



Ministério da Educação

Universidade Federal da Integração Latino-Americana

Instituto de Tecnologia, Infraestrutura e Território

Centro Interdisciplinar de Tecnologia e Infraestrutura

**ANÁLISE, DESENVOLVIMENTO E COMPARAÇÕES DE BRIQUETES DE
RESÍDUOS DE PODAS DE ÁRVORES DE FOZ DO IGUAÇU E DE ERVA MATE**

FELIPE SOUZA DAVIES

Foz do Iguaçu, PR

Outubro de 2021

Felipe Souza Davies

**ANÁLISE, DESENVOLVIMENTO E COMPARAÇÕES DE BRIQUETES DE
RESÍDUOS DE PODAS DE ÁRVORES DE FOZ DO IGUAÇU E DE ERVA MATE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Monteiro Eliott.

FOZ DO IGUAÇU

Outubro de 2021

ANÁLISE, DESENVOLVIMENTO E COMPARAÇÕES DE BRIQUETES DE RESÍDUOS DE PODAS DE ÁRVORES DE FOZ DO IGUAÇU E DE ERVA MATE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energias.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Monteiro Eliott

UNIVERSIDADE FEDERAL DA INTEGRAÇÃO LATINO AMERICANA - UNILA

Andréia Cristina Furtado

UNIVERSIDADE FEDERAL DA INTEGRAÇÃO LATINO AMERICANA - UNILA

Guilherme Moreira Placco

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA - ITA

Foz do Iguaçu, _____ de _____ de _____.

*Aos meus pais Adira Bueno de Souza Davies e
Aldir José Davies, pelos anos de apoio
incondicional neste caminho percorrido.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Aldir e Adira, meus tios Adelar e Érika, Irmãos Fábio e Fernando, Nonna Inês e toda a família pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

A minha querida Letícia, por toda ajuda, amor e carinho.

Ao meu orientador Rodrigo Monteiro Elliott, pelo suporte, correções e incentivos.

A esta universidade por tudo que aprendi.

Aos professores que me ajudaram ao longo do curso.

Aos meus amigos “trambólicos”, Carlos, Jimmy, José, Maicon, Pedro e Rodrigo

As minhas amigas “galactics”, Ruth e Vanessa.

Por tudo que aprendi no estágio e pela ajuda nas atividades desenvolvidas nesse trabalho de conclusão de curso.

Aos engenheiros da Solar Oeste Engenharia, especialmente o Guilherme Moreira Placco, por todo apoio concedido.

Ao Professor Paulo da UTFPR-Medianeira pelos auxílios prestados neste trabalho.

A todos meus amigos da faculdade e fora dela.

A Paula, Valentina e Wagner pelo suporte nas análises desenvolvidas nos laboratórios da UNILA.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

“Toda a nossa ciência, comparada com a realidade, é primitiva e infantil – e, no entanto, é a coisa mais preciosa que temos”.

Albert Einstein

Davies, F.S. **ANÁLISE, DESENVOLVIMENTO E COMPARAÇÕES DE BRIQUETES DE RESÍDUOS DE PODAS DE ÁRVORES DE FOZ DO IGUAÇU E DE ERVA MATE.** 2021. 65 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Energia) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2021.

RESUMO

O uso dos recursos energéticos, desde o início das civilizações, vêm sendo a força motriz para o desenvolvimento e sobrevivência da raça humana. O grau de importância desses é facilmente visto em uma análise histórica, alternando-se entre determinadas eras - como a da madeira, do carvão e a atual era do petróleo - onde apresentam extrema relevância para o cenário político e econômico das nações. Há a necessidade de pensar na geração energética com taxas menores de emissões de CO₂, visando a diminuição do impacto ambiental que a cada dia degrada o planeta. Desta maneira, a utilização de fontes de energia renováveis e sustentáveis torna-se uma alternativa para a solução desse problema, em especial, o uso da energia proveniente de biomassas. Um biocombustível sólido - feito a partir da densificação de resíduos lignocelulósicos - conhecido como briquete, é uma alternativa rentável economicamente e que possui viabilidade técnica, uma vez que o processo de produção não envolve tecnologias restritas. O objetivo do presente trabalho está baseado na produção de briquetes de Resíduos de Podas de Árvores (RPA), coletados na cidade de Foz do Iguaçu-PR, e de Erva Mate sem a adição de aglutinantes. As amostras dos RPA e de Erva Mate foram separadas por três ensaios: E1(100% RPA), E2(50% RPA e 50% Erva Mate) e E3 (100% Erva Mate). Posteriormente, as amostras foram destinadas para análises de parâmetros físicos e energéticos, tanto das próprias amostras quanto dos briquetes produzidos. O teor de umidade para E1 foi de 11,67%, 10,51 para E2 e 9,994% para E3, apresentando o menor teor de umidade dentre os exemplares. A amostra de Erva Mate apresentou maior teor de materiais voláteis (73,75%), enquanto a amostra de RPA apresentou maiores valores de teor de cinzas (9,96%) e de carbono fixo (17,48%). Os valores do poder calorífico superior, inferior e útil foram maiores para os briquetes de Erva Mate (19,46MJ/kg); (18,11MJ/kg) e (16,05MJ/kg), respectivamente, e menores para RPA, com (18,76MJ/kg); (17,40MJ/kg) e (15,08MJ/kg), respectivamente. A densidade energética acompanhou a sequência do poder calorífico, com resultados para Erva Mate de (16.415,838MJ/m³) e de (13.579,191MJ/m³) para os briquetes de RPA. O resultado mudou para os valores de resistência mecânica, com os briquetes de RPA suportando uma carga máxima de ruptura de (33,367kN), enquanto os briquetes de Erva Mate tiveram o menor índice, de (20,867kN). Os briquetes produzidos com a blenda de RPA + Erva Mate, apresentaram resultados intermediários. Portanto, com os resultados obtidos verifica-se que os produtos gerados possuem um alto potencial energético, sendo bons substitutos à lenha.

Palavras-chave: Briquetes, Resíduos de Podas de Árvores, Erva Mate.

Davies, F.S. **ANALYSIS, DEVELOPMENT AND COMPARISON OF RESIDUE BRIQUETTES FROM PRUNING TREES FROM FOZ DO IGUAÇU AND ERVA MATE.** 2021. 65 pages. Graduation Work (Energy Engineering) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2021.

