta grande importância como fornecedor de energia ou matéria-prima e o Brasil é um dos países que detém maior concentração de recursos florestais. De acordo com o Ministério do Meio Ambiente, estima-se que 69% da cobertura florestal do país apresenta potencial produtivo. Diante deste cenário, o país desenvolveu no setor florestal uma complexa estrutura de produção de florestas plantadas, principalmente com pinus e cambarás (SNIF, 2018).

As florestadas plantadas possuem dois principais objetivos: Reflorestamento e Fins Energéticos. As plantações planejadas para fins energéticos, possuem grande quantidade de árvores por hectare e possuem ciclo curto de crescimento, pois a finalidade destas áreas é a produção do maior volume de biomassa nesse espaço em menor tempo.

A Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ) representa o segmento de consumo das árvores cultivadas para fins industriais, possuindo uma vasta variedade de produtos, sendo: madeira serrada; papel e celulose; pisos e painéis de madeira; entre outros. Este setor apresenta grande destaque no que se diz respeito ao desenvolvimento de baixo carbono, pois as florestas plantadas diversificam o uso da madeira de forma sustentável (IBÁ, 2019).

De acordo com o Relatório da IBÁ de 2019, o setor de consumo de madeiras para fins industriais cresceu, no ano de 2018, 13,1% em relação ao ano anterior, totalizando uma receita de R\$86,6 bilhões, contribuindo com o PIB nacional em 1,3% e com 6,9% do PIB industrial.

O Brasil apresentou em 2018, 7,83 milhões de hectares de árvores plantadas, sendo que destas áreas, 6,3 milhões de hectares são certificadas. O setor de florestas plantadas contribui no fortalecimento dos objetivos brasileiros no Acordo de Paris, pois, em 2018, o segmento apresentou 4,2 bilhões de toneladas de dióxido de carbono estocados (IBÁ, 2019).

Na Figura 3 estão representados os produtos das florestas plantadas (madeira em tora e resíduos e produtos não madeireiros). Estes produtos florestais passam pelo processamento primário, sendo eles: Pirólise; Picagem; Laminação e Desdobramento.

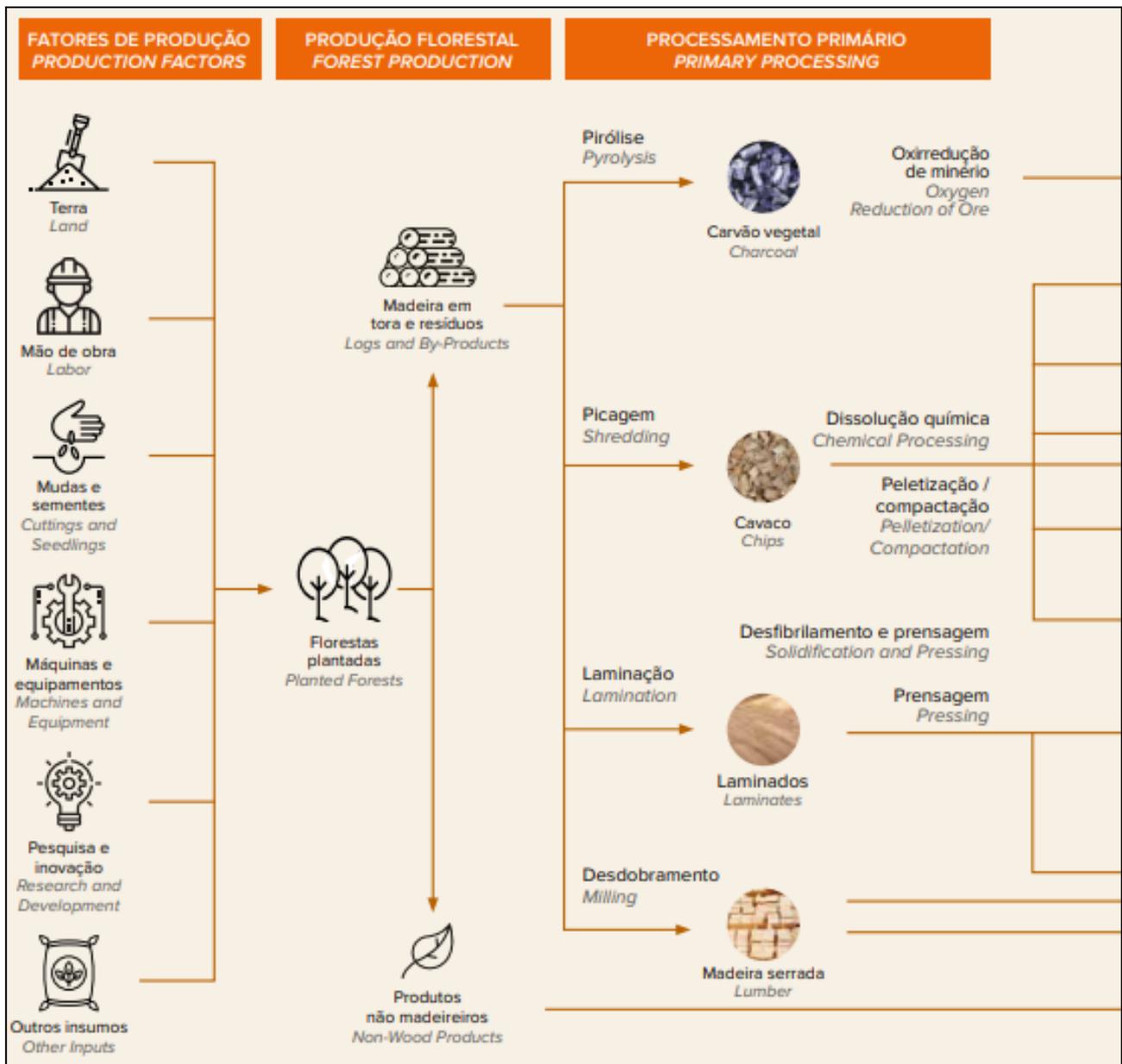


Figura 3 - Cadeia produtiva até a etapa primária do setor de florestas plantadas.
 Fonte: IBÁ, 2018.

No processamento primário, são gerados carvão vegetal, cavaco e laminados, nos quais são realizados, respectivamente, a oxirredução do minério, a dissolução química ou peletização/compactação, desfibrilamento e a prensagem. A madeira serrada, gerada no processamento primário após o desdobramento segue diretamente para o processamento terciário.

Após o processamento primário dos produtos florestais (madeira em tora e resíduos), seguindo a linha de picagem, são gerados cavacos. Estes cavacos podem ser processados em dissolução química ou peletização/compactação. Após isso, este material processado irá para a etapa secundária, em que uma das vertentes é a produção de pellets e briquetes.

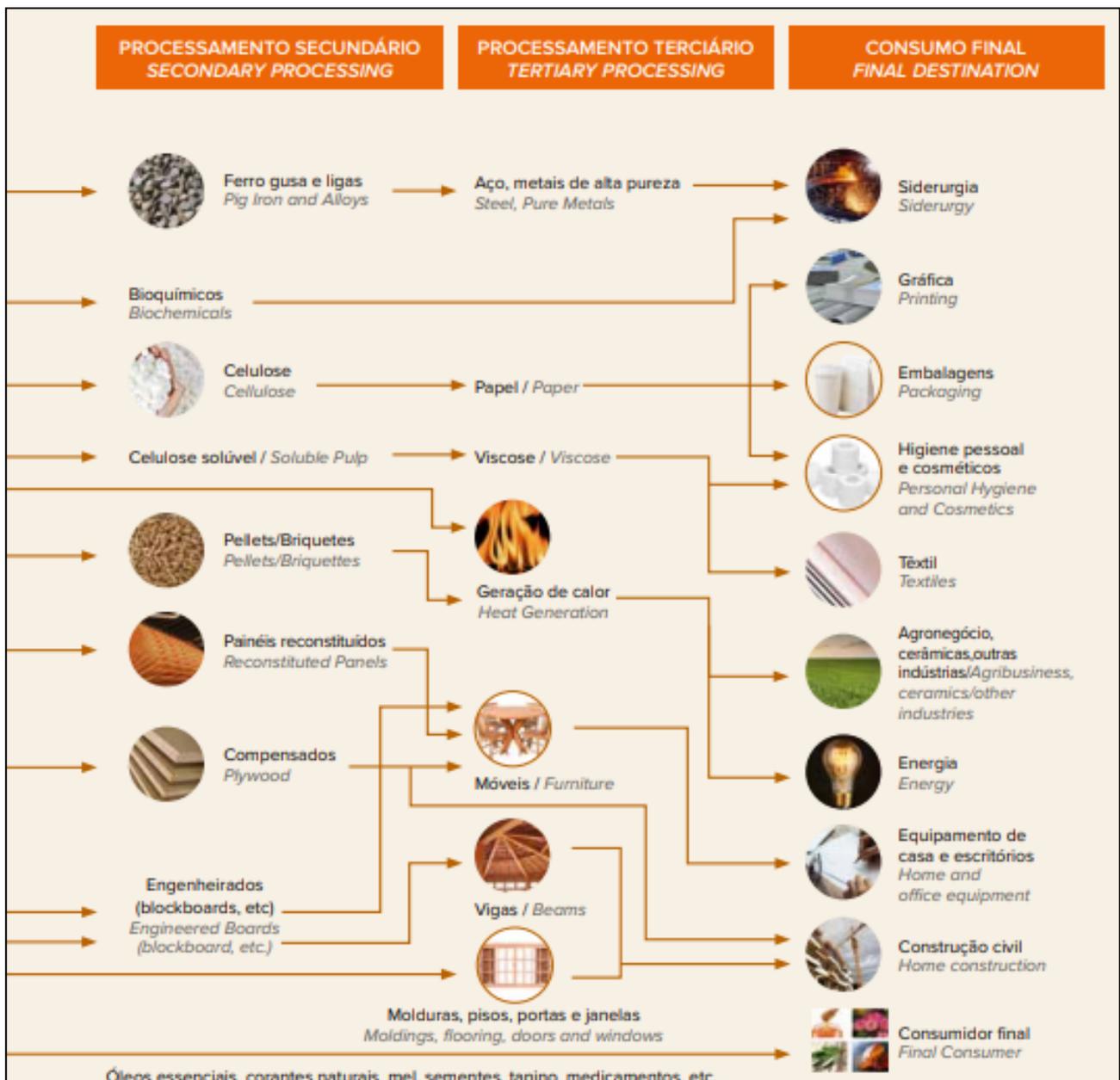


Figura 4 - Cadeia produtiva do processamento secundário ao consumo final do setor de florestas plantadas. Fonte: IBÁ, 2018.

Quando os briquetes são produzidos, eles são utilizados na geração de calor, esta etapa refere-se ao processamento terciário. A geração de calor oriunda da queima dos briquetes possui como consumo final o agronegócio, cerâmicas e outras indústrias e na geração de energia, conforme mostra Figura 4.

O setor de florestas plantadas gerou no ano de 2018 entorno de 52 milhões de resíduos sólidos, sendo que 70,9% são oriundos das atividades florestais e os 29,1% restantes pelas operações industriais, conforme mostra Tabela 1.

ATIVIDADE	ITEM	MILHÕES TON	%
Florestal (70,9%)	Cascas, galhos e folhas	36,11	98,0
	óleos, graxas e embalagens de agroquímicos	0,74	2,0
Subtotal		36,85	100,0
Industrial (29,1%)	Cavacos, Serragem e Licor Preto	9,72	63,2
	Cavacos, Serragem e Aparas de Papel	4,52	29,4
	Lama de Cal e Cinza de Caldeiras	0,70	4,6
	Compostos Químicos e Outros	0,43	2,8
Subtotal		15,37	100,0
Total		52,22	100,0

Tabela 1 – Resíduos gerais gerados por tipo de atividade.
Fonte: Adaptado de IBÁ, 2018.

Além do vasto setor florestal, o café também apresenta grande destaque no Brasil. No ano de 2018, a safra brasileira de café fechou com produção de 61,7 milhões de sacas beneficiadas, crescimento superior a 37% em relação a produção de sacas obtidas na safra de 2018. Este crescimento justifica-se devido ao ciclo de alta bienalidade (produção a cada dois anos), às condições climáticas favoráveis e à melhoria do pacote tecnológico durante o ciclo da cultura (CONAB, 2018).

O Brasil é o país que mais produz café no mundo, aproximadamente 2,2 milhões de hectares de café *arábica* e *conilon* plantados, sendo distribuídos em 15 estados conforme mostra a Figura 5. Os estados que mais produzem café são Minas Gerais e Espírito Santo, respectivamente, absorvendo os dois mais de 75% de toda a produção de café no território nacional (DURÁN *et al.*, 2017).

O crescimento na produção de café do Brasil está aliado ao consumo. O Brasil é o segundo maior consumidor de café do mundo, com um consumo per capita de 6,02 kg/ano de café cru e 4,82 kg/ano de café torrado e moído, apresentando crescimento de 4,8% de 2017 para 2018 no consumo per capita (ABIC, 2019).

De acordo com projeção apresentada pela EUROMONITOR INTERNATIONAL (2020) a perspectiva é que o consumo de café continue em crescimento contínuo até 2021, a taxa estimada de evolução é de 3,0% a 3,5% ao ano. Na Figura 6 é mostrada a evolução do consumo do café no Brasil desde o ano de 1990 até 2018. Pode-se notar o crescimento contínuo e a tendência de continuar com o aumento no consumo. No entanto, o crescimento na produção e no consumo de café gera, conseqüentemente, o aumento na geração de resíduos como, por exemplo, a borra de café. A borra de café é um resíduo sólido gerado na extração dos compostos solúveis do café torrado, podendo ser gerado na produção da

bebida ou na fabricação do café solúvel. Estima-se que a cada uma tonelada de café cru, são gerados em média 480 kg de borra de café e, deste modo, a borra equivale a um resíduo de 50% do café torrado na indústria de café solúvel (DURÁN *et al.*, 2017).

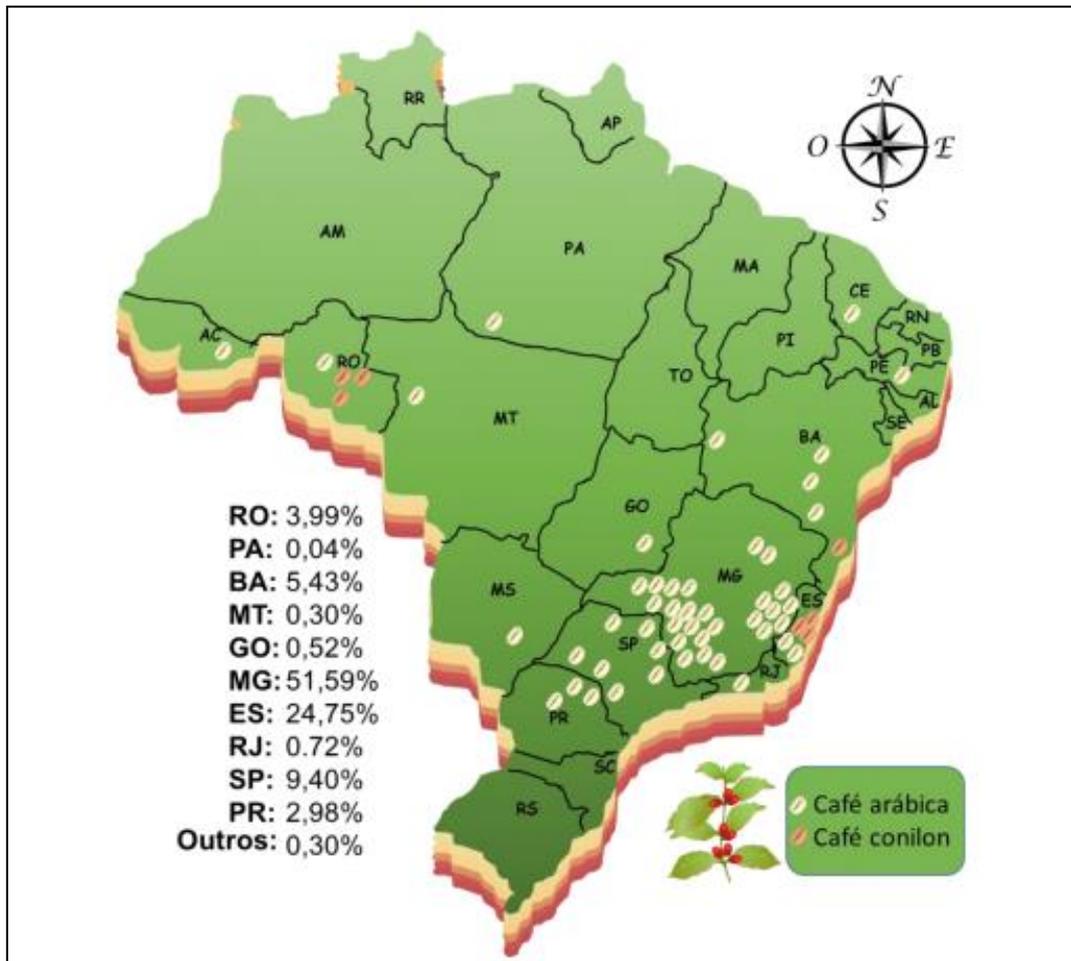


Figura 5 – Distribuição e produção brasileira de café em 2015 (percentual calculado sobre as 43.235.000 milhões de sacas).
 Fonte: DURÁN *et al.*, 2017.

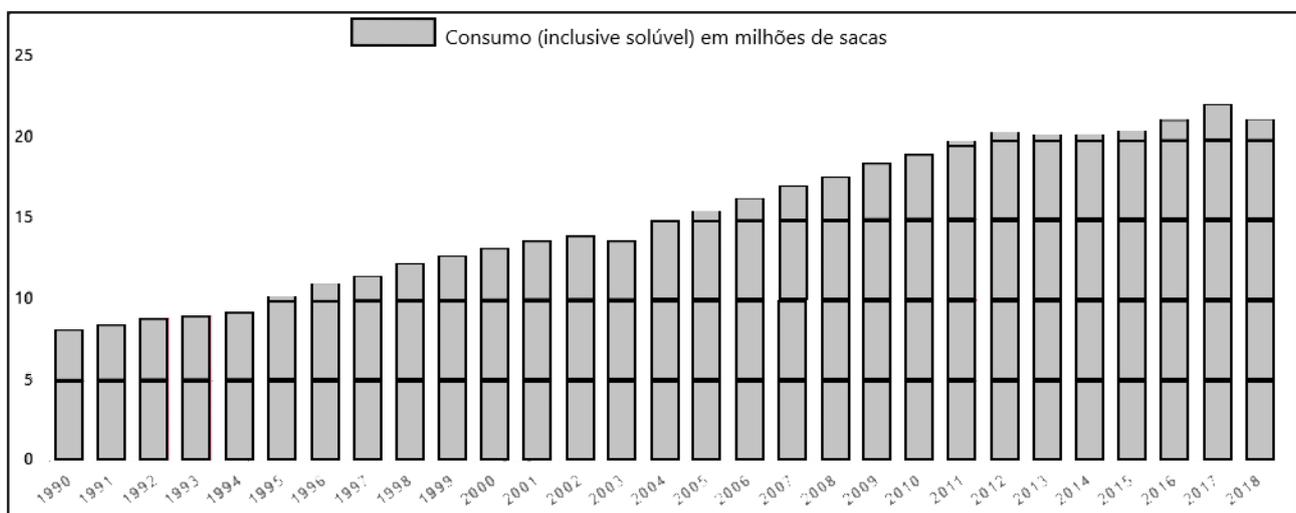


Figura 6 – Evolução do consumo interno de café no Brasil de 1990 a 2018.
 Fonte: ABIC, 2019.

Na Figura 7 está demonstrado de forma ilustrativa os resíduos gerados no processamento do café, iniciando-se com a colheita dos grãos de café e finalizando na geração da borra de café através dos processos industriais de café solúvel e infusão para a preparação da bebida.

Observa-se que no processamento do café são gerados os resíduos abaixo através dos processos relacionados:

- Polpa/Casca – Oriundo do processo de despulpagem;
- Água residual – Oriunda da remoção da mucilagem (fermentação e lavagem) no processo via úmida;
- Pergaminho – Retirado após a secagem pelo processo via úmida;
- Cascas, pergaminhos e outros – Rejeitos gerados no descascamento;
- Película prateada – Gerada no processo de torrefação;
- Frutos secos – Gerados no processo de descascamento através da via seca;
- Borra – Gerado através da produção de café solúvel e da preparação da bebida.

A borra de café e os resíduos agrícolas florestais são considerados resíduos lignocelulósicos. Estes resíduos são classificados assim devido a serem compostos, basicamente, de polímeros de carboidratos complexos, como a celulose, hemicelulose e a lignina. Tais componentes apresentam, aproximadamente, 90% da massa seca do resíduo e a porcentagem restante representa os extrativos e cinzas. No entanto, devido a fatores genéticos e as influências do ambiente, a composição química destes materiais pode variar bastante. De modo geral, os resíduos lignocelulósicos apresentam-se em diferentes granulometrias, baixa massa específica e alto teor de umidade (BALAT, 2010).

Nos processos industriais são gerados diversos tipos de resíduos, estes resíduos podem ser reutilizados energeticamente através de dois diferentes procedimentos tecnológicos: Queimas e biodigestão anaeróbia. Dentre as duas rotas de reutilização, o fator que maior influência na escolha é o teor de umidade do resíduo. Desta forma, por exemplo, os resíduos de serragem são adequados para a queima direta (MARTINEZ *et al.*, 2018).