ABSTRACT

The use of energy resources, since the beginning of civilizations, has been the driving force for the development and survival of the human race. The degree of importance of them is easily seen in a historical analysis, progressing through certain eras—such as wood, coal and the current era of oil—where all of them are still extremely important for the political and economic scenario worldwide. There is a need to think about generating energy with lower rates of CO₂ emissions to reduce the environmental impact that degrades the planet daily. Thus, the use of renewable and sustainable energy sources has become a possible solution for solving this problem, especially the use of energy from biomass. A solid biofuel – made from the densification of lignocellulosic waste – known as “briquette”, is an economically profitable alternative and also has technical feasibility, since the production process does not involve restricted technologies. The objective of the present work is based on the production of residues from Tree Pruning Waste (TPW) – referred to as “RPA” in this paper—collected in the city of Iguassu Falls-PR, and from Yerba Mate without the addition of binders. The TPW and Yerba Mate samples were separated by three tests: E1(100% TPW), E2(50% TPW and 50% Yerba Mate) and E3 (100% Yerba Mate). Afterwards, the samples were subject to analysis of physical and energetic parameters, both of the samples themselves and of the produced “briquettes”. The moisture content for E1 was 11.67%, 10.51 for E2, and 9.994% for E3, presenting the lowest moisture content. The Yerba Mate sample had a higher content of volatile materials (73.75%), while TPW had higher ash content (9.96%) and fixed carbon (17.48%). The values of the superior, inferior and useful calorific value were greater for the Yerba Mate “briquettes” (19.46MJ/kg), (18.11MJ/kg) and (16.05MJ/kg), respectively, and smaller for TPW, with (18.76MJ/kg), (17.40MJ/kg) and (15.08MJ/kg), respectively. Energy density followed the pathway of calorific value, with 16,415,838MJ/m³ as results for Yerba Mate and 13,579,191MJ/m³ for RPA briquettes. During the mechanical strength tests, the outcome changed. The RPA briquettes supported a maximum breaking load of 33.367kN, while the Yerba Mate briquettes had the lowest result, of 20.867kN. The “briquettes” produced with the blend of TPW + Erva Mate showed intermediate results. Therefore, with the information obtained, it is verified that the products generated have a high energy potential and are good substitutes for firewood.

Keywords: Briquettes, Waste from Tree Pruning, Yerba Mate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Gráfico da matriz elétrica brasileira.	18
Figura 2.2 - Fontes de biomassa.	19
Figura 2.3 - Bebidas culturais com Erva Mate: a) Chimarrão, b) Tererê.	26
Figura 2.4 - Relação de dimensão de armazenamento de combustíveis.	27
Figura 3.1 - Serviço de trituração de podas de árvores da cidade de Foz do Iguaçu.....	38
Figura 3.2 - Amostras em processo de secagem em estufa LUCA-80/480.	38
Figura 3.3 - Massa de RPA retida nas peneiras.....	39
Figura 3.4 - Briquetadeira utilizada para compactação das amostras de RPA e de Erva Mate.....	42
Figura 3.5 - a) Conteúdo de RPA colocado no cilindro, antes da compactação; b) Arranjo final da prensa e briquetadeira durante a briquetagem.....	42
Figura 3.6 - Calorímetro utilizado para a obtenção do PCS das amostras de RPA e Erva Mate.....	43
Figura 3.7 - Equipamentos utilizados para obtenção da densidade aparente dos briquetes de RPA e de Erva Mate.	44
Figura 3.8 - Avaliação da resistência dos briquetes produzidos.	45
Figura 3.9 - Ponto de Ruptura dos briquetes produzidos.	45
Figura 4.1 - Briquetes produzidos de RPA, RPA +Erva Mate e de Erva Mate.	51
Figura 4.2 - Gráfico de Barras para valores do PCS, PCI e PCU determinados para os ensaios E1, E2 e E3.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Características dos Briquetes.....	27
Tabela 2.2 - Vantagens do uso de briquetes.....	28
Tabela 2.3 - Valores caraterísticos de PCS e PCI.....	32
Tabela 3.1 - Plano de ensaios de briquetes com respeito à massa das amostras.....	41
Tabela 4.1 - Distribuição granulométrica em porcentagem.	47
Tabela 4.2 - Teor de Umidade das amostras de RPA e Erva Mate.	48
Tabela 4.3 - Análise Imediata das amostras de RPA e Erva Mate.	49
Tabela 4.4 - Carga máxima de ruptura dos briquetes produzidos.....	51
Tabela 4.5 - Análise energética dos briquetes.....	53
Tabela 4.6 - Densidade básica e Energética dos ensaios E1, E2 e E3.	55
Tabela 4.7 - Análise comparativa entre os briquetes produzidos.....	56

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	10
CAPÍTULO I	13
1. INTRODUÇÃO	13
1.1. JUSTIFICATIVA	15
1.2. OBJETIVOS	15
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	16
CAPÍTULO II	17
2. REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1. BIOMASSA	17
2.2. PIRÓLISE LENTA	22
2.3. RESÍDUOS DE PODAS DE ÁRVORES (RPA)	23
2.4. ERVA MATE	25
2.5. BRIQUETE	26
2.6. PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NA PRODUÇÃO DE BRIQUETES	28
2.6.1. TEOR DE UMIDADE	28
2.6.2. GRANULOMETRIA	29
2.6.3. PRESSÃO E TEMPERATURA	30
2.6.4. AGENTE AGLUTINANTE	30
2.7. PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DOS BRIQUETES	31
2.7.1. PODER CALORÍFICO	31
2.7.2. RESISTÊNCIA MECÂNICA	34
2.7.3. DENSIDADE ENERGÉTICA	35
CAPÍTULO III	37
3. METODOLOGIA	37
3.1. COLETA E SECAGEM DA AMOSTRA	37
3.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA BIOMASSA	38
3.2.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	38
3.2.2. TEOR DE UMIDADE	39
3.2.3. TEOR DE VOLÁTEIS	39
3.2.4. TEOR DE CINZAS	40
3.2.5. TEOR DE CARBONO FIXO	40
3.3. PROCESSO DE BRIQUETAGEM	41