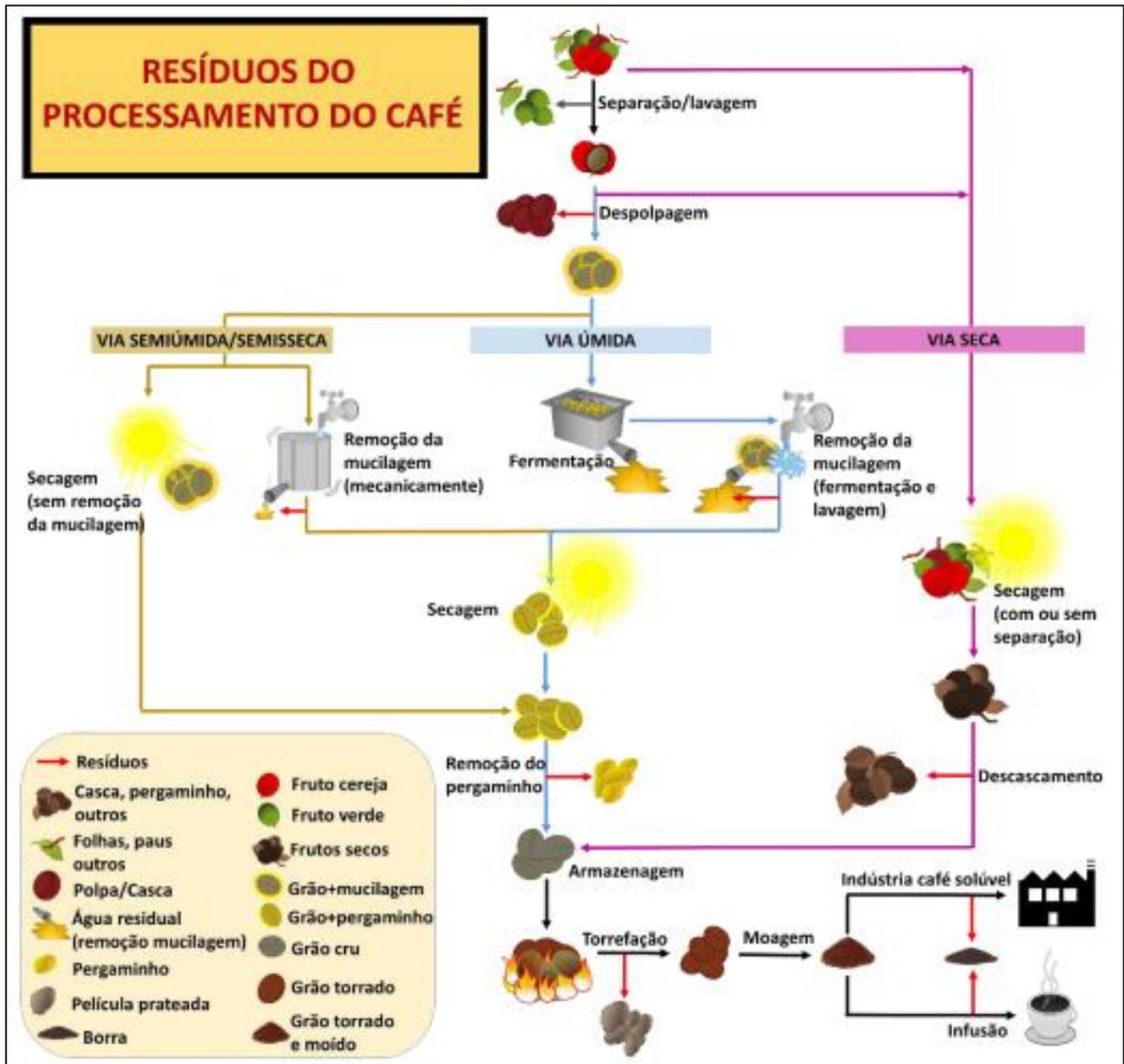


Figura 7 – Esquema ilustrativo dos resíduos gerados na indústria do café.
 Fonte: DURÁN *et al.*, 2017.

No Brasil, muitas indústrias reaproveitam os resíduos lignocelulósicos, através da briquetagem, para fins energéticos, proporcionando o aumento da massa específica energética destes resíduos (PROTÁSIO *et al.*, 2012). Apesar destes briquetes produzidos servirem como combustível alternativo também para consumo doméstico, no Brasil ainda não é difundida essa utilização. Este mercado ainda não se ampliou devido a quesitos técnicos, sendo necessário que os briquetes produzidos apresentem alto padrão de qualidade e aumento em seu desempenho energético.

O parâmetro que exige maior atenção ao se avaliar o potencial energético dos resíduos lignocelulósicos é o poder calorífico (PC). O Poder Calorífico é definido como a

quantidade de calor desprendida ao se realizar a combustão completa da unidade de massa de um material combustível sob determinadas condições (CAMACHO, 2014). Deste modo, para se obter boa eficiência na queima de combustíveis, o PC do material deve apresentar valor expressivo, indicando que o material é bom gerador de energia.

2.2 O processo de briquetagem

A biomassa pode ser utilizada como combustível, podendo ser através da combustão direta ou da gaseificação, precisa passar por um tratamento termomecânico para que sua utilização seja eficaz. A briquetagem é um tratamento termomecânico disponível e um dos mais usuais para este propósito.

A biomassa sólida é convertida em energia através de equipamentos como caldeiras e motores de combustão interna. Estes equipamentos funcionam por meio da combustão direta, da decomposição térmica da carga combustível e da combustão dos produtos resultantes desta decomposição, sendo necessário certa quantidade de oxigênio para atingir a combustão completa do combustível (NOGUEIRA; RENDEIRO, 2008).

A principal forma de utilização da biomassa é através da combustão direta, a qual consiste em transformar a energia química do material utilizado em calor, através das reações dos elementos presentes na biomassa com o oxigênio fornecido. No ponto de vista energético, a combustão direta ocorre em fogões na preparação de alimentos, fornos e caldeiras. O processo de combustão direta é prático, mas muitas vezes sua eficiência é baixa. Entre os problemas da combustão direta podem-se citar a alta umidade e a baixa densidade energética da biomassa a ser utilizada (ANEEL, 2005).

A alto teor de umidade e a baixa densidade da biomassa acarretam inconvenientes como a decomposição da matéria-prima se o material for armazenado por um período de tempo muito longo. Um processo que auxilia na melhoria da eficiência energética na combustão direta é o processo de briquetagem.

A briquetagem consiste em unificar diversas partículas menores em blocos com formatos definidos e de maior tamanho, através da prensagem do material. A partir da briquetagem, subprodutos e até resíduos industriais podem agregar valor comercial. Segundo Rendeiro *et al.* (2008), a briquetagem da biomassa gera briquetes com qualidade superior a qualquer tipo de lenha, obtendo material de densidade energética de até 5 vezes maior.

O processo de briquetagem pode ocorrer em prensas mecânicas, hidráulicas ou de rolos, conforme mostra a Figura 8. Os equipamentos consistem em pressionar a matéria causando uma força de fricção que aquece o material, o diâmetro varia de 20 mm a 105 mm e a massa específica de 1000 a 1300 kg/m³ (RENDEIRO *et al.*, 2008).



(a) (b) (c)
Figura 8 – Prensa (a) mecânica, (b) de rolos e (c) hidráulica, respectivamente.
Fonte: ALIBABA, 2021; LIPPEL, 2021.

A briquetagem é considerada uma tecnologia de compactação, a qual consiste na aplicação de pressão em uma quantidade de matéria-prima com o intuito de transformá-las em um material sólido geométrico de alta massa específica. No século XIX eram produzidos briquetes de turfa a partir de uma máquina pistão. No próximo século, começaram-se a comercializar briquetes de madeiras produzidos a partir de prensas projetadas especificamente para esta função (FILIPPETO, 2008).

Existem diversos meios de compactação de biomassa, dentre eles destacam-se:

- 1) Adição de aglutinantes;
- 2) Forças de Van-der-Waals;
- 3) Forças de valência; e
- 4) Entrelaçamento das partículas.

Os aglutinantes geralmente já estão presentes na matéria-prima, mas podem ser adicionados. Estes ligantes são ativados no processo de compactação através da adição de pressão e do aumento de temperatura. Para os mecanismos 2, 3 e 4 serem ativados, as

partículas devem sofrer deformações e forte aproximação durante a compactação (FILIPPETO, 2008).

De acordo com Navalta *et al.* (2020), algumas características das biomassas, como lignina, lipídios e açúcares, atuam como ligantes naturais, influenciando na qualidade e características dos briquetes produzidos com estes materiais.

Segundo Rendeiro *et al.* (2008), os briquetes em geral possuem tipicamente as características termofísicas que seguem:

- Poder Calorífico Superior a 19,2 MJ/kg;
- Umidade: 12%;
- Cinzas: 2%
- Voláteis: 84%
- Carbono Fixo: 14%; e
- Densidade: 1.200 kg/m³.

O processo de briquetagem influencia de forma positiva nas propriedades físico-químicas dos resíduos. A biomassa compactada apresenta maior massa específica em relação aos resíduos sem compactação, facilitando o transporte e armazenamento. Além disso, a pressão de compactação da biomassa aumenta sua eficiência energética, pois ocorre a elevação da densidade energética do material (LOURENÇO *et al.*, 2017).

De acordo com Rendeiro *et al.* (2008), a utilização dos briquetes possui várias vantagens, sendo elas:

- Uso direto em caldeiras, pizzarias, padarias, lareiras domésticas, cerâmicas, fornos etc., não sendo necessário realizar nenhuma adaptação na fornalha;
- Possui tamanhos padronizados, geralmente cilíndricos ou bolachas;
- São enviados em embalagens de acordo com a exigência do cliente;
- O produto é higiênico e não possui os inconvenientes da lenha (insetos, pequenos roedores, mal odor etc.);
- Devido a compactação da biomassa o volume que o material ocupa é reduzido, o que possibilita o controle e manutenção de estoque; e
- A combustão do briquete é regular, permitindo a fornalha trabalhar de forma contínua e demandada.

2.3 Fatores que afetam a qualidade dos briquetes

Diversos fatores afetam a compactação e influenciam na qualidade do briquete. O fator que obtém grande influência na qualidade do briquete produzido é a granulometria das matérias-primas utilizadas, pois impactam diretamente na resistência mecânica e na durabilidade dos briquetes. Desta forma, não se recomenda a utilização de partículas grandes, partículas pequenas como as de serragem, podem ser utilizadas diretamente no processo de briquetagem. Por este motivo, a biomassa que apresenta granulometria maior deve ser tratada para obter granulometrias menores.

De acordo com GONÇALVES *et al.* (2013) e NAKASHIMA (2013), as partículas finas auxiliam no preenchimento dos espaços vazios no processo de briquetagem, influenciando positivamente na resistência do produto.

Massa específica, umidade e a dimensão dos resíduos são outros fatores que influenciam na produção e qualidade dos briquetes (PADILLA *et al.*, 2016). O alto teor de umidade e a baixa massa específica da biomassa pode ocasionar a decomposição da matéria-prima quando armazenada por longos períodos. A umidade alta também pode ocasionar problemas operacionais, causando instabilidade no sistema, pois diminui a temperatura da zona de combustão e gera perda na eficiência do sistema de combustão (MARAFON *et al.*, 2016).

O teor de umidade impacta no valor do poder calorífico, pois uma fração do calor gerado será consumido para evaporar a água presente no material e também para aquecer os vapores para atingir a temperatura dos demais gases, o que acarreta aumento dos custos com transporte, dificulta a combustão do material, aumenta o volume dos produtos de combustão e a quantidade de emissão de monóxido de carbono (SANTOS *et al.*, 2013).

Zhang *et al.* (2019) avaliaram o efeito da temperatura, pressão e umidade na produção de briquetes de farelo de painço. Os autores concluíram que o aumento da temperatura e redução da umidade acarretaram o aumento da massa específica e, além disso, os autores conseguiram verificar que o aumento da pressão gera o aumento nas propriedades físicas dos briquetes e na sequência a queda em seus valores, conforme mostra Figura 9. Os autores apontam ainda que para o material estudado, a faixa de umidade para a produção de briquetes de qualidade é de 5 a 10%.

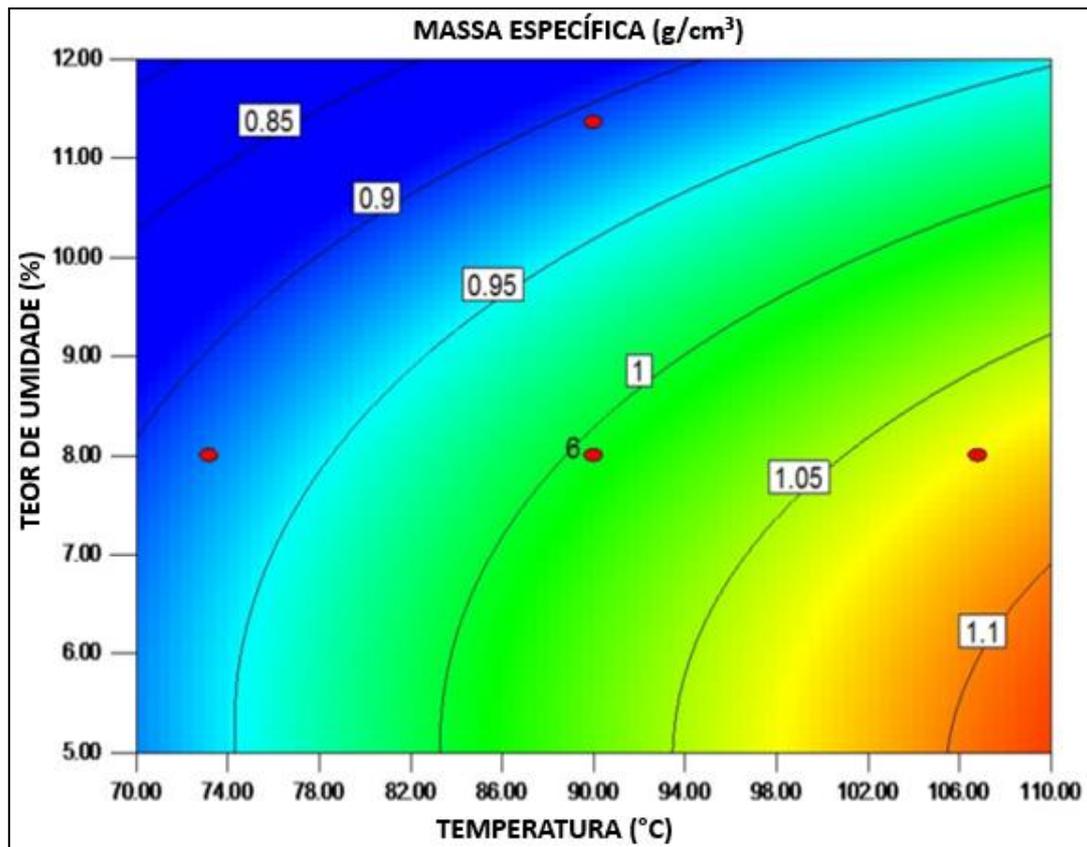


Figura 9 – Efeito da temperatura e teor de umidade na massa específica dos briquetes de painço. Fonte: Adaptado de Zhang *et al.*, 2019.

Outro fator importante para a qualidade do briquete é a temperatura. A transferência de calor está relacionada com o grau de compactação das partículas de biomassa e com o diâmetro dos briquetes, além de outros fatores. No processo de briquetagem, quanto maior a compressão, mais compactas se tornam as partículas de biomassa. O diâmetro dos briquetes também influencia na transferência de calor. De acordo com Li *et al.* (2018), quanto maior o diâmetro dos briquetes menor é a temperatura central do biocombustível. Ou seja, a transferência de calor diminui à medida que o diâmetro aumenta.

O volume da matéria-prima está diretamente relacionado com a massa específica dos briquetes. Quanto menor o volume, maior a massa específica. Os briquetes com baixa massa específica precisam de maior energia na compactação, desfavorecendo o processo de briquetagem. O tamanho das partículas também influencia na massa específica dos briquetes, quanto menor as partículas, melhor a compactação dos briquetes e, conseqüentemente, melhor a massa específica.

O processo de compactação da biomassa é realizado com aplicação de pressão. Esta pressão inserida no sistema gera elevação da temperatura. Altas temperaturas reduzem a umidade da biomassa, ocasionando um produto com melhor poder calorífico. O

teor de umidade tem influência direta sobre a eficiência de conversão e a qualidade do produto (KANG *et al.*, 2017).

No entanto, um briquete deve manter equilibrado o teor de umidade, indicado o valor de 12%, pois um briquete com umidade elevada ou abaixo do indicado apresenta baixa resistência, o danificando em seu processo de acondicionamento e transporte (LOURENÇO *et al.*, 2017).

Zhang *et al.* (2019) verificaram em seu estudo redução que o teor de umidade contribuiu no aumento da resistência ao impacto dos briquetes, conforme ilustra a Figura 10.

Os briquetes recebem diversos impactos e quedas nas etapas de manuseio, transporte e armazenamento, comprometendo sua integridade e eficiência. Por esse motivo, a importância de se obter briquetes com elevada resistência mecânica (LOURENÇO *et al.*, 2017).

Um meio de avaliar a resistência mecânica é através do ensaio de resistência à tração por compressão, o qual indica a carga máxima que um corpo de prova pode aguentar até se quebrar. Usa-se este ensaio para estimar a tensão de compressão entre o peso dos briquetes superiores nos briquetes inferiores durante o armazenamento, transporte e manuseio, sendo que quanto maior o valor da resistência a compressão, melhor a integridade dos briquetes (OKOT, D; BILSBORROW, P; PHAN, A; 2019).

Um dos principais pontos que reduzem a confiabilidade das plantas de geração de vapor é a corrosão nas caldeiras de queima de biomassa. Fatores que acarretam na oxidação do equipamento pode estar relacionado ao ambiente gasoso agressivo ou pelos compostos químicos presentes nas cinzas. A quantidade de cinzas presente na biomassa é um dos fatores principais relacionados a biomassa que leva a corrosão e incrustações nos sistemas de aquecimento (MAROFAN *et al.*, 2016).

O teor de cinzas é a fração que permanece como resíduo inorgânico após a ignição da combustão de determinado material. A porcentagem de cinzas permanentes varia de 0,5% a mais de 5%, dependendo da espécie de combustível sólido e da quantidade de materiais inorgânicos presentes na amostra. Recomenda-se que o briquete seja composto por um material com conteúdo de cinzas menor que 4% (CHEN *et al.*, 2017).

O teor de matéria volátil apresenta um importante papel no processo de ignição e nas etapas iniciais da combustão da biomassa, pois indica o comportamento de degradação da biomassa estudada, podendo se degradar mais facilmente e, com isso, ajudar na manutenção da chama da combustão (CORTEZ *et al.*, 2008).

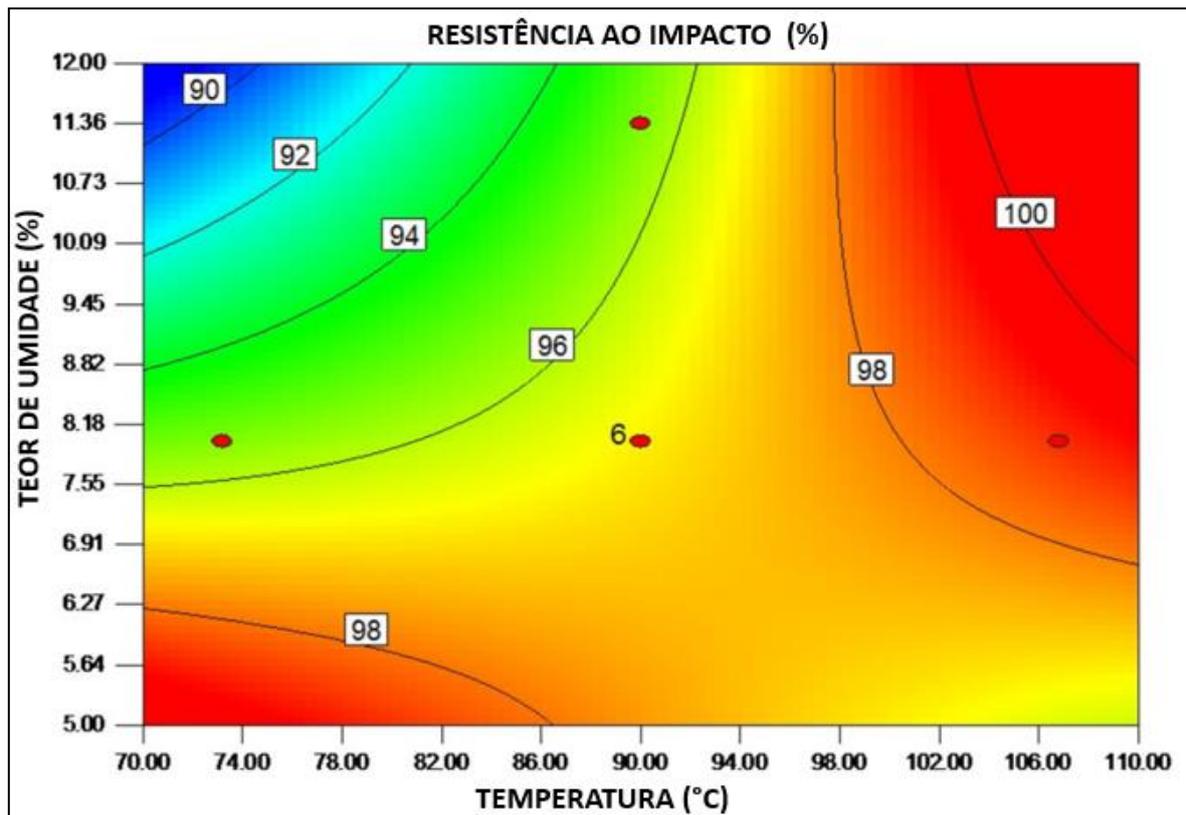


Figura 10 – Efeito da temperatura e teor de umidade na resistência ao impacto dos briquetes de painço.