3.4.	PODER CALORÍFICO DOS BRIQUETES	42
3.5.	ANÁLISE DA DENSIDADE ENERGÉTICA.....	43
3.6.	RESISTÊNCIA MECÂNICA	44
3.7.	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS	46
CAPÍTULO IV		47
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	47
4.1.	GRANULOMETRIA	47
4.2.	TEOR DE UMIDADE.....	47
4.3.	ANÁLISE IMEDIATA	49
4.4.	PROCESSO DE BRIQUETAGEM	50
4.5.	RESISTÊNCIA MECÂNICA	51
4.6.	PODER CALORÍFICO.....	52
4.7.	DENSIDADE ENERGÉTICA	54
4.8.	ANÁLISE COMPARATIVA	56
CAPÍTULO V		57
5.	CONCLUSÕES	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		59

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

O Brasil apresenta um grande potencial na produção de briquetes, principalmente por decorrência da grande quantidade de indústrias voltadas ao setor agroindustrial, (Madeireiras, Moveleiras, Serrarias, etc.) as quais geram todos os dias, grandes quantidades de resíduos propícios para a fabricação deste bioproduto. Além disso, os resíduos provindos das podas de árvores também propiciam a produção de briquetes, já que tais rejeitos são, em inúmeras vezes, descartados em aterros, sem aproveitamento algum.

O uso dos recursos energéticos, desde o início das civilizações, vêm sendo a força motriz para o desenvolvimento e sobrevivência da raça humana. O grau de importância desses é facilmente visto em uma análise histórica, alternando-se entre determinadas eras - como a da madeira, do carvão e a atual era do petróleo - onde cada um destes recursos ainda apresentam extrema importância para o cenário político e econômico das nações. É evidente que o petróleo assumiu um papel de necessidade fundamental para a sustentação de toda esfera governamental e, portanto, tornou-se um objeto de disputa e conflito entre as grandes potências do mundo contemporâneo, uma vez que possui um alto potencial energético.

Entretanto, a forma de aproveitamento energético do petróleo dá-se unicamente pela queima de seus derivados, o que ocasiona uma alta contaminação por parte dos gases provenientes da combustão, gerando um grande impacto ambiental degradando continuamente o planeta Terra. De toda forma, o petróleo por si só não é suficiente ao nível de suprir em totalidade a demanda energética mundial. Por decorrência disso, tem-se uma carência por fontes de energia que gerem o mínimo impacto ambiental possível, buscando maior grau de diversificação (GRIPPI, 2009). Desse modo, quando se refere à redução de emissões de gases à atmosfera, o termo “bioenergia” é empregado com força, a fim de que a demanda energética seja suprida com o menor grau de degradação ambiental. Uma alternativa plausível, já que conta com um grande potencial energético e de aceitação de mercado, é o briquete, que, apesar de pouco difundido no Brasil, apresenta-se como um excelente substituto à madeira, a qual é muito empregada em caldeiras, fornos industriais, aquecedores e até mesmo para uso doméstico, para uso em churrasqueiras e fogões à lenha.

O briquete é, por definição, um combustível sólido, o qual é obtido a partir da compactação de qualquer biomassa, concentrando-se de maneira mais eficiente a energia nela contida por decorrência dos processos biológicos (como a fotossíntese). Isso ocorre, pois a densidade energética, antes pequena é aumentada de forma definitiva, o que converte os resíduos e agroindustriais em produtos de valor comercial elevado e ecologicamente correto.

No processo de compactação da biomassa, conhecido como briquetagem, é realizada a sua densificação, isso contribui, para o aumento do conteúdo energético por volume do material, o que diminui a velocidade de liberação de energia, que é propiciada pela uniformidade da combustão (BARROS, 2013).

Tendo em vista que o Brasil é essencialmente um país agrícola com grande potencial de produção agroflorestal, o mesmo traz consigo uma consequência de geração de resíduos, que causam impactos diretos ao ambiente. A razão disso está na sua taxa de geração residual, maior que a taxa de degradação. Em caso de descarte de maneira errônea, os resíduos agroflorestais produzem grande quantidade de metano e gás carbônico, que ao serem dispostos na atmosfera, unem-se aos gases do efeito estufa (PETRICOSKI, 2017). Seguindo esta linha de pensamento, os resíduos de podas de árvores, - oriundos da extração dos galhos, folhas, raízes e troncos - são descartados majoritariamente em aterros sanitários e lixões. Em contrapartida, existem casos específicos, como na cidade de Foz do Iguaçu, onde estes resíduos têm seu designo serem convertidos em adubo orgânico. Ainda assim, devido a grande quantidade gerada, tal forma de aproveitamento pode ser considerada um desperdício de biomassa, já que existe um potencial energético a partir da briquetagem. (BARROS, 2013).

Neste mesmo sentido, o descarte da borra de Erva Mate também apresenta sérios problemas de destinação adequada, uma vez que essa é descartada frequentemente como lixo doméstico comum. Essa situação propicia elevados índices de contaminação e poluição, oriundos de sua decomposição junto a outras diversas substâncias. Isto não seria necessário caso o resíduo fosse destinado para fins energéticos, também na forma de briquetes.

1.1. JUSTIFICATIVA

Em decorrência da má utilização dos resíduos de biomassa, que muitas vezes são deixados para apodrecimento em aterros, surgem duas soluções: transformação em briquetes ou transformação em adubo orgânico.

Segundo Meira et al. (2012) de acordo com os dados de referência na cidade de Foz do Iguaçu foram depositadas 29.547,27 toneladas de podas de árvores no aterro da cidade, no período de outubro de 2001 a novembro de 2011, sendo neste último período um total de 2.994,78. Conforme uma breve pesquisa solicitada à secretaria municipal da cidade, são realizados em média 60 cortes de árvores e 1200 podas por mês, como forma de prevenção, o que resulta em 198 toneladas de biomassa triturada. Anualmente, essa quantidade totaliza 2376 toneladas de resíduos, que poderiam passar a ocupar um volume muito menor do que é utilizado hoje para a produção de adubo, além de ser agregado um valor comercial considerável com a produção de briquetes.

Contando ainda, com a grande produção de Erva Mate na região, onde do total de 393 mil toneladas, 345,09 mil saíram do Paraná, percebe-se que esse montante irá ser consumido e posteriormente descartado. (AEN, 2019). O descarte da borra de Erva Mate, assim como de RPA, são em inúmeras vezes descartados com lixo residual comum, o que vem a acarretar problemas ambientais graves, quando unidos à outras substâncias encontradas nos lixões e/ou aterros.

Desse modo, a fabricação de briquetes destes resíduos, bem como a análise energética dos mesmos, são justificadas junto ao descarte mais adequado desses rejeitos.

1.2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal, avaliar a resistência e poder calorífico de peças de briquetes produzidas com agregado de podas de árvores da cidade de Foz do Iguaçu e de Erva Mate.

Para o desenvolvimento do presente estudo será necessário cumprir os seguintes objetivos específicos:

- Construir uma briquetadeira manual, a fim de realizar os primeiros testes com resíduos finais;

- Realizar ensaios para verificar as propriedades físicas e físico-químicas dos briquetes e identificar as vantagens e desvantagens em usar os resíduos de podas para produzir briquetes no lugar de adubo orgânico;
- Analisar a resistência dos produtos gerados, bem como o poder calorífico e a densidade energética dos briquetes produzidos a partir de RPA, blenda de RPA e Erva Mate e também de Erva Mate residual.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em 5 capítulos.

Este primeiro capítulo teve como finalidade ser uma base introdutória e uma contextualização do assunto, justificando e postulando os objetivos a serem tratados.

O capítulo II trata-se de uma revisão teórica necessária para realização deste trabalho. Nele são apresentados tópicos sobre a biomassa, a produção de energia a partir dessa matéria orgânica, os meios analíticos do potencial energético do combustível sólido, também são apresentadas tecnologias para conversão de energia da biomassa.

No capítulo III é descrita a metodologia que foi utilizada para a execução da proposta do projeto, assim como os meios de produção e análise que foram utilizados nos ensaios experimentais.

No capítulo IV, é discutido os resultados deste estudo, tratando de forma sucinta e clara, focando majoritariamente nos valores obtidos.

No Capítulo V é realizada uma breve conclusão do trabalho realizado.

CAPÍTULO II

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O uso dos recursos energéticos passou por diferentes eras, a da madeira, do carvão e, na época contemporânea, a era do petróleo. Em cada período estes recursos foram e ainda são a força motriz do desenvolvimento humano. O petróleo é, intrinsecamente, uma fonte extremamente poluente, o que leva à necessidade de alternativas de geração energética, buscando o menor impacto ambiental possível. Uma alternativa para a diminuição dos efeitos degradantes do petróleo se dá pelo uso da biomassa como fonte sustentável de energia.

O cenário brasileiro é altamente favorável para o cultivo das mais diversas culturas agroflorestais, tanto pelo seu posicionamento global, quanto pelo clima tropical e a alta biodiversidade. Com tamanha produção, tanto agrícola quanto florestal, a quantidade de resíduos também é elevada. Tais resíduos são frequentemente desperdiçados, muitas vezes pela má administração dos mesmos.

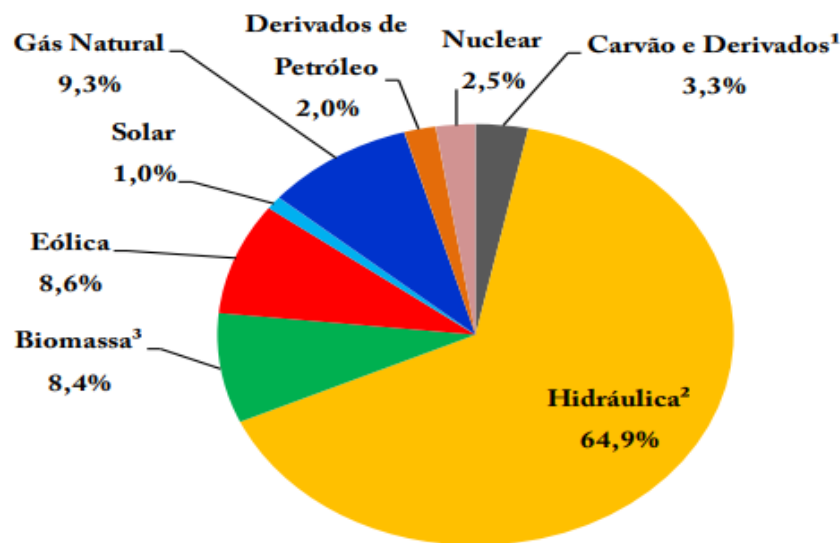
2.1. BIOMASSA

A dependência por recursos energéticos tanto em países desenvolvidos quanto em subdesenvolvidos os torna submissos à principal fonte de energia atual: o petróleo. Por decorrência disso, a maioria dos países estão desenvolvendo e promovendo ações para energias alternativas, a fim de que estas obtenham maior espaço em sua matriz energética. No Brasil a energia elétrica gerada é essencialmente proveniente de fonte hidráulica, porém cerca de 27% dessa energia é produzida através de termoelétricas, como mostrado na Figura 2.1. Estas por sua vez são baseadas na queima de um combustível, no qual o carvão mineral é comumente utilizado para tal fim.

Estas fontes de energias térmicas, são baseadas na queima de um combustível, no qual o carvão mineral é comumente utilizado para tal fim. A motivação de uma mudança de postura é necessária para a redução do uso deste e dos demais derivados do petróleo e, por conseguinte, o alívio energético é gerado pela não dependência energética dos mesmos. Dentre todas as fontes de energias renováveis

para a conversão de energia elétrica, a biomassa apresenta-se com o maior crescimento potencial, tanto a nível nacional quanto internacional. Nesse sentido a definição voltada ao ramo energético que melhor descreve o termo “biomassa”, é delineada por qualquer matéria orgânica (viva ou morta) que de certo modo, consiga ser remodelada em alguma forma de energia, seja ela térmica, mecânica ou elétrica. (ANEEL, 2008).

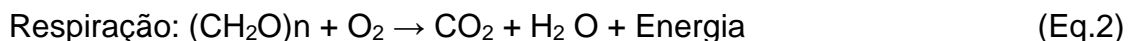
Figura 2.1- Gráfico da matriz elétrica brasileira.



Fonte: EPE, 2020.