Fonte: Adaptado de Zhang *et al.*, 2019.

Diez *et al.* (2012) realizaram um estudo no qual verificaram a taxa de evolução da matéria volátil em função da temperatura de pirólise de alguns materiais, conforme é mostrado na Figura 11. Os autores verificaram que a quantidade de matéria volátil desempenha um papel importante no desenvolvimento da fluidez dos materiais estudados (carvão betuminoso e vegetal, serragem de eucalipto, alcatrão solúvel e insolúvel em água).

A quantidade de carbono fixo também influencia na qualidade do briquete. O teor de carbono fixo indica a geração de calor durante a combustão, devido a reação do carbono com o oxigênio (TAMILVANAN, 2013).

O poder calorífico superior é a quantidade de calor desprendida quando um material entra em combustão e os gases da descarga são resfriados acarretando na condensação do vapor de água. O seu valor corresponde a soma da energia liberada na forma de calor e a energia gasta na vaporização da água formada na reação de oxidação. No caso dos combustíveis que não contenham hidrogênio em sua composição, o valor do poder calorífico superior é igual ao do inferior, pois não ocorre formação de água (JENKINS *et al.*, 1990).

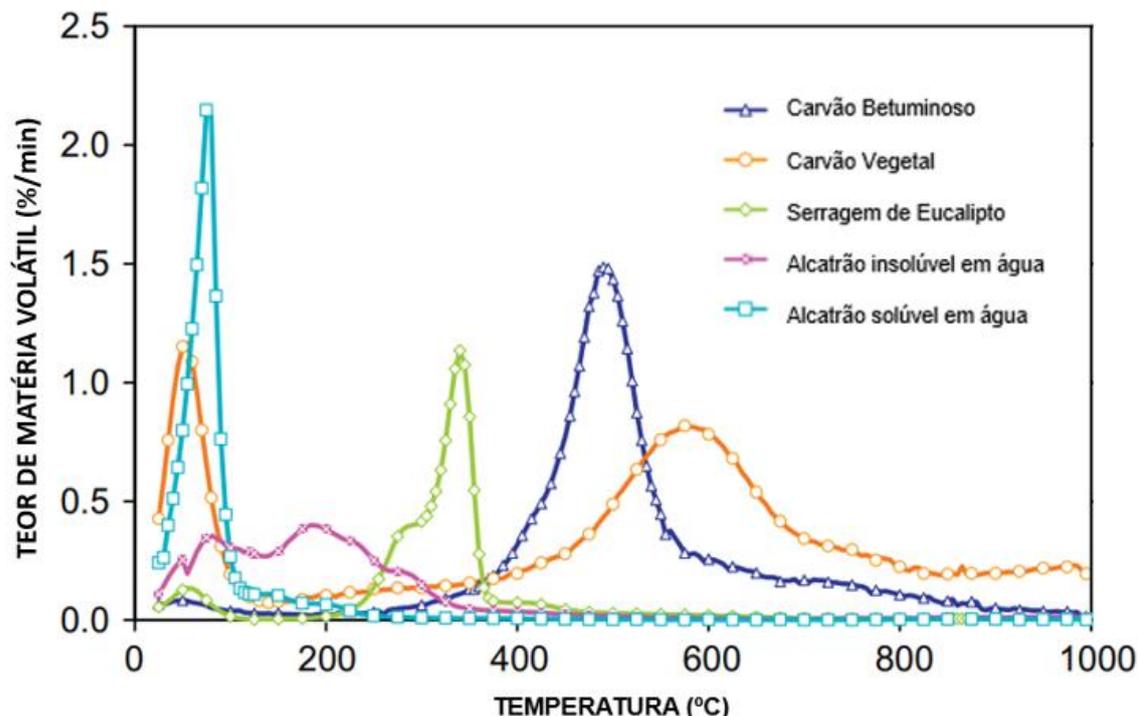


Figura 11 – Efeito da temperatura no teor de matéria volátil em diferentes materiais.
 Fonte: Adaptada de Diez *et al.*, 2012.

Na Tabela 2 estão representados os PCS de algumas biomassas encontrados no estudo do JENKINS *et al.* (1990). O poder calorífico é a propriedade mais importante a considerar quando se discute a escolha de um combustível. O poder calorífico, pode ser obtido experimentalmente através de uma bomba calorimétrica, sendo definido como a quantidade de energia na forma de calor liberada durante a combustão completa da unidade de massa do combustível. Seu valor é quantificado em termos de energia por conteúdo por quantidade de massa, podendo ser expressa em KJ/kg ou cal/g (JENKINS, 1998; RENDEIRO *et al.*, 2008).

Tipo de biomassa	Poder Calorífico Superior
Pinus	4.780,12 kcal/kg
Eucalipto	4.641,49 kcal/kg
Casca de Arroz	3.857,55 kcal/kg
Bagaço de cana	4.141,97 kcal/kg
Casca de coco	4.550,67 kcal/kg
Sabugo de milho	4.486,14 kcal/kg
Ramas de algodão	4.364,25 kcal/kg
Resíduos Sólidos Urbanos	4.749,04 kcal/kg

Tabela 2 – Poder calorífico superior das biomassas.
 Fonte: JENKINS *et al.*, 1990.

Capítulo 3

Materiais e Métodos

3.1 Borra de café e serragens

Neste trabalho, os materiais utilizados foram a borra de café, serragem de pinus e serragem de cambará, conforme amostras ilustradas Figura 12. Todos os materiais foram obtidos por doação. A borra de café utilizada é um resíduo coletado de duas cafeterias no bloco de engenharia da Pontifícia Universidade Católica do Paraná – Campus Curitiba, a partir de máquinas de café automáticas, que processam grãos de café extraíndo a bebida a altas temperaturas. A borra de café coletada para a produção dos briquetes é proveniente do café 100% arábica (*Coffea Arabica*).



(a) (b) (c)
Figura 12 – Serragem de (a) Pinus, (b) Borra de café e (c) Serragem de Cambará.
Fonte: Autoria própria, 2021.

A serragem da madeira de *Pinus sp* e de Cambará utilizada foi doada por duas empresas do ramo de madeiras, uma localizada em Curitiba outra em Tunas, ambas cidades do Paraná. A borra de café e as serragens passam, separadamente, pelo processo de determinação granulométrica. Após isso, os materiais são acondicionados separadamente para preparação dos briquetes.

No presente estudo, realizou-se diferentes tratamentos para a briquetagem, conforme descrito nas Tabela 3 e Tabela 4. A borra de café foi adicionada em cada tratamento até o exequível. Durante a briquetagem dos tratamentos com 40% e 50% de

adição de borra de café nos tratamentos com serragem das espécies pinus e cambará, respectivamente, não foi possível continuar produzindo os briquetes, conforme resultados apresentados nas próximas sessões.

	Amostras					
	B-01	P-01	P-02	P-03	P-04	P-05
borra de café	100%	0%	10%	20%	30%	40%
serragem de pinus sp.	0%	100%	90%	80%	70%	60%

Tabela 3 – Amostras de briquetes com serragem de pinus sp.
Fonte: Autoria própria, 2021.

	Amostras					
	C-01	C-02	C-03	C-04	C-05	C-06
borra de café	0%	10%	20%	30%	40%	50%
serragem de cambará	100%	90%	80%	70%	60%	50%

Tabela 4 - Amostras de briquetes com serragem de cambará.
Fonte: Autoria própria, 2021.

As propriedades dos briquetes de borra de café com serragem de pinus e cambará considerados neste estudo, incluem-se nas seguintes análises:

- a) Análise Imediata: Teor de umidade, Teor de cinzas, Teor de matéria volátil e Teor de carbono fixo;
- b) Análise Mecânica: Classificação Granulométrica, Massa Específica Aparente e Resistência à tração por compressão diametral;
- c) Análise Calorífica: Poder Calorífico Superior e Massa Específica Energética.

Todas as análises se deram na forma de triplicatas.

3.2 Análise Imediata

A análise imediata das matérias-primas a serem utilizadas fornece informações do teor de umidade, teor de carbono fixo, teor de matéria volátil, teor de cinzas e teor de carbono fixo. O teor de carbono fixo presente no material indica uma relação diretamente proporcional com os teores de lignina, extrativos e massa específica da amostra analisada e inversamente proporcional ao teor de holocelulose (MARAFON *et al.*, 2016).

O teor de umidade é determinado de acordo com a norma ASTM D 3173-87 (1991). O procedimento baseia-se no cálculo da redução do peso de determinada amostra quando submetida a um aquecimento em determinadas condições (KONGPRASERT, 2019). A análise ocorre através do equipamento METTLER TOLEDO que submete a amostra em determinadas condições de aquecimento, conforme mostra Figura 13.



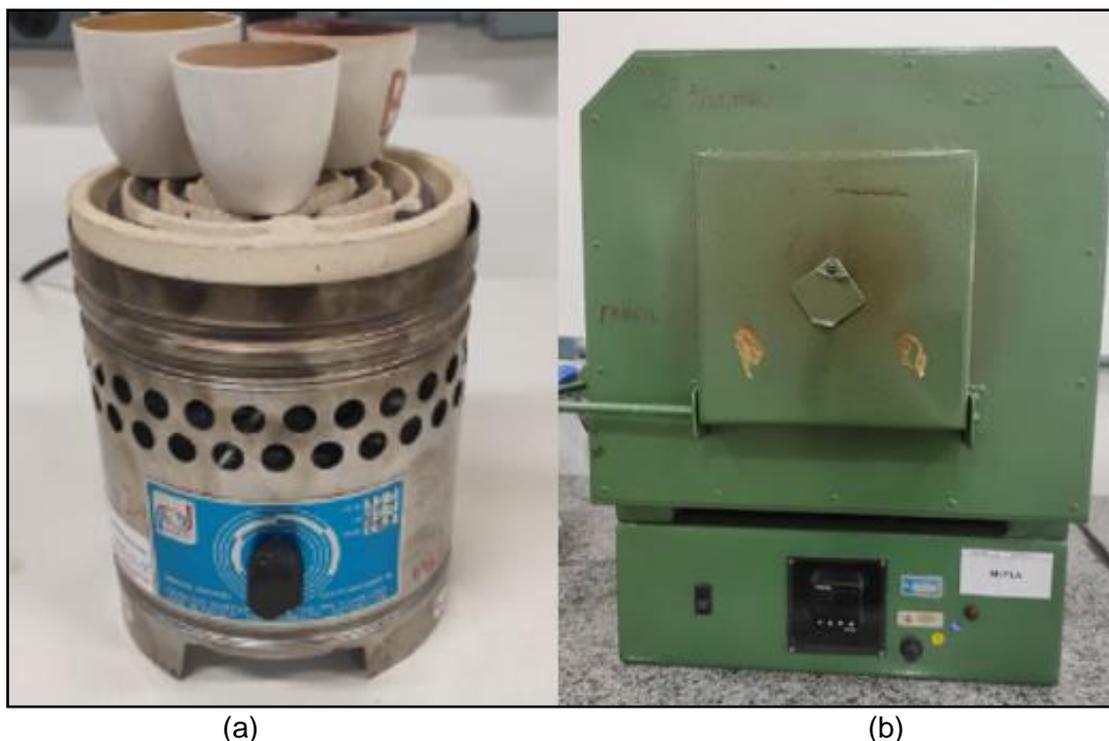
Figura 13 - Teor de umidade do pó de serra de pinus sp.
Fonte: Autoria própria, 2021.

O Teor de cinzas pode ser determinado conforme a ASTM D 1102-84 (2007), através da pesagem do material permanente após a queima da amostra sob condições rígidas de controle de peso da amostra, temperatura, tempo e atmosfera.

A análise ocorre com o aquecimento graduado de um grama de amostra, em um cadinho de porcelana, em forno de mufla. O aquecimento inicia-se em temperatura ambiente e eleva-se a temperatura de aquecimento gradualmente até o atingimento de 500°C durante a primeira hora, após isso, até o atingimento de 750°C no final da segunda hora, mantendo essa última temperatura por mais duas horas.

Durante o processo de aquecimento, mantém-se uma taxa de fluxo de ar de 2-4 mudanças por minuto do volume relativo do forno. Na sequência, a amostra é resfriada e medida novamente.

Na Figura 14 estão representados os equipamentos utilizados para calcinação e para queima da amostra em mufla.



(a) (b)
Figura 14 - Equipamento para (a) calcinação da amostra e (b) mufla, respectivamente.
Fonte: Autoria própria, 2021.

O cálculo do Teor de cinzas é descrito por:

$$\% \text{ Cinza} = \left[\frac{(A - B)}{C} \right] \times 100 \quad (1)$$

onde:

A = Massa do cadinho com a tampa mais os resíduos de cinzas (g);

B = Massa do cadinho com a tampa (g);

C = Massa da amostra utilizada antes da queima (1,0 g).

A análise da matéria volátil dos briquetes pode ser realizada de acordo com a norma ASTM D 3175-89 (1991). Esta metodologia determina, percentualmente, a quantidade de produtos gasosos liberados sob determinadas condições de aquecimento. A quantidade de matéria volátil desprendida do material é estabelecida de acordo com a perda de peso da amostra corrigida para o teor de umidade.

O procedimento consiste no aquecimento de um grama de amostra do briquete em um cadinho de platina com tampa em uma mufla pré-aquecida a 800°C durante 12 minutos. Deve-se manter um fluxo de ar durante o aquecimento variando de 2 a 4 variações por

minuto. Após aquecimento, o cadinho deve ser resfriado a temperatura ambiente e novamente pesa-se a amostra.

As equações que seguem demonstram as etapas do cálculo de matéria volátil das amostras:

$$\% \text{Perda de Peso} = \left[\frac{(A - B)}{A} \right] \times 100 \quad (2)$$

onde:

A = Massa da amostra utilizada (g);

B = Massa da amostra após aquecimento (g).

$$\% \text{ Matéria Volátil} = C - D \quad (3)$$

onde:

C = Perda de Peso (%);

D = Teor de umidade (%).

O método para o cálculo de carbono fixo expressa a quantidade de matéria orgânica não volátil presente em uma determinada amostra. O cálculo baseia-se na soma em porcentagem de umidade, cinzas e matéria volátil; subtraindo o resultado de 100, para a obtenção do teor de carbono fixo, conforme segue,

$$\% \text{ Carbono Fixo} = 100 - (A + B + C) \quad (4)$$

onde:

A = Teor de umidade (%);

B = Teor de cinzas (%);

C = Teor de matéria volátil (%).

3.3 Análise Mecânica

Os parâmetros avaliados no âmbito mecânico são: Classificação Granulométrica; Moldagem dos briquetes; Massa específica aparente; e Resistência à Tração por Compressão Diametral.

A classificação granulométrica da borra de café e das serragens é realizada através de uma sequência de peneiras com diferentes aberturas. Estas peneiras são acopladas a um agitador orbital de peneiras com batidas intermitentes, conforme mostra Figura 15 (a). Utiliza-se uma quantidade de aproximadamente 50 gramas para cada material e agitação de 15 minutos.

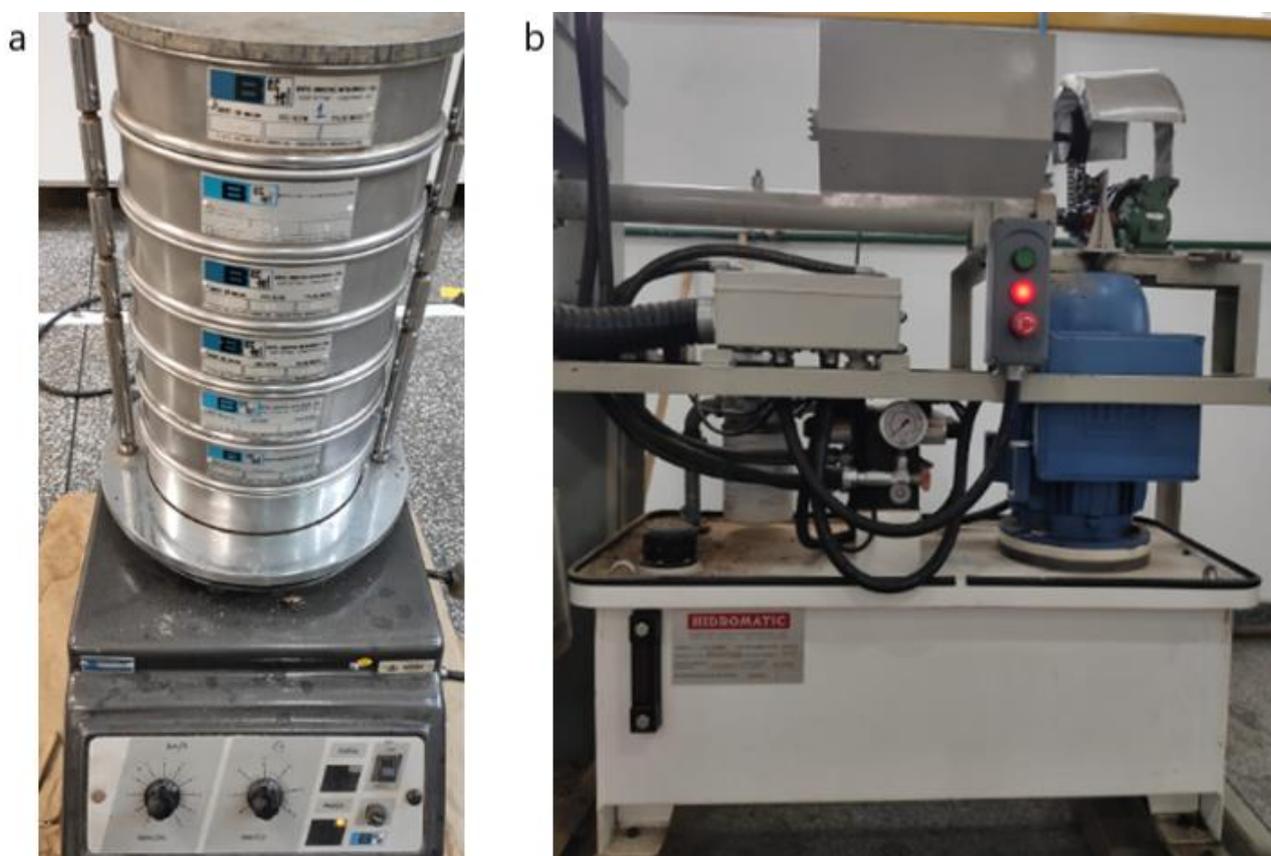


Figura 15 – (a) Sistema de peneiramento (b) Prensa hidráulica.
Fonte: Autoria própria, 2021.

Os materiais são testados na sequência de peneiras 10-16-20-28-35-65-80 *Mesh*, de acordo com testes preliminares, conforme descrito na Tabela 5.

Realizou-se misturas das biomassas de borra de café com as serragens de pinus em proporções mássicas de 10:90; 20:80; 30:70 e 40:60. A proporção de borra de café com serragem de cambará foi de 10:90; 20:80; 30:70, 40:60 e 50:50. Além disso, foram produzidas amostras de briquetes com 100% de serragem de pinus e de cambará.

Após o preparo das amostras, cada composição passou para o processo de briquetagem em uma prensa hidráulica com compactação de 12 toneladas e moldes de 58,64 mm de diâmetro, conforme ilustrado na Figura 15 (b).

ASTM (Mesh)	ABNT (mm)
10	2,000
16	1,190
20	0,841
28	0,600
35	0,500
65	0,212
80	0,177

Tabela 5 – Dimensões das peneiras.
Fonte: Autoria própria, 2021.

O tempo de prensagem dos briquetes foram de 3 segundos. O funcionamento deste equipamento ocorre através da força exercida do pistão ao briquete. A capacidade do tanque da prensa hidráulica é de 70 litros.

De acordo com Song *et al.* (2019), a densidade aparente e a resistência à tração por compressão aumentam à medida que a pressão de briquetagem aumenta e, desta forma, trabalhou-se no presente trabalho com a pressão máxima de briquetagem do equipamento.

Chrisostomo (2010) demonstrou a eficiência do processo de prensagem sem a utilização de temperatura e sem o uso de aglutinantes e, desta forma, trabalhou-se com este modelo. Os próprios materiais utilizados possuem aglutinantes naturais em sua composição, a borra de café possui o óleo e as serragens a lignina.

Para cada conjunto de borra de café e serragem foram confeccionadas três repetições e, após a prensagem, mediu-se o diâmetro e a espessura de cada briquete com o auxílio de um paquímetro digital e mediu-se a massa através de uma balança digital. Na Figura 16 estão representadas as dimensões dos briquetes produzidos nos diferentes tratamentos. Salienta-se que o diâmetro dos briquetes é invariável, pois o mesmo é determinado de acordo com a dimensão da própria prensa hidráulica.