Quando se fala em queima direta da biomassa, não se pode deixar de lado a questão do aumento da concentração atmosférica de CO₂, que é causado em grande parte pela combustão seja da biomassa em seu estado primordial, seja transformada em biocombustíveis como por exemplo, biodiesel, bioetanol, carvão vegetal, briquetes, pellets, entre outros. Dessa forma o descontrole climático ocasionado pelas altas emissões de gases poluentes no efeito estufa é sentido a cada dia que passa em todos os ecossistemas. Desse modo, o ciclo do carbono age como um agente regulador climático do planeta, de forma a propiciar o funcionamento correto da biosfera. Este está presente na natureza e é constituinte de toda matéria viva atuando principalmente nos processos de respiração celular e fotossíntese. Neste ponto, as trocas de CO₂ entre a atmosfera e a biosfera são definidas pelas equações 1 e 2. (MARTINS et al, 2003).

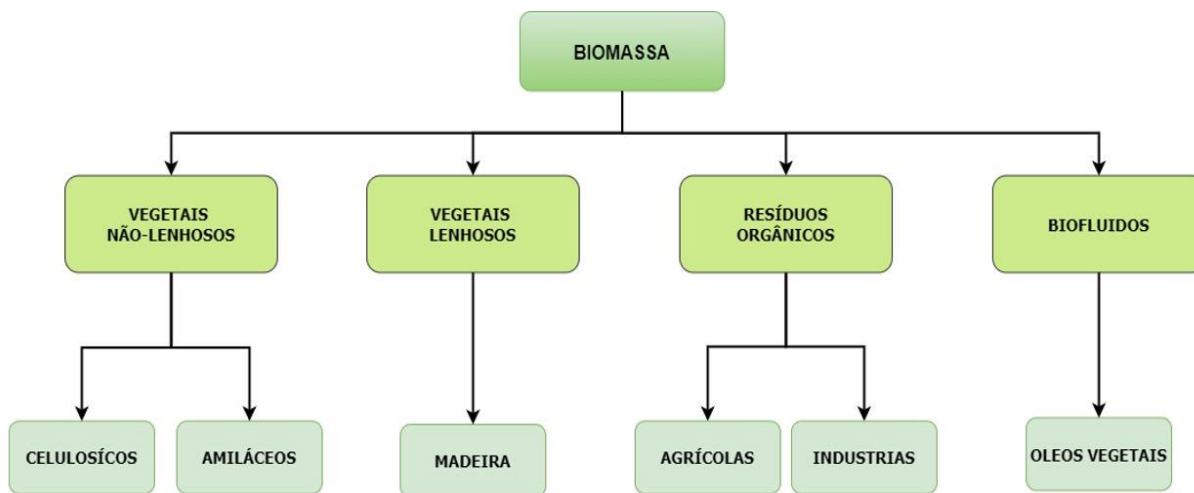




Onde o que sobra do CO_2 é transformado na forma de biomassa (folhas, caules, raízes, etc).

A classificação mais usual quando se trata de biomassa, diz respeito à sua origem, esta comumente é: agrícola (café, milho, capim, soja, entre outras), florestal (madeira, lenha, ramos de poda, entre outros) rejeitos urbanos e industriais (sólidos ou líquidos) e também biofluidos (óleos vegetais). No diagrama da Figura 2.2 é apresentada a classificação da origem da biomassa. A biomassa em si é portadora do que se chama bioenergia, essa energia é oriunda da radiação solar armazenada pelas plantas, as quais podem ser associadas à vetores energéticos, que mais tarde serão convertidos em outras formas de energia. O fato destas plantas poderem ser replantadas, torna a biomassa uma fonte renovável de energia. (COPEL, 2016).

Figura 2.2 - Fontes de biomassa.



Fonte: Adaptado de (IEE USP, 2019).

É importante ressaltar que a utilização da biomassa era amplamente difundida há 50 anos atrás, onde a madeira (lenha) se encontrava na posição de principal utilitário energético e, portanto, o fenômeno da aplicação da biomassa para suprir a demanda energética é tido como natural. Sendo assim, este ressurgimento da utilização da biomassa é visto como benéfico, pois representa uma nova forma de se pensar a utilização de resíduos agrícolas, além do processamento físico-químico de

insumos. Há, ainda, uma percepção maior da população quanto aos problemas da utilização de derivados do petróleo e aumento do efeito estufa, fatores estes que fortalecem a justificação do uso das biomassas. (CORTEZ, 2008)

Os principais conceitos a serem compreendidos para a utilização da biomassa são as definições de celulose, hemicelulose e lignina, uma vez que a avaliação da composição da biomassa em relação a tais características é o primeiro passo no uso desta alternativa energética.

Dentre os compostos presentes na biomassa, a celulose possui cerca de 40% de todo o carbono disponível no vegetal. A quantidade de celulose está diretamente ligada à biomassa referida, podendo variar de 20 a 99% da massa total. Este composto também chamado de homopolissacarídeo é o segundo componente mais abundante na parede celular da planta e sua estrutura molecular possui grandes quantidades de D-glicose unidas por ligações glicosídicas β 1-4. (OGATA, 2013).

Já a hemicelulose ou poliose, é outro polissacarídeo que compreende grande parte da composição da parede celular, com variações de 15 a 35% da composição total. As mesmas possuem pouca massa molecular e diferentemente da celulose, a hemicelulose está composta por pentoses, hexoses, e/ou ácidos urônicos. Estas macromoléculas possuem classificação que depende principalmente do resíduo de açúcar preponderante, como por exemplo xilanas, mananas e glucanas. (OGATA, 2013).

A lignina é uma substância hidrofóbica e possui uma estrutura tridimensional e amorfa, com muitas ramificada. Como visto a parede celular possui três componentes principais, a lignina é justamente o terceiro e corresponde cerca de 20 a 30%. Estas macromoléculas são constituídas por um sistema aromático composto de fenil-propano, o que as diferenciam dos polissacarídeos anteriormente apresentados. Além disso, este composto serve como um esqueleto para a planta, já que a lignina é incorporada como o último componente na parede durante o desenvolvimento celular da planta. (OGATA, 2013).

A caracterização da biomassa, para o seu uso efetivo é fundamental, dentre as propriedades físicas principais da biomassa, estão: o teor de umidade, a massa específica e sua densidade.

➤ MASSA ESPECÍFICA

A Massa específica é a razão entre a massa contínua de determinada substância pelo volume que essa massa contínua ocupa (Equação 3).

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde:

ρ – massa específica (kg/m³);

m – massa da substância (kg);

v – volume que a massa m ocupa (m³).

Diz-se que uma substância é homogênea quando todos os pontos desta, apresentar as mesmas propriedades, por esse motivo ela é portadora de massa e volume. Para resíduos o conceito acima não é o mesmo, já que tem-se a existência de diversos pedaços do mesmo material ocupando o mesmo volume (NOGUEIRA; RENDEIRO, 2008).