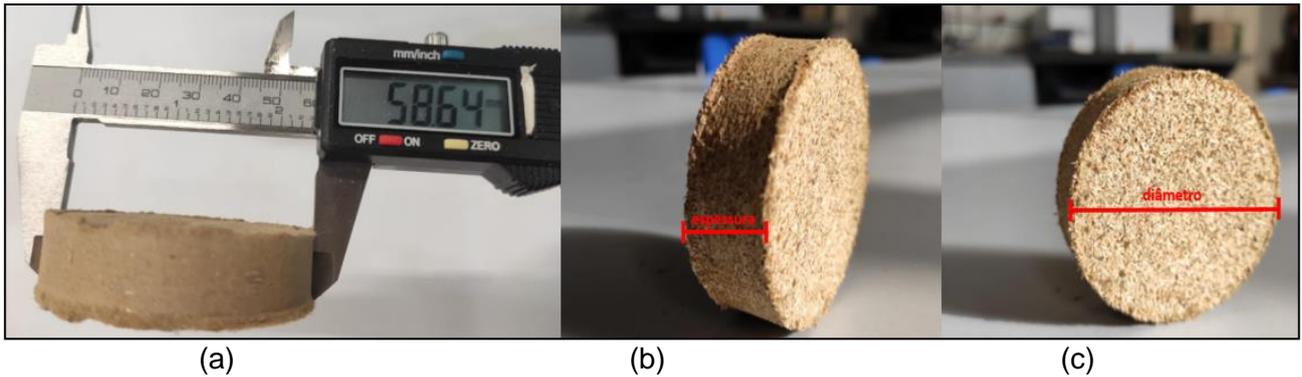


Figura 16 - Representação das dimensões dos briquetes (a) medição do diâmetro, (b) espessura e (c) diâmetro.

Fonte: Autoria própria (2020).

A massa específica aparente dos briquetes produzidos dos diversos tratamentos, foi determinada através do cálculo estequiométrico, em que se obtém o volume,

$$V = [\pi \times (d/2)^2 \times E]/1000 \quad (5)$$

onde:

V = Volume do briquete (cm³);

d = Diâmetro do briquete (mm);

E = Espessura do briquete (mm).

através das medições com o auxílio de um paquímetro e a massa é obtida através de uma balança analítica de alta precisão.

A Eq. (6) apresenta o cálculo da massa específica aparente. O diâmetro dos briquetes é o mesmo e corresponde a 58,64 mm.

$$Da = m/V \quad (6)$$

onde:

m = Massa do briquete (g);

V = Volume do briquete (cm³);

Da = Massa específica aparente (g/cm³).

A resistência à tração por compressão diametral é uma propriedade relevante para a caracterização dos briquetes relativo ao seu comportamento dimensional e está

diretamente relacionada à estabilidade e integridade dos briquetes durante manuseio e transporte, se os seus valores não forem adequados, podem ocorrer rupturas e levar à abrasão dos materiais (PROTÁSIO *et al.*, 2011).

A resistência à tração por compressão diametral dos briquetes foi realizada segundo diretrizes da norma ABNT NBR 7222 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1994).

Os ensaios mecânicos dos briquetes produzidos foram realizados na Máquina Universal de Ensaio EMIC modelo DL 500, utilizando-se uma célula de carga com capacidade de 500 kgf e velocidade de ensaio de 100 mm/s, conforme ilustrado na Figura 17 (a), em que o esforço foi realizado na parte superior do briquete de modo individual.

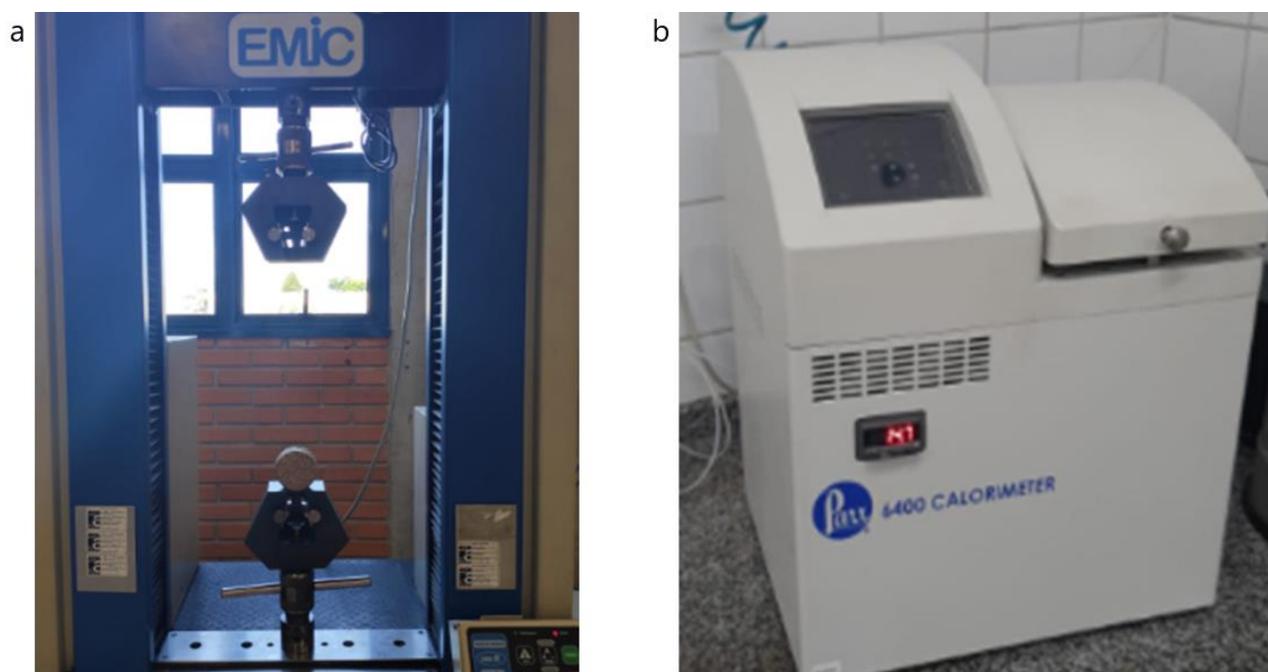


Figura 17 – (a) Equipamento do ensaio de resistência à compressão diametral (b) Equipamento de Poder Calorífico Superior.

Fonte: Autoria própria (2020).

3.4 Análise Calorífica

Na análise calorífica são analisados o poder calorífico superior das matérias-primas dos briquetes e a massa específica energética.

A análise do poder calorífico superior é realizado em uma bomba calorimétrica Parr® contendo oxigênio com pressão inicial de 20 a 40 atm e temperatura final de 20 a 35° C, seguindo a norma ASTM D 2015-91 (1991), método que determina a quantidade de calor produzido em uma combustão de uma quantidade unitária de uma determinada substâncias sob condições controladas, conforme mostra Figura 17 (b).

Inicialmente pesa-se um grama da amostra de briquete e a insere em um cadinho. A amostra deve ser levemente comprimida no cadinho. Coloca-se o cadinho suspenso dentro da bomba calorimétrica. Passa-se um fio de 10 cm de ferro através da amostra, ligando uma de suas extremidades à haste que suporta o cadinho e a outra à haste que liga a bomba.

O fio de ferro não deve encostar nas paredes da bomba. Em seguida, é inserido 1 mL de água na bomba antes de fechá-la. A bomba é então pressurizada com a admissão do cilindro de oxigênio sob pressão. Eleva-se a pressão do oxigênio na bomba próximo a 25 atm, fecha-se o cilindro e desliga a bomba.

No recipiente calorimétrico deve ser inserida uma massa de água à temperatura de 1,5 a 2,0°C abaixo da temperatura ambiente. A bomba é então colocada no recipiente calorimétrico. Liga-se o equipamento que realiza a ignição e, após 5 minutos, o resultado do PCS é informado no leitor. Realiza-se o procedimento três vezes para cada amostra.

A massa específica energética, D_e , é calculada a partir do quociente entre o poder calorífico superior, PCS, e a massa específica aparente, D_a , tal como:

$$D_e = PCS/D_a \quad (7)$$

Capítulo 4

Resultados e Discussões

4.1 Análise Imediata

Na análise imediata são analisados os parâmetros de umidade, cinzas, matéria volátil e carbono fixo.

O teor de umidade foi medido através do analisador de umidade da *Mettler Toledo*. Na Tabela 6 pode-se observar que à medida que a concentração de borra de café aumenta nos tratamentos, o teor de umidade também aumenta.

Amostras	Teor de umidade médio
B-01	33,48% ± 1,12%
P-01	9,09% ± 0,01%
P-02	11,60% ± 0,08%
P-03	13,55% ± 0,42%
P-04	14,48% ± 0,20%
P-05	15,09% ± 0,13%
C-01	9,34% ± 0,12%
C-02	12,50% ± 0,18%
C-03	14,23% ± 0,15%
C-04	14,87% ± 0,15%
C-05	15,45% ± 0,14%
C-06	20,59% ± 0,18%

Tabela 6 – Valores do teor de umidade médio dos briquetes.

Fonte: Autoria própria, 2021.

As matérias primas borra de café, serragem de pinus e serragem de cambará apresentaram, respectivamente, teor de umidade médio de 33,48%±1,12%, 9,09%±0,01% e 9,34%±0,12%.

Observa-se que o teor de umidade mais alto é o da borra de café (B-01). Salienta-se que as serragens foram obtidas de madeiras e a borra de café em cafeterias, não foi realizado nenhuma secagem prévia nos materiais.

Na Figura 18 verifica-se o comportamento crescente do teor de umidade com a adição da borra de café, sendo que o tratamento com serragem de cambará apresenta os maiores valores de umidade quando comparado ao pinus.

A tendência das curvas do teor de umidade é crescer até a umidade máxima que corresponde ao valor da borra de café. Quando próxima a esse valor, a tendência das curvas é ficarem próximas de um valor constante.

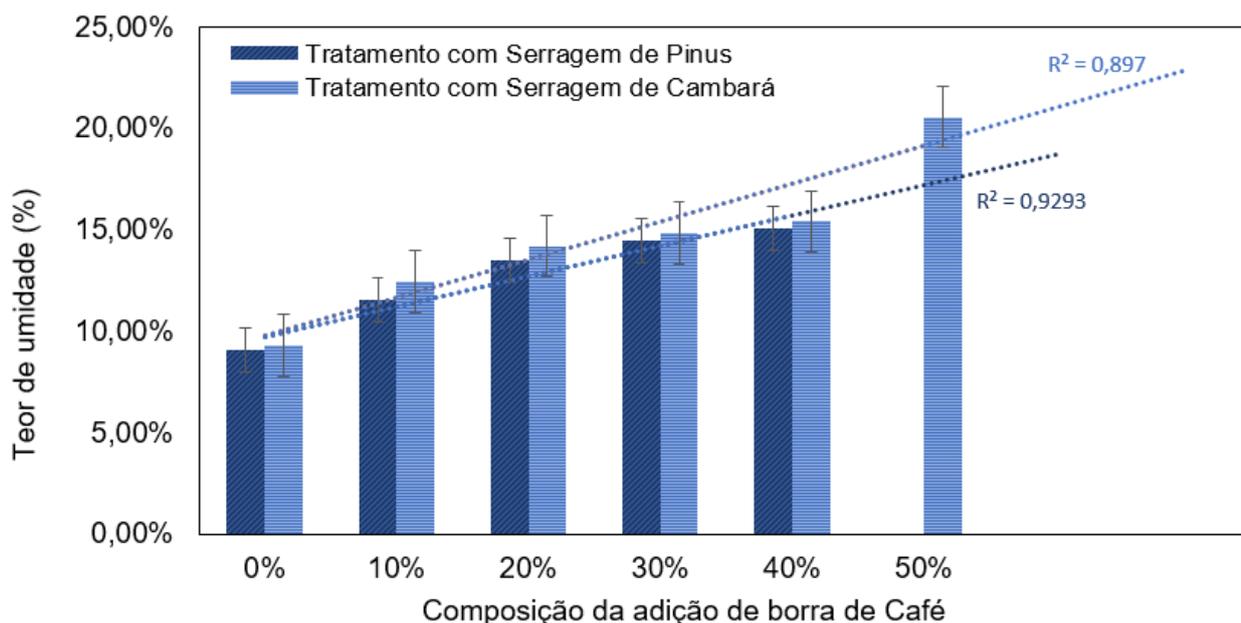


Figura 18 – Perfis do teor de umidade nos briquetes com erro padrão.

Fonte: Autoria própria, 2021.

O teor de cinzas é um parâmetro desfavorável na produção de briquetes quando apresentado em valores altos, pois está ligado inversamente ao poder calorífico do material e pode gerar danos nos equipamentos de queima devido a incrustação de cinzas.

CHEN *et al.* (2017), recomenda que briquetes sejam produzidos com materiais que apresentem conteúdo de cinzas inferior a 4%. Para as matérias-primas utilizadas, borra de café (B-01), serragem de pinus (P-01) e serragem de cambará (C-01), os valores médios do teor de cinzas foram de $2,28\% \pm 0,08\%$, $4,38\% \pm 0,07\%$ e $3,07\% \pm 0,07\%$, respectivamente, conforme mostra Tabela 7.

Na Figura 19 verifica-se o comportamento decrescente do teor de cinzas com o crescimento da proporção de adição de borra de café, sendo que o tratamento com serragem de cambará apresenta os menores valores de teor de cinzas e valores mais uniformes, isto porque a diferença entre o teor de cinzas das matérias envolvidas neste tratamento é menor do que a do tratamento com serragem de pinus.

Observa-se que a serragem de pinus apresenta maior teor de cinzas, ou seja, todos os tratamentos com este material apresentam maior índice de cinzas relacionado ao tratamento de cambará com a mesma proporção de adição de borra de café.

A matéria volátil corresponde aos hidrocarbonetos e outros gases presentes na amostra que são eliminados durante aquecimento. Na Tabela 7 é possível verificar os valores medidos de voláteis nas amostras de briquetes.

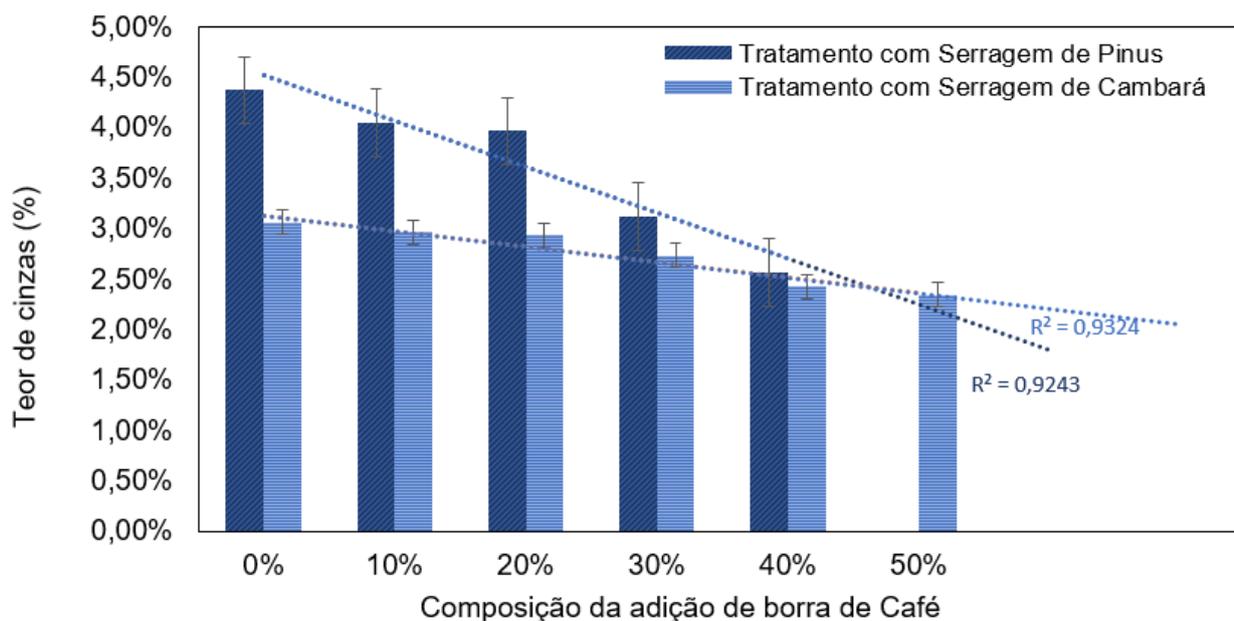


Figura 19 – Perfis do teor de cinzas nos briquetes com erro padrão.
Fonte: Autoria própria, 2021.

Na Figura 20 verifica-se o comportamento crescente dos perfis de teor de matéria volátil em função da adição de borra de café em diferentes proporções. Nota-se que o tratamento com serragem de cambará apresenta os maiores valores de voláteis, porém os valores são quase constantes devido à proximidade dos valores de matéria volátil nas matérias-primas envolvidas.

Pode-se observar que houve certo equilíbrio no comportamento dos teores de matérias voláteis nas amostras de briquetes, sendo que a serragem de pinus (P-01) apresentou o menor índice de matérias voláteis e a borra de café (B-01) o maior índice, $4,62\% \pm 0,12\%$. De acordo com Santiago *et al.* (2007), temperaturas mais baixas favorecem o maior índice de voláteis na constituição dos carvões. Quanto maior o teor de matéria volátil nas biomassas, maior a facilidade de incendiar e queimar o material, no entanto, a combustão sofre interferência dificultando seu controle.

O teor de matéria volátil tem influência direta no teor de carbono fixo. O índice de matérias voláteis e carbono fixo são inversamente proporcionais.

As serragens utilizadas apresentam alto índice de carbono fixo e, conseqüentemente, baixo teor de voláteis, indicando ser um combustível de queima mais lenta, ou seja, necessitará de mais tempo de residência na caldeira ou fornalha para ter sua queima completa. Já a borra de café apresenta o menor índice de carbono fixo, 59,62% \pm 0,83%, indicando combustão mais rápida quando relacionada as serragens de pinus e cambará.

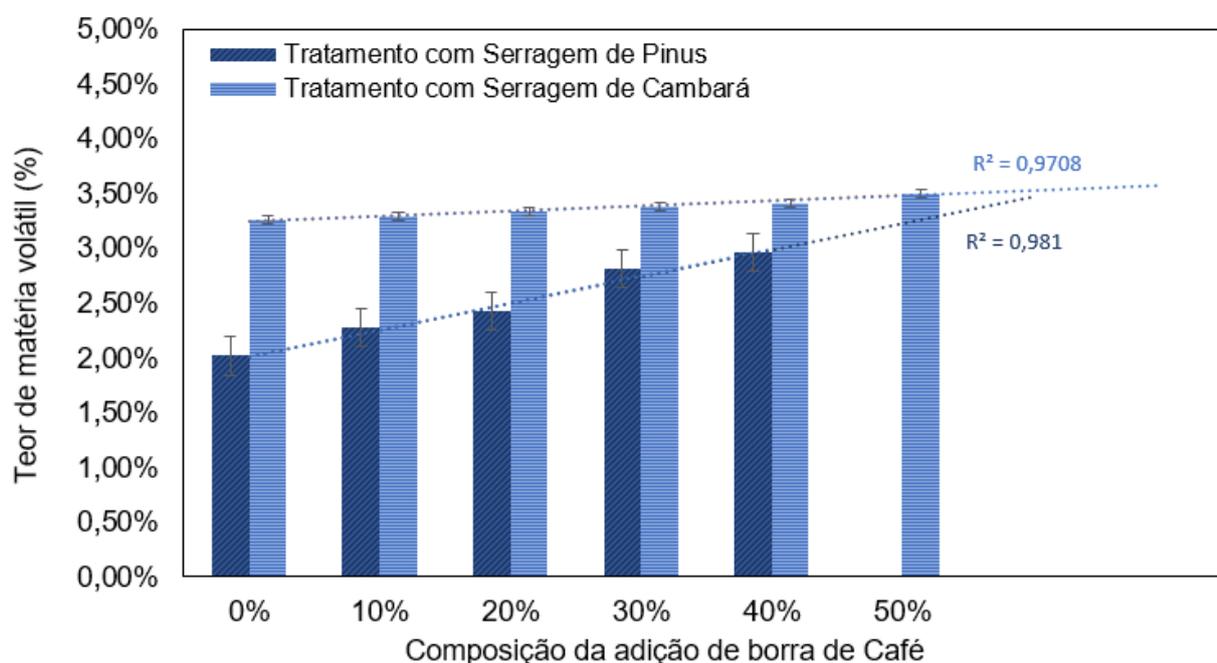


Figura 20 – Perfis do teor de matéria volátil nos briquetes.
Fonte: Autoria própria, 2021.

Nota-se que à medida que a concentração de borra de café aumenta na mistura, menor é o teor de carbono fixo.

Na Figura 21 verifica-se o comportamento decrescente dos perfis de teor de carbono fixo versus o aumento da adição de borra de café, sendo que o tratamento com serragem de cambará apresenta os menores valores de carbono fixo. No entanto, para ambas as espécies, cambará e pinus, o comportamento dos perfis é semelhante e o tratamento de cambará com maior adição de borra de café (C-06) apresenta a maior queda em carbono fixo.

Amostras	Teor de cinzas	Teor de matéria volátil	Teor de carbono fixo
B-01	2,28% ± 0,08%	4,62% ± 0,12%	59,62% ± 0,83%
P-01	4,38% ± 0,07%	2,02% ± 0,11%	84,51% ± 1,29%
P-02	4,06% ± 0,07%	2,28% ± 0,09%	82,06% ± 1,16%
P-03	3,97% ± 0,18%	2,43% ± 0,09%	80,05% ± 2,08%
P-04	3,13% ± 0,05%	2,82% ± 0,18%	79,57% ± 1,07%
P-05	2,57% ± 0,07%	2,97% ± 0,20%	79,37% ± 1,02%
C-01	3,07% ± 0,07%	3,26% ± 0,18%	84,33% ± 1,22%
C-02	2,97% ± 0,09%	3,29% ± 0,22%	81,24% ± 1,38%
C-03	2,94% ± 0,05%	3,34% ± 0,13%	79,49% ± 1,19%
C-04	2,74% ± 0,17%	3,38% ± 0,07%	79,01% ± 0,87%
C-05	2,43% ± 0,08%	3,42% ± 0,15%	78,70% ± 1,51%
C-06	2,35% ± 0,13%	3,51% ± 0,04%	73,55% ± 1,77%

Tabela 7 – Valores médios do teor de cinzas, matéria volátil e carbono fixo nos briquetes.
Fonte: Autoria própria, 2021.

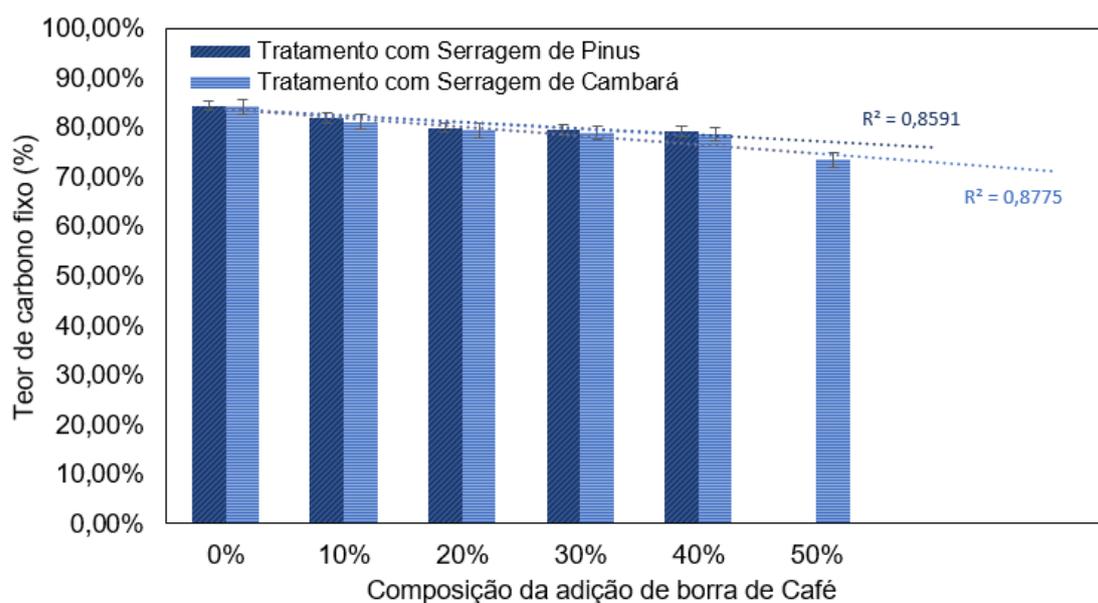


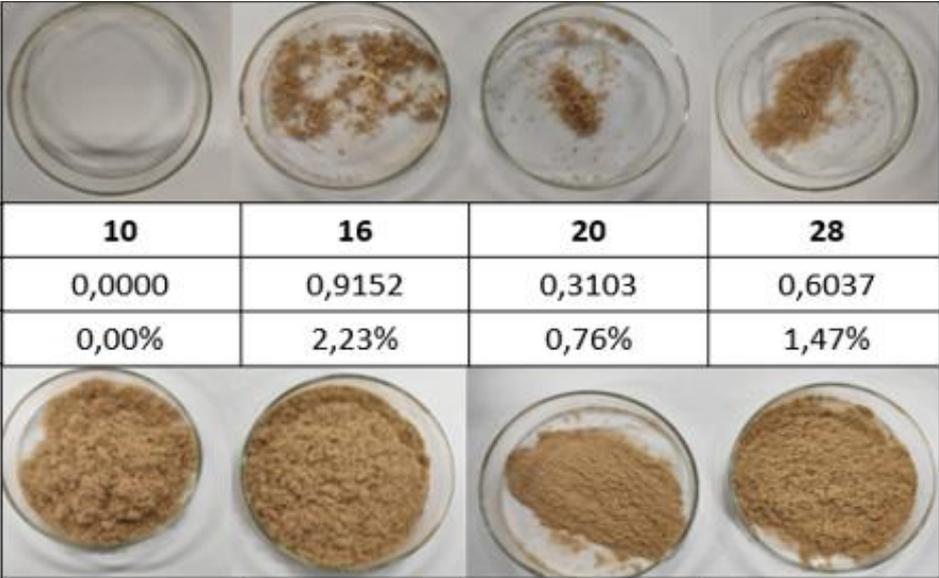
Figura 21 – Perfis do teor de carbono fixo nos briquetes com erro padrão.
Fonte: Autoria própria, 2021.

4.2 Análise Mecânica

Nesta seção, são classificadas e analisadas a granulometria das matérias-primas, avaliando os briquetes produzidos, calculando a massa específica aparente dos materiais e medido a resistência à tração por compressão diametral.

A determinação granulométrica da borra de café e das serragens de pinus e de cambará foram realizadas em peneiras com batidas intermitentes com aberturas em *Mesh* de 10-16-20-28-35-65-80.

No peneiramento da serragem de pinus, não foi retida massa na primeira peneira (10 *Mesh*). A peneira que teve maior retenção de serragem de pinus foi a peneira de 65 *Mesh* (44,61%), material passante na peneira de 35 *Mesh*, correspondendo a abertura de 0,500 mm. A segunda maior porção de material ficou retida no fundo (32,19%), indicando granulometria de 80 *Mesh*, conforme ilustrado na Figura 22.



Informações	10	16	20	28
Massa retida (g)	0,0000	0,9152	0,3103	0,6037
Massa retida (%)	0,00%	2,23%	0,76%	1,47%

Informações	35	65	80	Fundo
Massa retida (g)	4,5354	18,3359	3,1682	13,2313
Massa retida (%)	11,03%	44,61%	7,71%	32,19%

Figura 22 - Classificação granulométrica da serragem de pinus.

Fonte: Autoria própria (2020).

A serragem de cambará, conforme apresentado na Figura 23 obteve maior retenção na peneira de 65 *Mesh* (35,25%), indicando material com maior proporção granulométrica de 0,5 mm (35 *Mesh*). O fundo teve menor retenção de material (0,34%), concluindo que a quantidade de material de granulometria de 80 *Mesh* é a menor. No entanto, a segunda maior proporção de material corresponde a granulometria de 0,183 mm (65 *Mesh*).

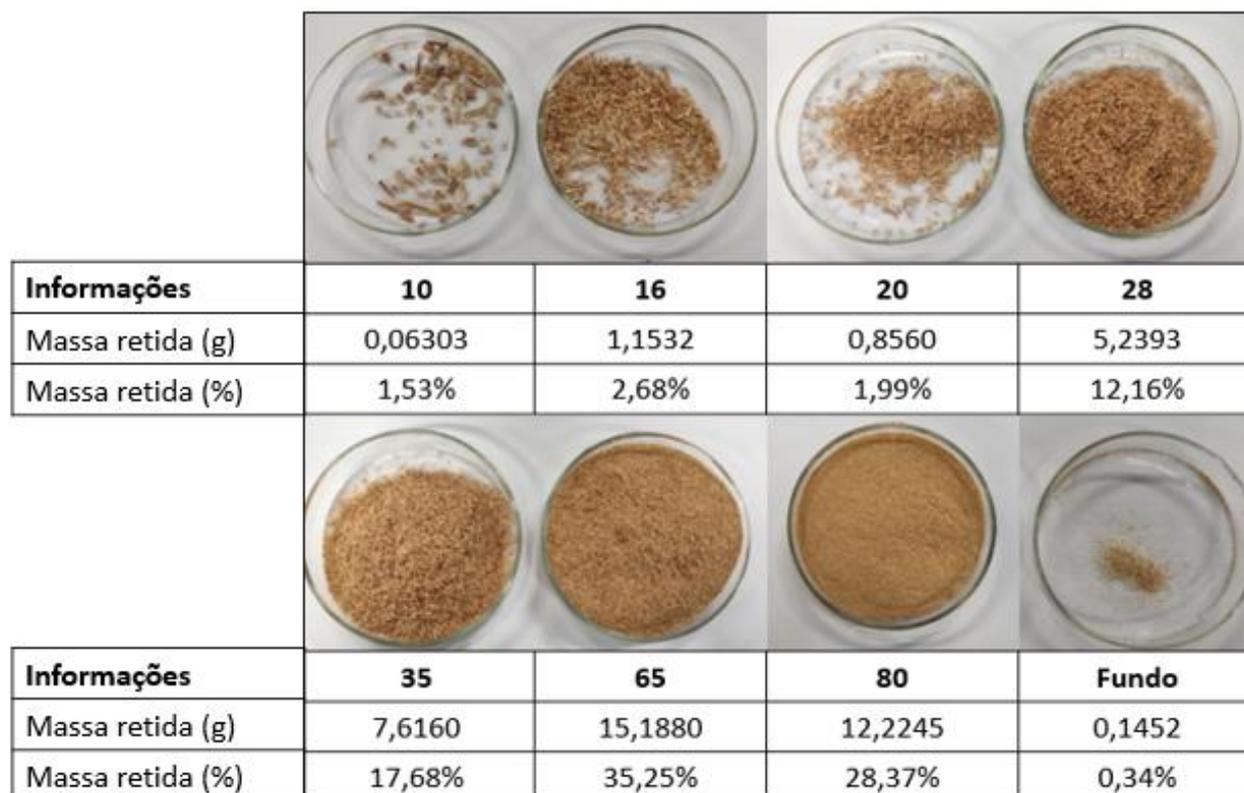


Figura 23 - Classificação granulométrica da serragem de cambará.
 Fonte: Autoria própria (2020).

Observa-se na Figura 24 que durante a etapa de peneiramento da borra de café, verificou-se que a maior porção ficou retida na peneira de 35 *Mesh*, correspondendo a 62,61% do material peneirado, indicando que a granulometria da borra de café refere-se a peneira de 28 *Mesh*, com abertura de 0,318 mm. Não obteve-se material passante na peneira de 80 *Mesh*, indicando que a granulometria da borra de café limita-se a malha de 65 *Mesh*.

A segunda maior porção do material de borra de café ficou retida na primeira peneira (15,94%), indicando a maior granulometria, nestes materiais podem ser observados a presença de maior umidade devido ao processamento do pó de café para a produção da bebida.

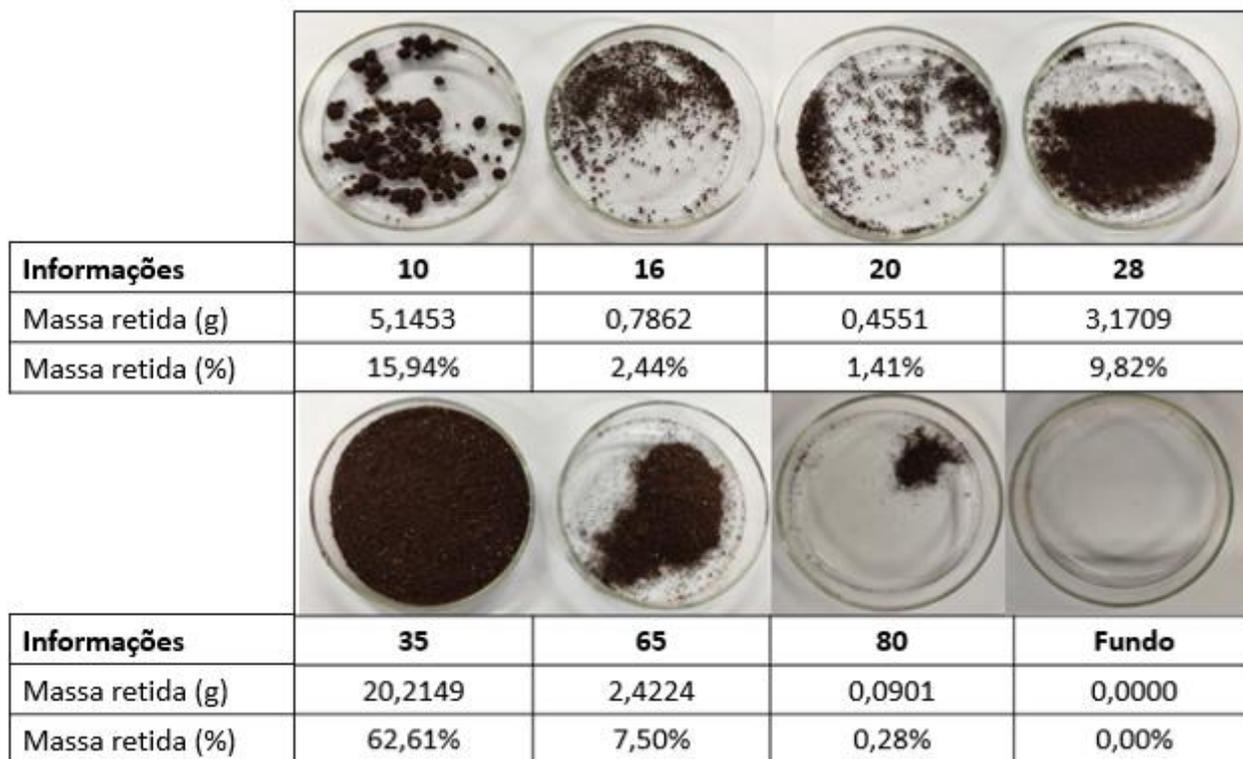


Figura 24 - Classificação granulométrica da borra de café.
 Fonte: Autoria própria (2020).

Analisando a classificação granulométrica das matérias-primas, observa-se que a serragem de pinus apresenta maior proporção de finos entre os materiais. A borra de café apresentou maior granulometria entre as matérias estudadas, este fato está relacionado a sua umidade, visto que o pó de café ao ser extraído sofre compactação e suas partículas ficam acopladas devido também a alta umidade.

Os briquetes foram produzidos em prensa hidráulica de 12 toneladas em diferentes proporções de borra de café. A adição de borra de café nos tratamentos de serragem ocorreu até não ser mais exequível a briquetagem do tratamento. Os tratamentos iniciaram com adição de 10% de borra de café, aumentando proporcionalmente. O tratamento com pinus *sp* permitiu a adição de borra de café até a proporção de 40%, já no tratamento com cambará foi possível adicionar até a proporção de 50/50 em massa.

A Figura 25 mostra os briquetes de serragem de cambará produzidos sem e com adição de borra de café.

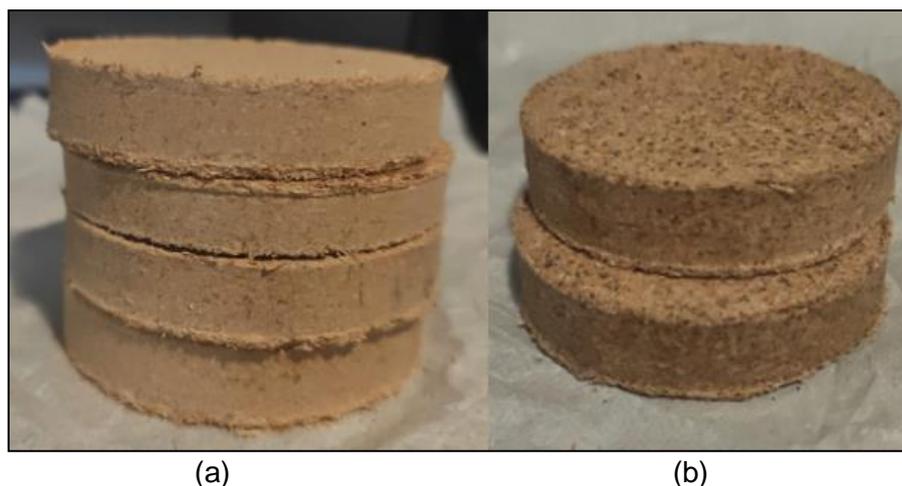


Figura 25 – Briquetes de (a) serragem de camaró e (b) serragem de camaró com adição de borra de café, respectivamente.
Fonte: Autoria própria, 2021.

As Figura 26 e Figura 27 mostram a aparência dos diferentes briquetes de serragem de pinus e camaró com a adição de diferentes proporções de borra de café, respectivamente.

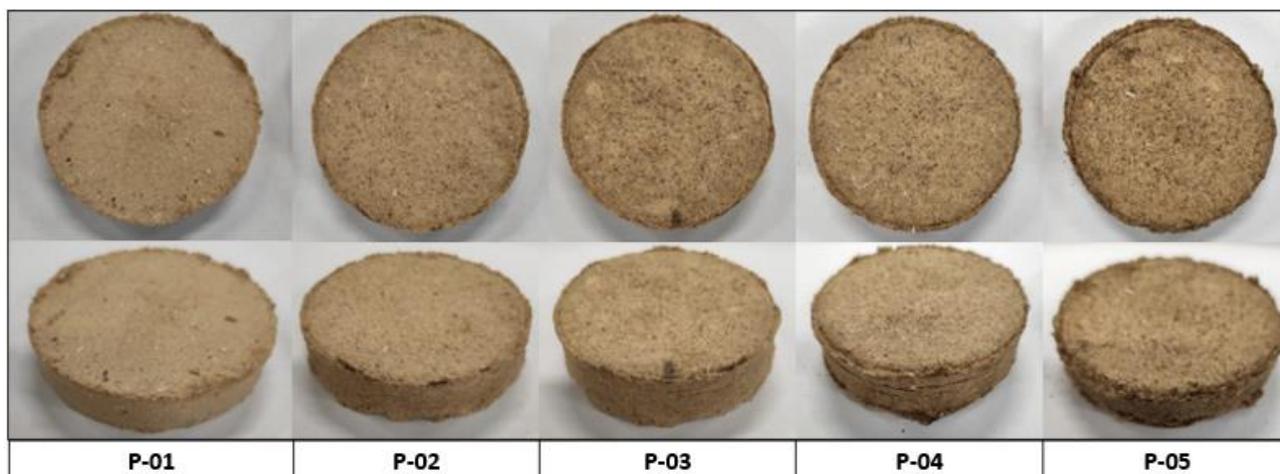


Figura 26 – Briquetes de serragem de pinus com adição de borra de café.
Fonte: Autoria própria, 2021.

Na Figura 26 observa-se os briquetes produzidos com o tratamento de serragem de pinus adicionando a borra de café em diferentes proporções. Talvez seja possível notar que à medida que a concentração de borra de café aumenta, maior a quantidade de fissuras nos briquetes produzidos.

Na Figura 27 observa-se os briquetes do tratamento com serragem de camaró e as diferentes proporções de borra de café. Nota-se que os briquetes deste tratamento aparentam ser mais firmes e resistentes, com pouca ou nenhuma fissura. Além disso, este tratamento permitiu uma maior concentração de borra de café. O fator que pode estar

correlacionado positivamente ao processo de briquetagem deste tratamento, é a granulometria da serragem de cambará, sendo a mesma a mais fina quando comparada com a serragem de pinus.

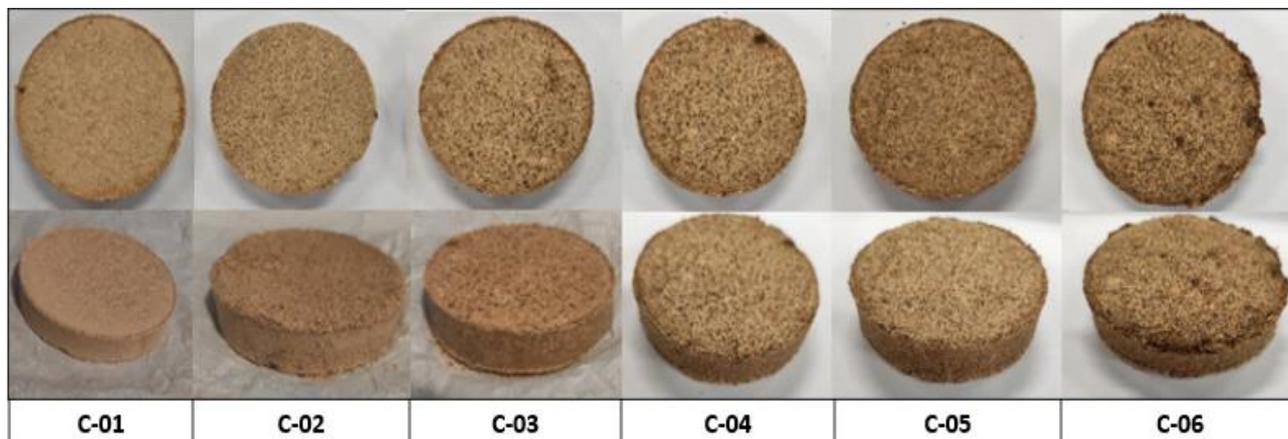


Figura 27 – Briquetes de serragem de cambará com adição de borra de café.
Fonte: Autoria própria, 2021.