➤ DENSIDADE

Ao se tratar a biomassa como combustível, uma das principais características a ser levada em conta, diz respeito à densidade, já que ela irá definir toda a logística de transporte e armazenamento. A Equação 4 traz a relação entre a massa específica da biomassa a ser tratada e a massa específica da água à 25 °C e 1 atm, ou seja, 1000 kg/m³. (NOGUEIRA; RENDEIRO, 2008).

$$D = \frac{\rho_{\text{Biomassa}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (\text{Eq. 4})$$

➤ ANÁLISE IMEDIATA

A análise imediata, trata-se de um método experimental para definir o teor de umidade, voláteis e carbono fixo que estejam presentes em uma biomassa. Ao caracterizar a biomassa pode-se obter informações referentes a cada um destes parâmetros: teor de umidade – propicia informações a respeito do poder calorífico,

voláteis – mostra qual a composição de certos elementos que combustionam fora do particulado na fase gasosa, carbono fixo – indica a quantidade da matéria que sofre a oxidação no interior do leito e as cinzas – são a parte descartável da biomassa, que não queima e trata diretamente da eficiência do combustível. (VIEIRA, 2012).

2.2. PIRÓLISE LENTA

A biomassa exerce um papel extremamente importante no setor energético, ambiental e socioeconômico. Podem ser encontradas como forma de resíduos urbanos, resíduos agroindustriais, da madeira propriamente dita, de culturas alimentícias, de qualquer tipo de planta, de animais, e até mesmo do processamento de alimentos. Percebe-se, portanto, que a matéria prima está em quase toda parte, o que poderia ser aproveitado corretamente, caso empregado para a geração de energia, tratando problemas de poluição visual, tratamento de resíduos sólidos urbanos, redução de combustíveis fósseis, diminuindo por consequência a degradação ambiental. (GUEDES et al., 2010).

Um dos processos pelo qual a biomassa passa, para a produção energética, chama-se pirólise. Este método, é dado pela degradação termoquímica da biomassa, aplicando-se calor a um material, com ausência de agentes oxidantes. O que a torna um processo endotérmico, que ocorre com a intervenção de energia externa. Os resultados deste processo podem variar no que tange ao estado físico, podendo ser sólido, líquido ou gasoso. (LORA et al, 2012).

Quando referido à fase sólida, os produtos são em essência, cinzas e carbono, geralmente utilizado para a produção de carvão ativado. Como em qualquer processo a geração de cinzas não é algo vantajoso. Na pirólise a quantidade de cinzas produzidas está associada diretamente à granulometria da biomassa, à temperatura do processo e também à taxa de aquecimento. Já na fase líquida gerada estão presentes os gases condensáveis, alcatrão e ácido pirolenhoso. Na parte gasosa, encontram-se os gases, H₂, CO, CO₂, CH₄, além de hidrocarbonetos leves. Por último a fração líquida é considerada os gases condensáveis, produto resultante do processo. (LORA et al, 2012).

A pirólise divide-se ainda em dois processos, a pirólise lenta, e a pirólise rápida. No primeiro caso o maior interesse, dá-se pela obtenção de carvão vegetal. E pelo

contrário do que se possa imaginar, essa técnica data de séculos passados, na qual a lenha era transformada em combustível com maior densidade energética. Na pirólise rápida, é demandada maior taxa de temperatura para a conversão da biomassa no produto final e a biomassa deve conter uma granulometria menor. O objetivo principal do uso desta técnica dá-se pela obtenção de líquidos pirolenhosos e gás de síntese. (NOGUEIRA; LORA, 2003).

O processo mais comumente utilizado, tratando-se de pirólise lenta ou torrefação, é realizado a baixas taxas de aquecimento ($^{\circ}\text{C/s}$) e elevados tempos de residência, visando aumentar o rendimento de carvão vegetal, por meio da diminuição de outros produtos, como o bio-óleo que consiste em um composto de alcatrões solúveis e insolúveis, ácido pirolenhoso, ácido acético, metanol e acetona. (LORA et al, 2012).

Já na pirólise rápida realiza-se o procedimento com elevada temperatura (550 a 650°C recomendável) e pequenos tempos de residência, obtendo-se como produtos principais, vapores e aerossóis, além de pequena quantidade de carvão vegetal. Em seguida a biomassa sofre um resfriamento, onde os gases condensáveis são convertidos em um líquido com o poder calorífico de aproximadamente 40% do encontrado para o óleo combustível. Em temperaturas superiores a 650°C , obtém-se maior rendimento de gás, o que se assemelha ao processo de gaseificação. (GOMÉZ, 2003).

No caso da gaseificação da biomassa, é possível apenas convertê-la em um gás combustível através da oxidação parcial a temperaturas elevadas, o que difere da pirólise que possibilita a obtenção de três frações: sólida, gasosa e líquida. Este gás pode ser levado a diversos usos, como a aplicação em máquinas térmicas tanto em Turbinas a Gás (TG), quanto em Motores de Combustão Interna. Este gás é chamado de gás de síntese e é considerado um gás pobre, que contém certa quantidade de combustíveis gasosos muito eficientes. (LORA et al, 2012).

2.3. RESÍDUOS DE PODAS DE ÁRVORES (RPA)

A arborização urbana é de extrema importância e traz consigo inúmeros benefícios, tais como: a ambientação natural, influenciando em um espaço visual agradável aos olhos, contribuição para redução do efeito 'ilhas de calor', que elevam

a temperatura urbana, sequestro de carbono, a melhoria da qualidade do ar, bem como abrigo para uma gama de espécie de animais. (PETRICOSKI, 2017).

O ambiente urbano não é um simples espaço, o qual não se pode apenas plantar desordenadamente árvores, arbustos e plantas rasteiras, esse ambiente exige uma condução orientada por profissionais capacitados. Ocorre que muitas vezes o município e também empresas do setor elétrico, não contam com um corpo técnico específico para tal área, resultando em práticas inadequadas no momento da realização de podas preventivas. Esta carência gera verdadeiras mutilações nas árvores e por decorrência disto, um grande agregado de resíduos. (VALE, 2016).