No processo de briquetagem observa-se que a maior dificuldade na adição de borra de café nos tratamentos com serragens está relacionada com a alta umidade presente na borra. Pois, quanto mais borra de café é adicionado ao tratamento, maior o teor de umidade do briquete. Nota-se na Figura 28 que ao ser pressionada a amostra com alto teor de borra de café, o material é expelido nas laterais do equipamento devido ao alto grau de umidade.



Figura 28 – Ilustração de resultados da compactação das amostras com alta adição de borra de café.

Fonte: Autoria própria, 2021.

Após produzido os briquetes, eles tiveram suas massas medidas em balança analítica. Com o auxílio de um paquímetro digital, mediu-se a espessura de cada briquete

produzido. O Quadro 1 mostra os parâmetros medidos e suas médias, visto que cada tratamento foi realizado em triplicata.

Amostras	Triplicata	Massa (g)	Espessura (mm)	Massa média (g)	Espessura média (mm)
P-01	t01	21,39	15,12	21,32 ± 0,17	15,70 ± 0,61
	t02	21,15	15,8		
	t03	21,42	16,18		
P-02	t01	21,17	16,09	21,31 ± 0,20	16,15 ± 0,07
	t02	21,26	16,14		
	t03	21,51	16,22		
P-03	t01	21,25	16,33	21,28 ± 0,07	16,34 ± 0,08
	t02	21,24	16,28		
	t03	21,35	16,42		
P-04	t01	21,61	16,63	21,41 ± 0,24	16,38 ± 0,35
	t02	21,43	16,47		
	t03	21,19	16,04		
P-05	t01	21,40	16,41	21,43 ± 0,13	16,42 ± 0,04
	t02	21,55	16,46		
	t03	21,33	16,39		
C-01	t01	21,47	15,51	21,28 ± 0,20	15,42 ± 0,12
	t02	21,12	15,3		
	t03	21,25	15,45		
C-02	t01	21,35	16,05	21,44 ± 0,12	16,17 ± 0,16
	t02	21,41	16,14		
	t03	21,55	16,32		
C-03	t01	21,4	16,2	21,37 ± 0,11	16,21 ± 0,22
	t02	21,26	16,03		
	t03	21,44	16,41		
C-04	t01	21,54	16,33	21,45 ± 0,23	16,28 ± 0,12
	t02	21,22	16,15		
	t03	21,60	16,35		
C-05	t01	21,19	16,39	21,45 ± 0,26	16,34 ± 0,05
	t02	21,53	16,31		
	t03	21,62	16,31		
C-06	t01	21,74	16,73	21,65 ± 0,10	16,70 ± 0,05
	t02	21,56	16,65		
	t03	21,66	16,71		

Quadro 1 - Massa e espessura média dos briquetes de borra de café e serragem de pinus e cambará.

Fonte: Autoria própria (2020).

Após realizada as medições de massa e volume dos briquetes, calculou-se a massa específica aparente dos briquetes.

Conforme descrito na Tabela 8, pode-se verificar que a massa específica aparente dos briquetes variaram para os tratamentos de serragem de pinus de 0,482 a 0,503 g/cm³. Sendo que a maior massa específica para este tratamento se refere a composição de 100% de serragem de pinus. Esse ponto é possível defender, pois à medida que a concentração de borra de café aumentava, a espessura do briquete também acompanhava este aumento.

Amostras	Massa média (g)	Espessura média (mm)	Volume médio (cm³)	Massa Específica Aparente média (g/cm³)
P-01	21,32 ± 0,17	15,70 ± 0,61	42,40 ± 1,64	0,503 ± 0,020
P-02	21,31 ± 0,20	16,15 ± 0,07	43,62 ± 0,20	0,489 ± 0,002
P-03	21,28 ± 0,07	16,34 ± 0,08	44,14 ± 0,22	0,482 ± 0,001
P-04	21,41 ± 0,24	16,38 ± 0,35	44,24 ± 0,93	0,484 ± 0,005
P-05	21,43 ± 0,13	16,42 ± 0,04	44,35 ± 0,11	0,483 ± 0,002
C-01	21,28 ± 0,20	15,42 ± 0,12	41,64 ± 0,33	0,511 ± 0,002
C-02	21,44 ± 0,12	16,17 ± 0,16	43,67 ± 0,42	0,491 ± 0,002
C-03	21,37 ± 0,11	16,21 ± 0,22	43,79 ± 0,58	0,488 ± 0,004
C-04	21,45 ± 0,23	16,28 ± 0,12	43,96 ± 0,34	0,488 ± 0,002
C-05	21,45 ± 0,26	16,34 ± 0,05	44,12 ± 0,14	0,486 ± 0,007
C-06	21,65 ± 0,10	16,70 ± 0,05	45,09 ± 0,13	0,480 ± 0,001

Tabela 8 – Massa específica aparente média dos briquetes com adição de borra de café nos tratamentos de serragem de pinus e cambará.

Fonte: Autoria própria (2020).

Na Figura 29 pode-se verificar o comportamento da massa específica aparente das amostras de serragem de pinus e cambará com as diferentes proporções de adição de borra de café.

Ao adicionar a borra de café nas amostras de serragem de pinus e cambará, apesar da borra de café apresentar-se com maior massa específica quando comparada as serragens, ela dificulta o processo de briquetagem, tornando o processo menos eficaz, produzindo briquetes menos compactados em relação aos briquetes com 100% de serragem.

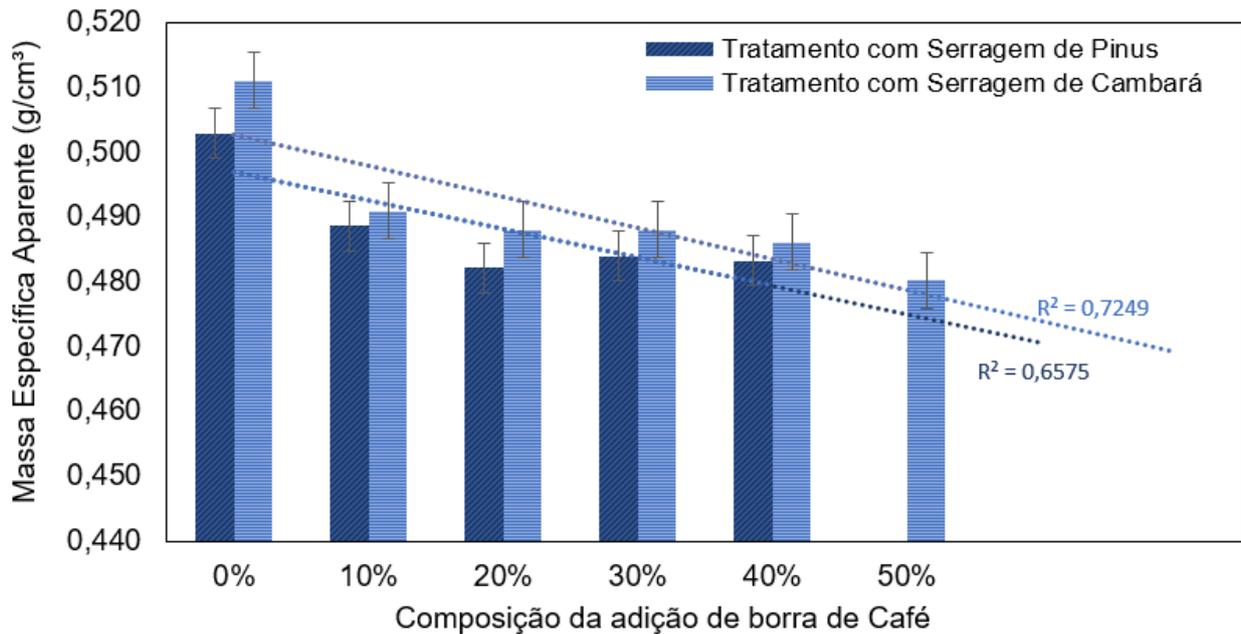


Figura 29 – Perfis da massa específica aparente dos briquetes com adição de borra de café nos tratamentos de serragem de pinus e camarará com erro padrão.
 Fonte: Autoria própria (2020).

Ao analisar o tratamento com serragem de camarará, a massa específica dos briquetes produzidos neste tratamento variaram de $0,480 \pm 0,001$ a $0,511 \pm 0,002$ g/cm³. Este tratamento apresentou os melhores resultados de massa específica, pois quando maior seu valor, melhor as condições para armazenamento e transporte.

Para fins de comparação foi adicionado a serragem de pinus em um bécker de 250 mL e medida a massa utilizada para encher este recipiente. Após isso, esta mesma massa foi compactada na prensa hidráulica e calculado o volume do briquete produzido, conforme ilustrado na Figura 30.



(a)

(b)

Figura 30 - Comparativo da mesma quantidade de biomassa em (a) granel e em (b) briquete.
 Fonte: Autoria própria, 2021.

O briquete obteve volume correspondente a $66,52 \text{ cm}^3$ e massa específica de $0,76 \text{ g/cm}^3$, indicando que o processo de briquetagem proporciona melhor resultado de massa específica.

Finalizado o processo de briquetagem dos materiais, os briquetes produzidos foram submetidos ao ensaio mecânico no equipamento EMIC. O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi utilizado para determinar a resistência mecânica aos esforços de tração de corpos-de-prova cilíndricos (briquetes), com o intuito de determinar o comportamento mecânico de cada composição de briquete submetido a determinada carga.

O primeiro tratamento a ser analisado foi o de serragem de pinus. Iniciou-se os testes com os briquetes 100% serragem de pinus (P-01). Estes briquetes ao serem compactados no equipamento foram rachados em suas laterais, dividindo o material em algumas partes, conforme mostra Figura 31.



Figura 31 – Briquete de serragem de pinus após ensaio de resistência por compressão diametral.
Fonte: Autoria própria, 2021.

Após o ensaio nos briquetes de tratamento P-01 (100% serragem de pinus), foi analisado a resistência mecânica dos briquetes de serragem de pinus com as adições de borra de café, até a proporção de 40% borra de café.

Os briquetes de serragem de pinus com adição de borra de café tiveram um comportamento mecânico após a compactação bem semelhantes, a parte inferior do briquete ao sofrer a compactação no EMIC ficou achatada e surgiram rachaduras nas laterais dos corpos-de-prova. Na Figura 32 é possível observar o comportamento descrito.



Figura 32 – Briquete de serragem de pinus com adição de borra de café no equipamento EMIC.
Fonte: Autoria própria, 2021.

No processo do ensaio mecânico dos briquetes de serragem de pinus com a adição da borra de café, também se obteve materiais que se comportaram de outra forma, no caso com rachaduras na face dos briquetes e rachaduras centrais, conforme ilustrado na Figura 33.



Figura 33 – Briquetes de serragem de pinus com adição de borra de café após ensaio mecânico.
Fonte: Autoria própria, 2021.

Nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral das amostras com serragem de cambará, os comportamentos mecânicos após compressão semelhantes ao obtido com serragem de pinus com adição de borra de café.

Os briquetes C-01 (100% serragem de cambará), ao serem submetidos ao ensaio mecânico tiveram rachaduras em suas laterais e também foram achatados durante a compressão, no entanto, o achatamento ocorreu na parte superior dos briquetes, como mostra Figura 34.

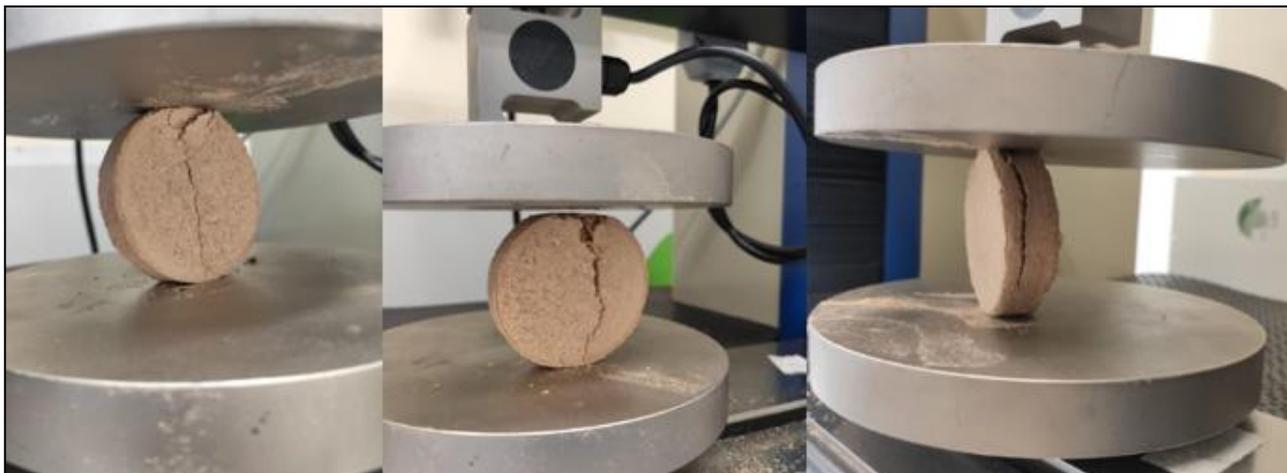


Figura 34 – Briquete de serragem de cambará com adição de borra de café no equipamento EMIC.

Fonte: Autoria própria, 2021

Na Figura 35 pode-se observar que em alguns briquetes C-01 também ocorreram rachaduras centrais.



Figura 35 – Briquete de serragem de cambará após ensaio mecânico.

Fonte: Autoria própria, 2021

Para os briquetes de serragem de cambará com adição de borra de café, sendo que os briquetes para este tratamento chegaram em até 50% de borra de café, o comportamento foi semelhante ao tratamento sem adição de borra de café, rachaduras nas laterais e centrais e achatamento nos briquetes foram verificados, conforme mostra a Figura 36.



Figura 36 – Briquete de serragem de cambará com adição de borra de café após ensaio mecânico.

Fonte: Autoria própria, 2021

Pode-se perceber que a medida que a concentração de borra de café aumentava nos tratamentos de serragem de pinus e de cambará, após ensaio mecânico, os briquetes ficavam com menos resistência aos ensaios mecânicos. Quanto maior a concentração de borra de café, mais quebradiços eles se tornavam.

Na Figura 37 é mostrado o briquete C-06 que apresenta a maior composição de borra de café (50%), nota-se que ele não resistiu ao ensaio de tração.



Figura 37 – Briquete C-06 após ensaio mecânico.

Fonte: Autoria própria, 2021.

Os briquetes ao serem ensaiados no EMIC, geram uma curva de deformação. Na Figura 38 estão representados os resultados obtidos nos briquetes de serragem de pinus sem e com adição de borra de café em 10%, P-01, P-02, P-03, P-04 e P-05, respectivamente.

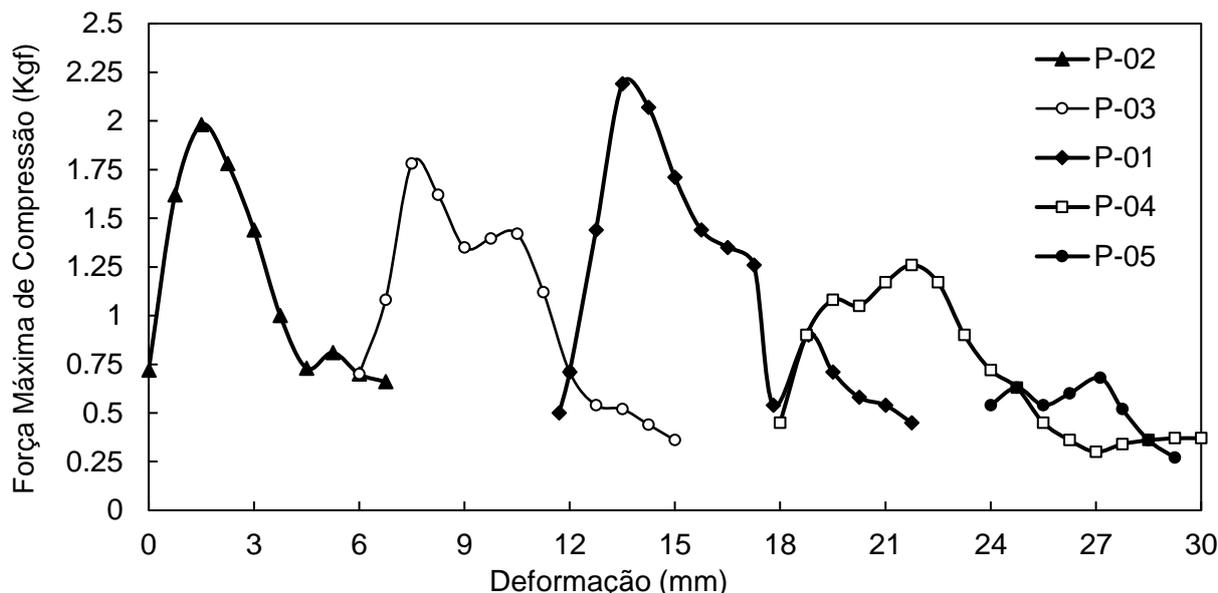


Figura 38 – Perfis do comportamento mecânico dos briquetes de pinus.
 Fonte: Autoria própria, 2021

Observa-se que os comportamentos foram semelhantes, mas o briquete P-01 recebeu maior força para sua ruptura, acima de 2,160 kgf, ou seja, 21,64 N e à medida que se aumenta a adição de borra de café, menor é a força máxima aplicada ao corpo-de-prova. O valor da resistência à tração é obtido após o rompimento do corpo-de-prova, conforme a norma NBR 7222/94. No equipamento são inseridas as informações de espessura e diâmetro para o cálculo da força máxima aplicada. As resistências à tração por compressão diametral em cada briquete do tratamento com serragem de pinus podem ser verificadas na Tabela 9.

Amostras	Força Máxima (N)	Redução da força aplicada
P-01	21,64	0%
P-02	19,78	8,60%
P-03	17,24	20,33%
P-04	12,51	42,19%
P-05	6,42	70,33%

Tabela 9 - Resultados de resistência à compressão diametral dos briquetes de serragem de pinus.
 Fonte: Autoria própria (2020).

Os tratamentos com serragem de pinus obtiveram o limite de força máxima aplicada de 21,64 N (P-01). O tratamento que suportou a menor força foi o P-05 (40% de borra de café), com 6,42 N, redução de 70,33% comparado com o tratamento sem adição de borra de café (21,64 N).

Os briquetes produzidos com o tratamento de cambará apresentaram comportamentos mecânicos melhores quando comparados aos briquetes de tratamento com pinus. Os briquetes de cada tratamento foram produzidos em triplicatas e os resultados dos ensaios foram a média dos valores encontrados. Para o tratamento C-01 (100% serragem de cambará), obteve-se valores altos nos resultados de força máxima aplicada, conforme mostra Figura 39.

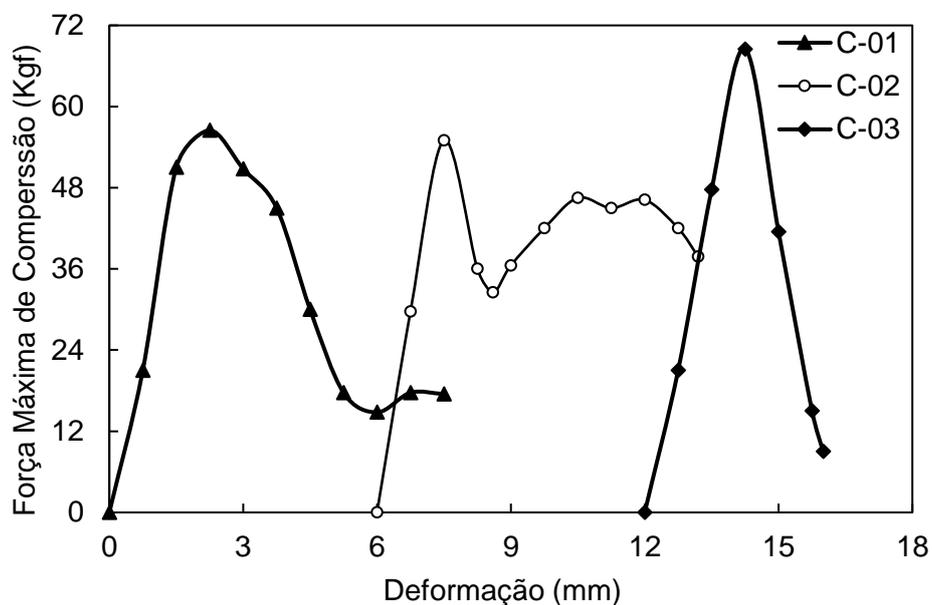


Figura 39 - Perfis do comportamento mecânico das triplicatas dos briquetes C-01.
Fonte: Autoria própria (2021).

Observa-se que os valores dos briquetes de serragem de cambará sem adição de borra de café apresentaram força máxima aplicada superior a 48 kgf, sendo que para o tratamento com serragem de pinus a força máxima suportada foi de 2,16 kgf. Na Tabela 10 pode-se verificar que a força máxima média suportada pelo corpo-de-prova do tratamento 100% serragem de cambará foi de 554,23 N.

Para as amostras de briquetes de serragem de cambará com adição de borra de café, C-02, C-03, C-04, C-05 e C-06, os resultados da força em função da deformação obtidos podem ser verificados nos perfis representados na Figura 40. Percebe-se que a força máxima aplicada aos corpos-de-prova reduziu com a adição da borra de café em

aproximadamente 50%. A força máxima aplicada ao tratamento C-02 e C-03 foi de, respectivamente, 270,78 N e 172,91 N.

Amostras	Triplicata	Força Máxima (N)
C-01	1	550,35
C-01	2	540,54
C-01	3	571,81
C-01	MÉDIA	554,23

Tabela 10 - Resultados da resistência à tração por compressão diametral das triplicatas do briquete de serragem de cambará sem adição de borra de café e sua média.
 Fonte: Autoria própria (2020).

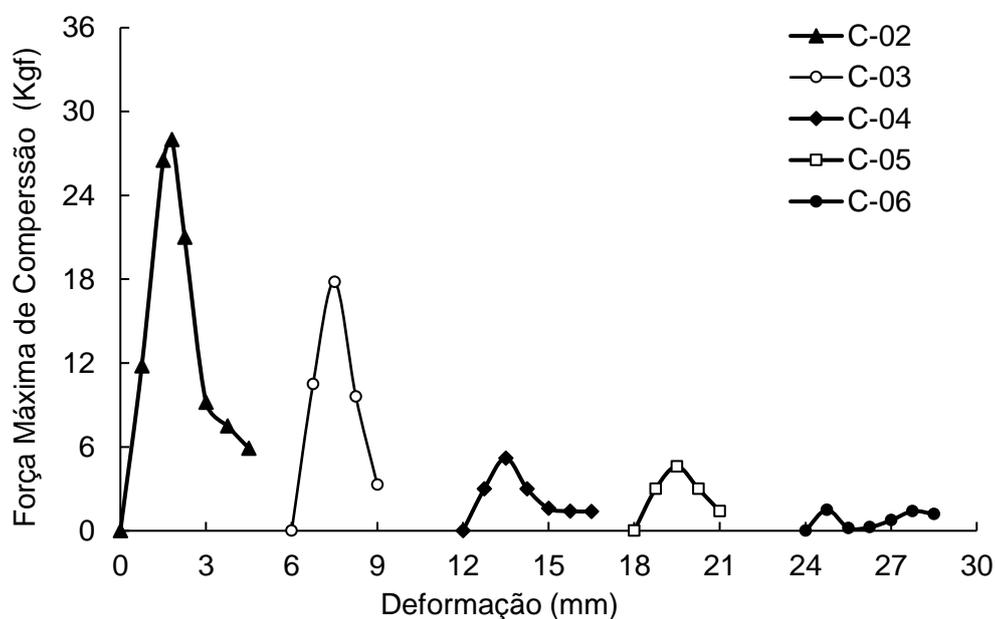


Figura 40 – Perfis do comportamento mecânico dos briquetes de cambará com adição de borra de café.
 Fonte: Autoria própria (2020).

As formas dos perfis de tensionamento correspondentes aos tratamentos são semelhantes, mas a redução na força aplicada foi brusca, indicando a influência direta do aumento na adição de borra de café.

O tratamento com serragem de cambará que obteve a menor força máxima aplicada foi o que continha a maior concentração de borra de café (C-06), sendo seu resultado inferior a 0,720 kgf, ou seja, 13,35 N.

Na Tabela 11 pode-se verificar as forças máximas aplicadas em cada amostra com serragem de cambará.

Amostra	Força Máxima (N)	Redução da força aplicada
C-01	554,23	0,00%
C-02	270,78	51,14%
C-03	172,91	68,80%
C-04	52,40	90,55%
C-05	47,83	91,37%
C-06	13,35	97,59%

Tabela 11 - Resultados do ensaio de resistência à compressão diametral dos briquetes de serragem de cambará.
Fonte: Autoria própria (2020).

A amostra que suportou a menor força foi a C-06 (50% de borra de café), com redução de 97,59% comparado com o tratamento sem adição de borra de café.

As composições dos briquetes C-01, C-02 e C-03 são as que apresentaram a maior resistência a compressão, observa-se que, quanto maior a proporção do resíduo celulósico (serragem) na composição do briquete, maior sua resistência mecânica. Os tratamentos com serragem de cambará apresentam maior resistência à compressão diametral do que os com serragem de pinus. Este resultado pode estar relacionado a granulometria mais fina do pinus, causando rupturas maiores e até se desgrudam das partículas quando prensados.

Pode-se verificar também que em todas as curvas obtidas nos ensaios de resistência, inicialmente, todas elas exibem uma região linear correspondente a zona de elasticidade que é seguida pela ruptura do corpo-de-prova.

4.3 Análise Calorífica

Na análise calorífica são medidos o Poder Calorífico Superior (PCS) e a massa específica energética dos briquetes.

O Poder Calorífico Superior está relacionado com a qualidade do combustível, medido pela capacidade deste produzir calor. Este parâmetro apresenta valores melhores quando a incidência de carbono é maior e apresenta valores menores de acordo com a quantidade de impurezas presentes no combustível (rochosos ou minerais).

Os briquetes tiveram seus PCS medidos no equipamento *Parr* modelo 6400 *Calorimeter*. O valor de PCS calculado pelo equipamento da amostra da matéria-prima de serragem de *Pinus sp.*, 100%, foi de 4.220,36±84,70 cal/g. O briquete produzido com 100%

serragem de cambará teve seu PCS de $4.162,32 \pm 110,37$ cal/g. A borra de café apresenta PCS de $3.881,18 \pm 81,12$ cal/g.

Na Figura 41 está demonstrado o comportamento do Poder Calorífico Superior nos tratamentos com serragem de pinus e de cambará quando adicionado a borra de café. Pode-se observar que a medida que se aumenta a adição de borra de café nos tratamentos, menor o PCS dos briquetes. Isto ocorre devido a borra de café apresentar o menor poder calorífico entre as matérias-primas.

Relacionado ao menor valor de PCS da borra de café, pode estar alinhado ao fato do maior teor de umidade deste material, o que demonstra a correlação negativa existente entre o teor de umidade e o poder calorífico superior, pois parte da energia liberada é utilizada para evaporar a água presente no briquete (FERREIRA *et al.*, 2009).

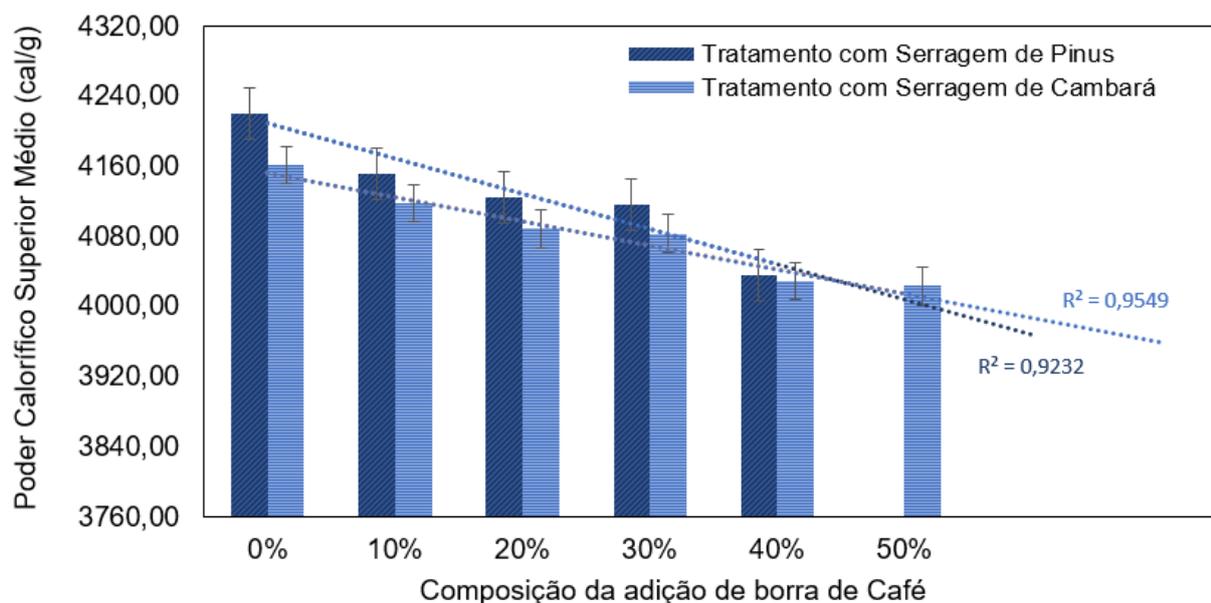


Figura 41 – Valores do PCS da serragem de pinus e da serragem de cambará com adição da borra de café com erro padrão.
Fonte: Autoria própria, 2021.

Dentre os tratamentos, o que apresenta maior Poder Calorífico Superior são os tratamentos com a serragem de pinus.

Para o cálculo da massa específica energética das amostras, o qual o PCS é quase constante e a variante no cálculo é a massa específica aparente, nota-se que a medida que a massa específica aparente diminui e a massa específica energética média também diminui. Este fator está relacionado a quantidade de energia armazenada em função do volume da amostra, conforme mostra Tabela 12.

Amostras	Massa Específica Aparente Média (g/cm ³)	PCS Médio (cal/g)	Massa Específica Energética Média (cal/cm ³)
P-01	0,503 ± 0,020	4.220,36 ± 84,70	2.122,07 ± 104,52
P-02	0,489 ± 0,002	4.151,72 ± 77,65	2.028,75 ± 47,82
P-03	0,482 ± 0,001	4.124,86 ± 80,59	1.988,67 ± 42,88
P-04	0,484 ± 0,005	4.116,47 ± 52,82	1.992,28 ± 12,56
P-05	0,483 ± 0,002	4.036,45 ± 57,48	1.950,31 ± 21,93
C-01	0,511 ± 0,002	4.162,32 ± 110,37	2.126,89 ± 48,99
C-02	0,491 ± 0,002	4.118,56 ± 57,28	2.021,69 ± 23,90
C-03	0,488 ± 0,004	4.089,42 ± 46,48	1.995,48 ± 11,59
C-04	0,488 ± 0,002	4.083,76 ± 58,93	1.993,02 ± 34,95
C-05	0,486 ± 0,007	4.029,76 ± 22,71	1.958,83 ± 18,64
C-06	0,480 ± 0,001	4.023,81 ± 21,91	1.932,21 ± 14,47

Tabela 12 - Massa específica energética média dos briquetes.

Fonte: Autoria própria, 2021.

É possível verificar que à medida que a concentração de borra de café aumenta nos briquetes, a massa específica energética diminui. Entre os processos, o de serragem de pinus apresenta os maiores valores de massa específica energética, conforme mostrado na Figura 42.

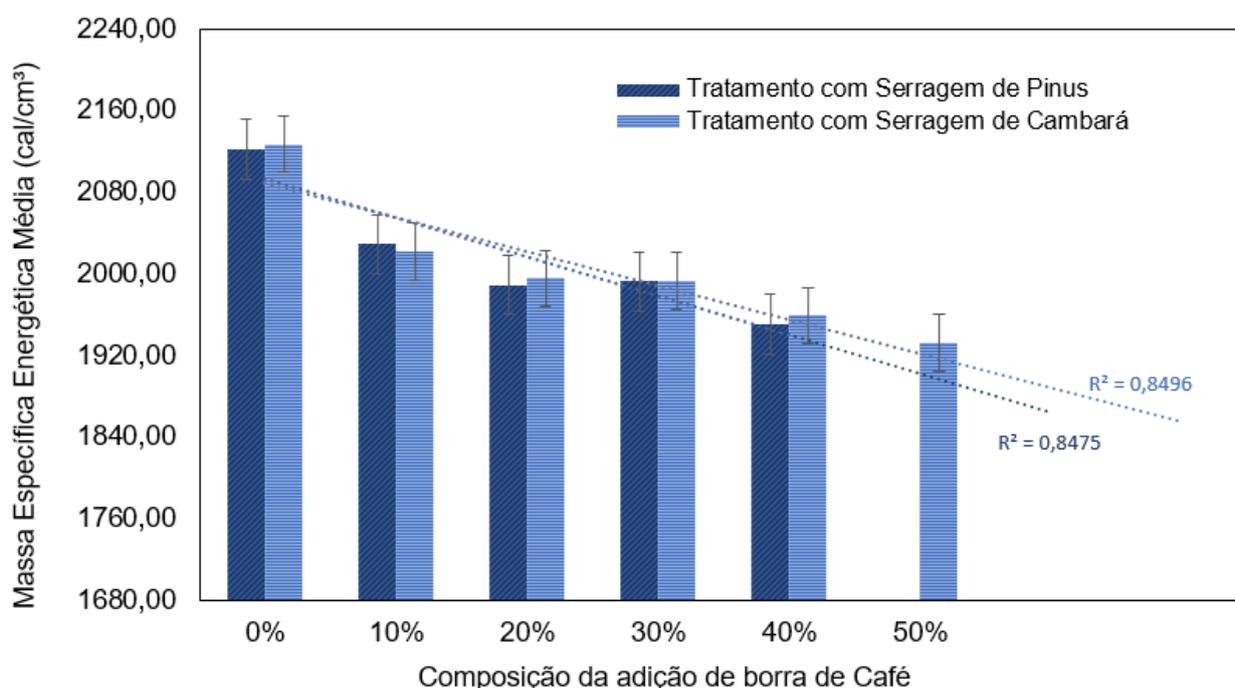


Figura 42 – Valores da massa específica energética dos briquetes com erro padrão.

Fonte: Autoria própria, 2021.

Verifica-se a semelhança no comportamento da densidade energética com o da densidade aparente, em que os maiores valores de densidade aparente determinaram maiores valores da densidade energética. Este fato pode ser observado devido a relação diretamente proporcional entre estas variáveis.

Capítulo 5

Conclusões

O presente estudo avaliou os efeitos da adição da borra de café em tratamentos com serragens de espécies do tipo pinus e cambará. Na análise imediata das matérias-primas, concluiu-se que a borra de café possui o maior teor de umidade médio ($33,48\% \pm 1,12\%$), seguido da serragem de cambará ($9,34\% \pm 0,12\%$) e de pinus ($9,09\% \pm 0,01\%$), tornando sua adição um efeito negativo ao parâmetro de umidade. Referente ao teor de cinzas, verificou-se que a medida que se aumenta a concentração de borra de café nos tratamentos, menor é o valor de cinzas, concluindo-se que a sua adição interfere positivamente neste parâmetro. No teor de matérias voláteis, a adição de borra de café contribuiu com o aumento de seus valores nos tratamentos com serragem de pinus e cambará. A borra de café, quando adicionada aos tratamentos com serragens, também apresentou efeito positivo no teor de carbono fixo, diminuindo o seu valor e indicando queima mais rápida do biocombustível.

Para a análise mecânica dos briquetes produzidos, iniciando pela classificação granulométrica, observou-se que a maior quantidade da borra de café passou na malha com granulometria 28 *Mesh* e ficou retida na malha com granulometria 35 *Mesh*. A distribuição granulométrica da serragem de pinus teve sua maior proporção de material passante na malha com granulometria 35 *Mesh* e retido na malha com granulometrias 65 *Mesh*, o que corresponde a mais de 44% do material. A serragem de cambará foi o material que apresentou maior porção de finos, mais de 60% de sua composição possui granulometria inferior a 0,5 mm.

De acordo com os resultados de moldagem e resistência à tração por compressão diametral, pode-se concluir que os briquetes produzidos com borra de café e serragem de pinus se mostraram mais resistentes à compressão, logo são viáveis para a geração de energia e o aproveitamento desse material, que são resíduos provenientes de comércios e da indústria de papel e celulose, entre outros. Observou-se que não se fez necessário a adição de aglutinante para obtenção de briquetes de maior massa específica e resistência mecânica, indicando a estabilidade e durabilidade dos briquetes produzidos, facilitando o seu manuseio e transporte.

As massas específicas aparente e energética dos briquetes indicaram que a adição de borra de café afeta negativamente seus valores, no entanto, até a proporção estudada, os resultados encontrados ainda são satisfatórios.

Assim, concluiu-se que os tratamentos realizados com menores proporções de borra de café em serragem de pinus (40 a 60%), resultaram nos briquetes de melhor qualidade de resistência mecânica. Além disso, concluiu-se que todos os briquetes apresentaram resistência à compressão bem mais alto que o valor mínimo recomendado, indicando que durante as etapas de transporte, armazenamento e manuseio os briquetes manterão sua integridade física e, conseqüentemente, sua eficiência.

Pode-se concluir que a medida que se aumenta a adição de borra de café nos tratamentos, menor o PCS dos briquetes. Isto ocorre devido a borra de café apresentar o menor poder calorífico entre as matérias-primas utilizadas.

O Quadro 2 mostra os parâmetros avaliados neste estudo e como a borra de café contribuiu em seus resultados, positivamente ou negativamente.

Parâmetros	Adição da borra de café nas amostras	
	Valores obtidos	Impacto da adição
Teor de umidade	Aumentou	Não contribuiu
Teor de cinzas	Reduziu	Contribuiu
Teor de matéria volátil	Aumentou	Contribuiu
Teor de carbono fixo	Reduziu	Contribuiu
Massa específica aparente	Reduziu	Não contribuiu
Massa específica energética	Reduziu	Não contribuiu
Poder Calorífico Superior	Reduziu	Não contribuiu
Resistência à tração por compressão diametral	Reduziu	Não contribuiu

Quadro 2 – Resultados da adição da borra de café nos parâmetros das amostras.

Fonte: Autoria própria, 2021.

Concluiu-se que a borra de café pode ser considerada uma matéria-prima de alta qualidade quando adicionada em tratamentos com serragens na produção de biocombustíveis sólidos, auxiliando nos parâmetros de cinzas, matéria volátil e carbono fixo. Além disso, por se tratar de um resíduo, a sua reutilização é considerada sustentável, tornando-se uma alternativa na preservação do meio ambiente.

Com o presente estudo, verificou-se que a umidade da borra de café dificulta a produção de briquetes na prensa hidráulica, interfere negativamente nos parâmetros de massa específica aparente e energética, poder calorífico superior e a resistência à tração

por compressão diametral e, deste modo, sugere-se para trabalhos futuros a realização da secagem da borra de café. No entanto, a secagem da borra de café pode acarretar maiores custos na produção dos briquetes, assim tal secagem deve ser feita de tal modo que o processo seja rápido e com o menor custo possível.

Sugere-se ainda para futuros trabalhos, a avaliação da adição da borra de café em outros resíduos lignocelulósicos, como a palha de trigo, palha de soja, palha de arroz, serragem de eucalipto e pergaminho do café. Aconselha-se estudar o teor de óleos presentes na borra de café e como tal teor interfere nos parâmetros dos briquetes.

Ainda como sugestão, pode-se avaliar a relação do uso de aglutinantes na produção dos briquetes e os seus efeitos nos parâmetros e na resistência mecânica do material.

No presente estudo, não foi produzido briquetes avaliando a mudança da temperatura durante o processo de compactação, sugere-se então avaliar o efeito da mudança da temperatura no intervalo de 25°C a 110°C no processo de briquetagem.

Referências Bibliográficas

ABIC. **Indicadores da indústria de café.** Disponível em: <<http://abic.com.br/estatisticas/indicadores-da-industria/indicadores-da-industria-de-cafe-2018/>>. Acesso em: 30 de dez. 2019.

ALIBABA. **Prensa hidráulica de quatro colunas para briquetagem.** Disponível em: <<https://portuguese.alibaba.com/product-detail/200-ton-four-column-hydraulic-press-for-briquetting-60709916512.html>>. Acesso em 22 de fev. 2021.

ANEEL (Brasil). **Atlas de energia elétrica.** 2. ed. Brasília, DF: 2005. Disponível em: ([Download do Atlas de Energia Elétrica - 2ª Edição \(aneel.gov.br\)](Download do Atlas de Energia Elétrica - 2ª Edição (aneel.gov.br)))>. Acesso em: 20 fev. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7222.** Argamassa e concreto: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: 1994.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **ASTM D1102 – 84** - Standard Test Method for Ash in Wood. In: Annual Book of ASTM Standards, 2007.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **ASTM D3173 – 87** - Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke. In: Annual Book of ASTM Standards, 1991.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **ASTM D3174 – 89** - Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke. In: Annual Book of ASTM Standards, 1991.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **ASTM D3175 – 89** - Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke by the Adiabatic Bomb Calorimeter. In: Annual Book of ASTM Standards, 1991.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **ASTM D2015 – 91** - Standard Test Method for Gross Caloric Value of Coal and Coke. In: Annual Book of ASTM Standards, 1991.

BALAT, M. **Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: A review.** Energy Conversion And Management, 52:858-875, jan. 2010

CAMACHO, J. L. P. **DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO DE UM COMBUSTÍVEL SÓLIDO OU LÍQUIDO USANDO A BOMBA CALORIMÉTRICA.** Química Tecnológica Geral. Departamento de Engenharia Química, p.11, 2014.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia.** Campinas, 2008.

CHEN, N. N.; CHEN, M. Q.; FU, B. A.; SONG, J. J. **Far-infrared drying behavior of typical biomass briquettes.** Energy, 121:726-738, jan. 2017.

CHRISOSTOMO, W. **Análise da compactação do bagaço de cana-de-açúcar para produção de briquetes.** V Congresso Internacional de Bioenergia, Curitiba: Remade,1-6, 2010.

CONAB. **Companhia nacional de abastecimento.** (2018). Informações agropecuárias. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 06 set. 2019.

DIEZ, M. A.; ALVAREZ, R.; FENANDEZ, M. **Biomass derived products as modifiers of the rheological properties of coking coals.** Fuel, 96:306-313, jan. 2012.

DURÁN, C. A. A.; TSUKUI, A.; SANTOS, F. K. F.; MARTINEZ, S. T.; BIZZO, H. R.; REZENDE, C. M. **Café: Aspectos gerais e seu Aproveitamento para além da Bebida.** Revista Virtual de Química, 9:107-134, 2017.