Esse excesso de resíduos provindo das podas de árvores urbanas, em sua maioria é descartado em lixões e/ou aterros sanitários, sem tratamento algum, onde ao entrar em contato com outros resíduos sólidos, acabam por perder valor, uma vez que se misturam com as mais variadas substâncias encontradas no mesmo local. As folhas que antes tinham uma função vital de melhoramento do ar, podem passar a ser grandes vilãs, impactando na qualidade do ar, do solo e também da água. Dessa forma, se tais resíduos não tiverem destinação adequada, podem ser causadores de muitos problemas ambientais, além de representar um enorme desperdício energético e/ou orgânico. (PETRICOSKI, 2017).

Ainda, Petricoski, (2017), os resíduos oriundos destas podas, podem ser utilizados de diversas formas, como por exemplo: para queima direta (Lenha ou Carvão Vegetal), para utilização em móveis e/ou artesanatos, fertilizante e para processo de Briquetagem ou Peletização. Em sua composição, segundo Baratta Júnior e Magalhães, (2010) cerca de 60% do volume total é compreendido por galhos e folhas que não tem serventia para queima direta ou para outros fins que não seja a produção de briquetes, peletes ou para decomposição visando a rota de fertilizantes.

A biomassa é um vetor energético, formado por matéria orgânica, de origem vegetal ou animal. A biomassa pode ser considerada uma fonte de energia limpa e renovável, já que sua energia provém de reações químicas entre CO₂, água e também com a irradiação solar. Esse processo é mais conhecido como fotossíntese. No caso das podas de arvores urbanas (biomassa vegetal), a transformação da energia armazenada dá-se por combustíveis líquidos, sólidos ou gasosos. Esta transformação tem a função de converter o material carbonáceo que apresenta baixa eficiência energética em combustível eficiente e com valor agregado. (PETRICOSKI, 2017).

Na cidade Foz do Iguaçu sob Latitude 25° 32' 49" S e Longitude 54° 35' 11" são realizados em média 60 cortes de árvores e 1200 podas por mês, como forma de prevenção, o que resulta em 198 toneladas de biomassa triturada. (MEIRA et al, 2012). O que significa um total de 2376 toneladas anuais de resíduos que frequentemente não são utilizados como fonte de energia. Isso ocorre, pois, estes restos apresentam baixa densidade, baixo poder calorífico e alto teor de umidade. Contudo, tais empecilhos podem ser convertidos em valor agregado se os mesmos forem densificados em briquetes. (FELFLI et al., 2011).

2.4. ERVA MATE

A *Ilex paraguariensis* St. Hil mais conhecida como Erva Mate, pertencente ao Gênero *Ilex* e à Família Aquifoliaceae, possui aproximadamente 600 espécies, dentre as quais 220 são oriundas da América do Sul. A Erva Mate está presente na cultura dos países mais ao sul do continente, como Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai, sendo responsável por um dos mais longos e produtivos ciclos econômicos de toda história paranaense, sendo em parte responsável pela Emancipação Política do Paraná frente a São Paulo. (FREITAS, 2011).

O ciclo econômico na época representa um raio de explorações e de renda à 480 municípios do Paraná, de Santa Catarina, do Rio Grande do Sul, de Mato Grosso do Sul e também de São Paulo, com uma área ocupada superior à 110 mil hectares, contando com cerca de 180 mil produtores que acabam gerando mais de 700 mil encargos diretos no setor. O extrativismo da Erva Mate, deteve números na casa de 346.953 toneladas em 2016 com 86,4% da produção sendo realizada no Paraná, seguido de Santa Catarina com 8,3% e Rio Grande do Sul com 3,5%. (IBGE, 2016).

O método mais usual do emprego da Erva Mate, se dá por meio de bebidas tradicionais, seja quente como o popular “Chimarrão” (Figura 2.3 a), consumido principalmente no Sul do Brasil, ou “Mate” no Uruguai e Argentina, ou ainda consumida fria, com o nome de “Tererê” (Figura 2.3 b), consumida principalmente no Centro-Oeste do Brasil e no Paraguai. (BRACESCO et al., 2011).

Figura 2.3 - Bebidas culturais com Erva Mate: a) Chimarrão, b) Tererê.



a)

b)

Fonte: O Autor, 2021.

Com tamanha produtividade, existe uma grande quantidade de resíduos após o preparo, independentemente, se o uso for para o preparo de Chimarrão, ou para o Tererê. Estes resíduos são em grande totalidade descartados juntamente ao lixo doméstico e levados à aterros sanitários e/ou à lixões, sem qualquer tipo de manipulação e cuidados. Dessa forma, se verifica que existe uma necessidade de tratamento dos mesmos, que podem vir a ser utilizados com finalidades energéticas.

2.5. BRIQUETE

A lenha ecológica mais conhecida como Briquete é um bioproduto de qualquer biomassa. É considerado um biocombustível sólido de alta densidade energética, já que é uma fonte concentrada e comprimida de certa biomassa. Este, consegue suprir com eficiência o carvão vegetal e mineral, o gás, a lenha, além de outros combustíveis. O principal ponto a favor do briquete, dá-se pelo fato da sua produção ser possível a partir de qualquer resíduo vegetal, tais como: bagaço de cana, casca de arroz, palha de milho, grama, folhas, papel, papelão, serragem, galhos, casca e borra de café entre outros. (ROCHA, 2014).

As aplicações deste bioproduto são as mais diversas possíveis e está quase sempre atrelado a substituir a lenha, tanto em processos industriais, quanto no uso doméstico e comercial. Seu uso no Brasil ainda não possui destaque no mercado,

porém nas principais cidades e centros comerciais é possível vê-lo em proporções consideráveis. Os principais ramos do mercado onde utiliza-se esta lenha ecológica, está atrelado à fábricas de alimentos, indústrias químicas, laticínios, hotéis, olarias, cerâmicas, pizzarias, entre outros. (ROCHA, 2014). Na Tabela 2.1 é apresentada informações referentes às propriedades destes biocombustíveis, tais como características físicas, PCS e teor de umidade.

Tabela 2.1 - Características dos Briquetes.

DIÂMETRO (mm)	PCS (MJ/Kg)	UMIDADE (%)	CINZAS
60 - 80	16,92 – 17,64	7 – 12	Varia para cada biomassa

Fonte: Adaptado de (ROCHA, 2014).