EM – Estado de Minas. **Produção de café no Brasil cresce 25% em 2020, comparado com ano passado.** (2020) Disponível em: <https://www.em.com.br/app/noticia/economia/2020/09/29/internas_economia,1190081/producao-de-cafe-no-brasil-cresce-25-em-2020-comparado-com-2019.shtml>. Acesso em: 21 de fev. 2021.

EUROMONITOR INTERNATIONAL. Os cinco países mais promissores para o café. Market Research Blog. Disponível em: <<https://blog.euromonitor.com/os-cinco-paises-mais-promissores-para-o-cafe/>>. Acesso em: 16 de fev. 2020.

FAIZAL, H. N.; LATIFF, Z. A.; WAHID, M. A.; DARUS, A. N. **Physical and combustion characteristics of biomass residues from palm oil mills.** Z. Bojkovic (Ed.), New Aspects of Fluid Mech. Heat Transf. and Environment: Proceeding of the 8th International Conference on Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment, Taipei, Taiwan, 34-38, 2010.

FELFLI, F.F; MESA, J. M. P.; ROCHA, J. D.; FILIPPETTO, D.; LUENGO, C. A.; PIPPO, W. A. **Biomass briquetting and its perspectives in Brazil.** Biomass and Bioenergy, 35:236-242, ago. 2011.

FERREIRA, J. C., FURTADO, T. S., NEVES, M. D., et al. **Influência do teor de umidade no poder calorífico em diferentes unidades e componentes de árvores de Pinus taeda.** 1º Congresso Brasileiro sobre Florestas Energéticas, Belo Horizonte, Brasil, jun. 2009.

FILIPPETTO, D., **Briquetagem de resíduos vegetais: viabilidade técnicoeconômica e potencial de mercado.** Dissertação M.Sc. Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 2008.

GONÇALVES, B. F.; YAMAJI, F. M.; FERNANDEZ, B. O.; RÓZ, A.; FLORIANO, F. S. **Caracterização e comparação entre diferentes granulometrias de serragem de Eucalyptus grandis para confecção de briquetes.** Simpósio de Meio Ambiente e Tecnologia Flore, Sorocaba, UFSCAR, 2013.

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório 2019.** Disponível em: <<https://www.iba.org/>>. Acesso em: 19 de fev. 2021.

JENKINS, B. M.; BAXTER, L. L.; MILES JUNOR, T. R.; MILES, C. T. R. **Combustion properties of biomass.** Fuel Processing Technology. London, 54:17-46, 1998.

JENKINS, K. J. ; KRAMER, J. K. G. **Effects of dietary corn oil and fish oil concentrate on lipid composition of calf tissues.** J. Dairy Sci., 73: 2940-2951, 1990.

KANG, S.B.; OH, H.Y.; KIM, J.J.; CHOI, K.S. **Characteristics of spent coffee ground as a fuel and combustion test in a small boiler (6.5 kW).** Renew. Energy, 113:208–1214, 2017.

KONGPRASERT, N; WANGPHANICH, P; JUTILARPTAVORN, A. **Charcoal Briquettes from Madan Wood Waste as an Alternative Energy in Thailand.** Procedia Manufacturing, 30:128-135, fev. 2019.

LI, Y; XU, H.; JING, C.; JIANG, J.; HOU, X. **A novel heat transfer model of biomass briquettes based on secondary development in EDEM.** Renewable Energy. 131: 1247-1254, jul. 2018.

LIPPEL. **Briquetadeira de ferro.** Disponível em: <<http://www.lippelmetal.com.br/briquetadeira-bml-800/>>. Acesso em: 22 de fe. 2021.

LOURENÇO, Y. B. C.; SOUZA, E. C.; MARQUES, S. R. R.; JUNIOR, V. C. B.; MEDEIROS, L. C. D.; PIMENTA, A. **Discussões e avanços da produção de briquetes no Brasil: Uma revisão bibliográfica.** Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeir, Florianópolis, 2017.

LUBWAMA, M; YIGA, V.A. **Characteristics of briquettes developed from rice nd coffee husks for domestic cooking applications in Uganda.** Renewable Energy, 118:43-55, nov. 2017.

MADIEDO, L; FAES, E; BARRIOCANAL, C. **Mechanical strenght of bio-coke from briquettes.** Renewable Energy. 145: 1717-1721, jul. 2019.

MARAFON, A.C.; SANTIAGO, A. D.; AMARAL, A. F. C.; BIERHALS, A. N.; PAIVA, H. L.; GUIMARAES, V. S. **Uso da Biomassa para a Geração de Energia.** Embrapa, Aracaju, SE, 2016.

MARTINEZ, C.L.M; ROCHA, A. E. P.; CARNEIRO, O. A. C.; GOMES, B. F. J.; BATALHA, R. L. A.; VAKKILAINEN, E.; CARDOSO, M. **Characterization of residual biomass from the coffee production chain and assessment the potential for energy purposes.** Biomass and Bioenergy, 120:68-76, nov. 2018.

MARTINEZ, C.L.M; ROCHA, A. E. P.; CARNEIRO, O. A. C.; GOMES, B. F. J.; BATALHA, R. L. A.; VAKKILAINEN, E.; CARDOSO, M. **Production and characterization of coffee-pine wood residue briquette as an alternative fuel for local firing systems in Brazil.** Biomass and Bioenergy, 123:70-77, fev. 2019.

MMA – Ministério do Meio Ambiente – **Importância atual e potencial do uso da biomassa para energia em Sergipe.** Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUD), Brasília, 2008.

NAVALTA, C. J. L. G.; BANAAG, K. G. C.; RABOY, V. A. O.; GO, A. W.,; CABATINGAN, L. K.; JU, Y. **Solid fuel from Co-briquetting of sugarcane bagasse and rice bran.** Renewable Energy. 147 (2020) 1941-1958.

NAKASHIMA, G. T. **Produção de briquetes a partir de resíduos vegetais**. Dissertação (Graduação em Engenharia Florestal). Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2013.

OKOT, D; BILSBORROW, P; PHAN, A. **Briquetting characteristics of bean straw-maize cob blend**. *Biomass and Bioenergy*. 126: 150-158, jul. 2019.

PADILLA, D. R. E.; PIRES, A, S, C, I., YAMAJI, M. F.; FANDIÑO, M. M. J.; **Produção e Caracterização Físico-Mecânica de Briquetes de Fibra de Coco e Palha de Cana-de-Açúcar**; *Rev. Virtual Quim.*, 2016.

PROTÁSIO, T.P; BUFALINO, L.; MENDES, R. F.; RIBEIRO, M. X.; TRUGILHO, P. F.; LEITE, E. R. S. **Torrefação e carbonização de briquetes de resíduos do processo dos grão de café**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, 16:252-1258, 2012.

PROTÁSIO, T.P.; ALVES, I. C. N.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; BALIZA, A. E. R. **Compactação da biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos**. *Pesquisa Florestal Brasileira*. Dez. 2011.

RAJASEENIVASAN, T; SRINIVASAN, V.; QADIR, G. S. M.; SRITHAR, K. **An investigation on the performance of sawdust briquette blending with neem powder**. *Alexandria Engineering Journal*, 55:2833-2838, jul. 2016.

RENDEIRO, G; NOGUEIRA, M. F. M.; BRASIL, A. C. M.; CRUZ, D. O. A.; GUERRA, D. R. S.; MACEDO, E. N.; OCHIHARA, J. A. **Combustão e Gaseificação de Biomassa Sólida: soluções energéticas para a Amazônica**. Ministério de Minas e Energia, Brasília, DF, 2008.

SANT'ANNA, M.C.S; LOPES, D. F. C.; CARVALHO, J. B. R. **Caracterização de briquetes obtidos com resíduos da agroindústria**. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, 14: 289-294, 2012.

SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. **Bioenergia e biorrefinaria: cana-de-açúcar e espécies florestais**. Viçosa, 2013.

SNIF. **Portal do Sistema Nacional de Informações Florestais**. (2018), Serviço Florestal Brasileiro. Disponível em: < snif.florestal.gov.br >. Acesso em: 06 set. 2019.

SONG, X.; ZHANG, S.; WU, Y.; CAO, Z. **Investigation on the properties of the bio-briquette fuel prepared from hydrothermal pretreated cotton stalk and wood sawdust**, *Renewable Energy*. 151 (2020) 184-191.

TAMILVANAN, A. **Preparation of Biomass Briquettes using Various Agro-Residues and Waste Papers**. *Journal of Biofuels*; 4:47-55, jul. 2013.

TERRA NOVA. **Café**. Blog. Disponível em: < <https://terranova.agr.br/cafe/#:~:text=A%20Produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20caf%C3%A9%20no,2%2C4%20milh%C3%B5es%20de%20toneladas> >. Acesso em 21 de fev. 2021.

TOKIMOTO, T.; KAWASAKI, N.; NAKAMURA, T.; AKUTAGAWA, J.; TANADA, S. **Removal of lead ions in drinking water by coffee grounds as vegetable biomass.** Journal of Colloid and Interface Science, v. 281, n. 1, p. 5661, jan. 2005.

ZHANG, J.; ZHENG, D.; ZHANG, X. **The optimum conditions for preparing briquette made from millet bran using Generalized Distance Function.** Renewable Energy. 140 (2019) 692-703.

Apêndice

A1 – Resultados das triplicatas dos briquetes de serragem de Pinus sp. com adição de borra de café.

Triplicata	Massa (g)	Espessura (mm)	Volume (cm ³)	Massa Específica aparente (g/cm ³)	PCS (cal/g)	Massa Específica Energética (cal/cm ³)
P-01-a	21,39	15,12	40,83	0,524	4228,43	2214,93
P-01-b	21,15	15,80	42,67	0,496	4290,85	2126,76
P-01-c	21,42	16,18	43,70	0,490	4141,8	2030,26
P-02-a	21,17	16,09	43,45	0,487	4102,03	1998,42
P-02-b	21,26	16,14	43,59	0,488	4123,12	2010,98
P-02-c	21,51	16,22	43,81	0,491	4230,01	2077,08
P-03-a	21,25	16,33	44,10	0,482	4100,12	1975,57
P-03-b	21,24	16,28	43,97	0,483	4205,15	2031,44
P-03-c	21,35	16,42	44,35	0,481	4069,31	1959,15
P-04-a	21,61	16,63	44,91	0,481	4121,00	1982,84
P-04-b	21,43	16,47	44,48	0,482	4160,72	2004,56
P-04-c	21,19	16,04	43,32	0,489	4067,69	1989,74
P-05-a	21,4	16,41	44,32	0,483	4020,12	1941,18
P-05-b	21,55	16,46	44,45	0,485	3995,83	1937,08
P-05-c	21,33	16,39	44,26	0,482	4093,4	1972,51

Triplicata	Teor de Umidade	Teor de Cinzas	Teor de Carbono Fixo	Teor de Matéria Volátil
P-01-a	9,09%	4,44%	89,72%	1,97%
P-01-b	9,08%	4,38%	90,02%	2,13%
P-01-c	9,10%	4,32%	87,92%	1,96%
P-02-a	11,63%	4,13%	88,43%	2,33%
P-02-b	11,65%	4,01%	90,22%	2,19%
P-02-c	11,52%	4,03%	90,18%	2,32%
P-03-a	13,78%	3,81%	91,42%	2,52%
P-03-b	13,12%	3,97%	89,70%	2,37%
P-03-c	13,75%	4,13%	87,74%	2,40%
P-04-a	14,66%	3,08%	89,85%	2,98%
P-04-b	14,31%	3,17%	91,33%	2,66%
P-04-c	14,47%	3,14%	91,61%	2,82%
P-05-a	15,22%	2,63%	92,24%	3,12%
P-05-b	15,01%	2,58%	92,55%	2,78%
P-05-c	15,04%	2,50%	90,85%	3,01%

A2 – Análise estatística das triplicatas dos briquetes de serragem de Pinus sp. com adição de borra de café.

Triplicata	Massa Específica aparente (g/cm ³)	Massa Específica aparente média (g/cm ³)	Desvio padrão (g/cm ³)	Intervalo de confiança (g/cm ³)	PCS (cal/g)	PCS Médio (cal/g)	Desvio padrão (cal/g)	Intervalo de confiança (cal/g)	Massa Específica Energética (cal/cm ³)	Massa Específica Energética Média (cal/cm ³)	Desvio padrão (cal/cm ³)	Intervalo de confiança (cal/cm ³)
P-01-a	0,524	0,503	0,018	0,020	4228,43	4220,36	74,85	84,70	2214,93	2122,07	92,37	104,52
P-01-b	0,496				4290,85				2126,76			
P-01-c	0,490				4141,8				2030,26			
P-02-a	0,487	0,489	0,002	0,002	4102,03	4151,72	68,62	77,65	1998,42	2028,75	42,26	47,82
P-02-b	0,488				4123,12				2010,98			
P-02-c	0,491				4230,01				2077,08			
P-03-a	0,482	0,482	0,001	0,001	4100,12	4124,86	71,22	80,59	1975,57	1988,67	37,90	42,88
P-03-b	0,483				4205,15				2031,44			
P-03-c	0,481				4069,31				1959,15			
P-04-a	0,481	0,484	0,004	0,005	4121,00	4116,47	46,68	52,82	1982,84	1992,28	11,10	12,56
P-04-b	0,482				4160,72				2004,56			
P-04-c	0,489				4067,69				1989,74			
P-05-a	0,483	0,483	0,001	0,002	4020,12	4036,45	50,79	57,48	1941,18	1950,31	19,38	21,93
P-05-b	0,485				3995,83				1937,08			
P-05-c	0,482				4093,4				1972,51			

Triplicata	Teor de Umidade Médio	Desvio padrão	Intervalo de confiança	Teor de Cinzas Médio	Desvio padrão	Intervalo de confiança	Teor de Carbono Fixo Médio	Desvio padrão	Intervalo de confiança	Teor de Matéria Volátil Médio	Desvio padrão	Intervalo de confiança
P-01-a	9,09%	0,010%	0,011%	4,38%	0,060%	0,068%	89,22%	1,136%	1,285%	2,02%	0,095%	0,108%
P-01-b												
P-01-c												
P-02-a	11,60%	0,070%	0,079%	4,06%	0,064%	0,073%	89,61%	1,022%	1,157%	2,28%	0,078%	0,088%
P-02-b												
P-02-c												
P-03-a	13,55%	0,373%	0,422%	3,97%	0,160%	0,181%	89,62%	1,841%	2,084%	2,43%	0,079%	0,090%
P-03-b												
P-03-c												
P-04-a	14,48%	0,175%	0,198%	3,13%	0,046%	0,052%	90,93%	0,946%	1,070%	2,82%	0,160%	0,181%
P-04-b												
P-04-c												
P-05-a	15,09%	0,114%	0,129%	2,57%	0,066%	0,074%	91,88%	0,905%	1,025%	2,97%	0,173%	0,196%
P-05-b												
P-05-c												

B1 – Resultados das triplicatas dos briquetes de serragem de Cambará com adição de borra de café.

Triplicata	Massa (g)	Espessura (mm)	Volume (cm ³)	Massa Específica aparente (g/cm ³)	PCS (cal/g)	Massa Específica Energética (cal/cm ³)
C-01-a	21,47	15,51	41,89	0,513	4092,81	2097,80
C-01-b	21,12	15,30	41,32	0,511	4120,33	2105,99
C-01-c	21,25	15,45	41,73	0,509	4273,82	2176,55
C-02-a	21,35	16,05	43,35	0,493	4119,15	2028,86
C-02-b	21,41	16,14	43,59	0,491	4067,65	1997,92
C-02-c	21,55	16,32	44,08	0,489	4168,88	2038,30
C-03-a	21,4	16,20	43,75	0,489	4101,55	2006,18
C-03-b	21,26	16,03	43,29	0,491	4043,65	1985,75
C-03-c	21,44	16,41	44,32	0,484	4123,06	1994,61
C-04-a	21,54	16,33	44,10	0,488	4085,74	1995,50
C-04-b	21,22	16,15	43,62	0,487	4030,72	1961,00
C-04-c	21,6	16,35	44,16	0,489	4134,82	2022,62
C-05-a	21,19	16,39	44,26	0,479	4052,34	1939,90
C-05-b	21,53	16,31	44,05	0,489	4023,00	1966,36
C-05-c	21,62	16,31	44,05	0,491	4013,94	1970,13
C-06-a	21,74	16,73	45,18	0,481	4045,89	1946,70
C-06-b	21,56	16,65	44,97	0,479	4009,72	1922,52
C-06-c	21,66	16,71	45,13	0,480	4015,82	1927,43

Triplicata	Teor de Umidade	Teor de Cinzas	Teor de Carbono Fixo	Teor de Matéria Volátil
C-01-a	9,26%	3,00%	89,38%	3,11%
C-01-b	9,30%	3,12%	91,43%	3,43%
C-01-c	9,46%	3,09%	90,99%	3,24%
C-02-a	12,41%	3,01%	91,66%	3,45%
C-02-b	12,68%	2,88%	89,37%	3,08%
C-02-c	12,41%	3,02%	91,25%	3,34%
C-03-a	14,08%	2,96%	89,56%	3,44%
C-03-b	14,27%	2,89%	91,45%	3,36%
C-03-c	14,34%	2,97%	91,30%	3,22%
C-04-a	15,02%	2,76%	91,32%	3,45%
C-04-b	14,78%	2,88%	91,80%	3,33%
C-04-c	14,81%	2,58%	90,30%	3,36%
C-05-a	15,33%	2,51%	93,22%	3,48%
C-05-b	15,58%	2,37%	90,68%	3,51%
C-05-c	15,44%	2,41%	91,26%	3,27%
C-06-a	20,77%	2,33%	93,15%	3,49%
C-06-b	20,51%	2,25%	92,12%	3,55%
C-06-c	20,49%	2,47%	90,07%	3,49%

B2 – Análise estatística das triplicatas dos briquetes de serragem de Cambará com adição de borra de café.

Triplicata	Massa Específica aparente (g/cm ³)	Massa Específica aparente média (g/cm ³)	Desvio padrão (g/cm ³)	Intervalo de confiança (g/cm ³)	PCS (cal/g)	PCS Médio (cal/g)	Desvio padrão (cal/g)	Intervalo de confiança (cal/g)	Massa Específica Energética (cal/cm ³)	Massa Específica Energética Média (cal/cm ³)	Desvio padrão (cal/cm ³)	Intervalo de confiança (cal/cm ³)
C-01-a	0,513	0,511	0,002	0,002	4092,81	4162,32	97,54	110,37	2097,80	2126,89	43,30	48,99
C-01-b	0,511				4120,33				2105,99			
C-01-c	0,509				4273,82				2176,55			
C-02-a	0,493	0,491	0,002	0,002	4119,15	4118,56	50,62	57,28	2028,86	2021,69	21,12	23,90
C-02-b	0,491				4067,65				1997,92			
C-02-c	0,489				4168,88				2038,30			
C-03-a	0,489	0,488	0,004	0,004	4101,55	4089,42	41,07	46,48	2006,18	1995,48	10,24	11,59
C-03-b	0,491				4043,65				1985,75			
C-03-c	0,484				4123,06				1994,61			
C-04-a	0,488	0,488	0,001	0,002	4085,74	4083,76	52,08	58,93	1995,50	1993,02	30,88	34,95
C-04-b	0,487				4030,72				1961,00			
C-04-c	0,489				4134,82				2022,62			
C-05-a	0,479	0,486	0,006	0,007	4052,34	4029,76	20,07	22,71	1939,90	1958,83	16,47	18,64
C-05-b	0,489				4023,00				1966,36			
C-05-c	0,491				4013,94				1970,13			
C-06-a	0,481	0,480	0,001	0,001	4045,89	4023,81	19,36	21,91	1946,70	1932,21	12,78	14,47
C-06-b	0,479				4009,72				1922,52			
C-06-c	0,480				4015,82				1927,43			

Triplicata	Teor de Umidade Médio	Desvio padrão	Intervalo de confiança	Teor de Cinzas Médio	Desvio padrão	Intervalo de confiança	Teor de Carbono Fixo Médio	Desvio padrão	Intervalo de confiança	Teor de Matéria Volátil Médio	Desvio padrão	Intervalo de confiança
C-01-a	9,34%	0,106%	0,120%	3,07%	0,062%	0,071%	90,60%	1,079%	1,221%	3,26%	0,161%	0,182%
C-01-b												
C-01-c												
C-02-a	12,50%	0,156%	0,176%	2,97%	0,078%	0,088%	90,76%	1,221%	1,382%	3,29%	0,190%	0,215%
C-02-b												
C-02-c												
C-03-a	14,23%	0,135%	0,152%	2,94%	0,044%	0,049%	90,77%	1,051%	1,189%	3,34%	0,111%	0,126%
C-03-b												
C-03-c												
C-04-a	14,87%	0,131%	0,148%	2,74%	0,151%	0,171%	91,14%	0,766%	0,867%	3,38%	0,062%	0,071%
C-04-b												
C-04-c												
C-05-a	15,45%	0,125%	0,142%	2,43%	0,072%	0,082%	91,72%	1,331%	1,506%	3,42%	0,131%	0,148%
C-05-b												
C-05-c												
C-06-a	20,59%	0,156%	0,177%	2,35%	0,111%	0,126%	91,78%	1,568%	1,774%	3,51%	0,035%	0,039%
C-06-b												
C-06-c												