O processo para a fabricação do briquete é a briquetagem, que consiste basicamente na trituração e compactação sob alta pressão, dos resíduos da biomassa. Este processo envolve alta geração de calor, chegando em temperaturas na redondeza dos 100 °C, ocasionado pela própria compactação dos agregados. Esse aumento de temperatura é essencial para o processo, uma vez que causa a plastificação da lignina presente na biomassa. (QUIRINO, 2004). Na Tabela 2.2 e na Figura 2.4 são apresentadas as principais vantagens do uso de briquetes e a relação das dimensões de armazenamento com outros combustíveis, respectivamente.

Figura 2.4 - Relação de dimensão de armazenamento de combustíveis.



Fonte: (LIPPEL, 2019).

Tabela 2.2 - Vantagens do uso de briquetes.

VANTAGENS AMBIENTAIS	VANTAGENS ECONÔMICAS
É totalmente liberado pelo IBAMA;	Alto valor agregado;
Dispensa guia e reposição florestal junto ao órgão fiscalizador;	Pronto para a queima;
Carbono neutro (Carbon free);	Alto poder Calorífico;
Energia limpa, possui menor índice de poluição comparado aos outros combustíveis;	Fácil manuseio, armazenamento e transporte;
Fonte renovável de energia.	Melhor custo/benefício.

Fonte: (BRAND, 2010).

2.6. PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NA PRODUÇÃO DE BRIQUETES

Os resíduos sólidos de uma determinada biomassa, ao serem compactados sofrem influência direta do teor de umidade que a amostra apresenta, do tamanho das partículas, da pressão e também da temperatura pelo qual o processo de briquetagem venha a ser realizado. Podendo ainda apresentar a adição de um agente aglutinante.

2.6.1. TEOR DE UMIDADE

Segundo Petricoski, (2017) para que ocorra a queima do briquete o teor de umidade deve estar entre 15 e 20%. Esses valores podem reduzir o calor da combustão, acima de 15% da umidade pode ocorrer a quebra do briquete ou a degradação biológica, durante transporte e armazenamento, baixos teores de água como <5% podem resultar em perda de material bem como a quebra do mesmo. O excesso de umidade em combustíveis sólidos, pode resultar em explosões devido a formação de bolhas de vapor, a secagem pode ser um fator importante para evitar a degradação por conta de ações climáticas, quanto menor for o teor de umidade maior será a produção de calor.

A presença de água diminui o poder calorífico da biomassa e do biocombustível, pois parte da energia liberada é gasta na vaporização da água e se o

teor de umidade for muito variável, pode dificultar o processo de combustão, havendo necessidade de constantes ajustes no sistema (PETRICOSKI, 2017). Petricoski, (2017) afirma que a proporção de água ideal para as biomassas, tem de ser entre 5 e 10% resultando em um produto durável do que briquetes compactados com proporção de 15%. Vale ressaltar que para a queima da madeira o teor de água não pode ser superior a 20% pois reduz o calor da combustão.

2.6.2. GRANULOMETRIA

Nos resíduos de podas de arvores existem tamanhos de partículas muito variados. A densidade dos briquetes produzidos é diretamente proporcional ao tamanho destas partículas, ou seja, quanto menor for os particulados, maior será a densidade do briquete gerado. Entretanto, se não houver particulados maiores no produto final, pode haver uma certa dificuldade durante a queima dos briquetes. Isso se deve pela inexistência de caminhos para a difusão de calor. Portanto para o caso de briquetes com alta densidade, o tempo de queima é maior e com uma taxa de combustão menor. (DIAS et al; 2012).

A determinação do tamanho destas partículas se dá pelo ensaio de granulometria, que consiste na determinação da percentagem em peso para um determinado tamanho de partículas, que é referido à massa total da amostra a ser utilizada. Para a fabricação de briquetes a amostra ideal a ser utilizada deve conter diferentes granulometrias. Uma amostra com tamanhos pequenos resultará em briquetes com densidade energética elevada, mas para que o produto seja suficientemente rígido com laços fortes entre as partículas, sem que haja a injeção de um agente aglutinante, o processo de briquetagem deve ser realizado com pressões e temperaturas muito elevadas. (ERIKSSON; PRIOR, 1990).

Kaliyan e Morey, (2009) enunciam que o tamanho das partículas age diretamente na resistência e também no tempo de vida útil dos briquetes. Dessa forma, é fundamental que a análise granulométrica da biomassa seja realizada antes do processo de briquetagem.

2.6.3. PRESSÃO E TEMPERATURA

O processo de briquetagem está atrelado diretamente com a compactação da biomassa, a qual é feita quando submetida à altas pressões. Quando levada ao processo de pressões intensas, os ligantes naturais da biomassa começam a sair do estado estático (dentro das células vegetais) e passam agir como aglutinantes no meio do processo. Dessa forma, biomassas lignocelulósicas e amiláceas apresentam bons resultados quando submetidas a este processo. (PETRICOSKI, 2017).

Visto que a pressão é crucial para a fabricação dos briquetes, o ensaio pode ser realizado de forma simples, com um conjunto pistão-cilindro ou êmbolo-molde, acionados por uma prensa hidráulica. Como esta prática leva à obtenção de produtos com densificações elevadas e com alta durabilidade, verifica-se que a mesma aliada ao controle de temperatura, pode trazer resultados significativos para produção de briquetes em pequena escala.

No processo de briquetagem, ao submeter a amostra a r uma pressão considerável, obtêm-se um aumento natural na temperatura da biomassa. Contudo, em certos casos esse pequeno aumento não tem efeitos significativos. Quando a biomassa é submetida a temperaturas acima de 100°C, além de uma perda de umidade, a lignina presente nas suas células, começa a ter sua estrutura corrompida, passando por um processo de plasticização, atuando como agente ligante natural (VILAS BOAS, 2011). A influência da temperatura na briquetagem, age diretamente nas propriedades dos produtos resultantes, bem como no consumo energético durante o processo de compactação. De acordo com DIAS et al., (2012) com a utilização de temperaturas controladas, existe a redução final do tamanho dos briquetes, se comparado com a mesma amostra submetida ao mesmo processo, sem a aplicação de temperatura elevada até 220°C.

2.6.4. AGENTE AGLUTINANTE

A produção de briquetes nem sempre é possível apenas pelo processo de compactação, à exemplo de briquetes onde o derivado provém de finos de carvão. Neste caso específico, onde a compactação não é suficiente para garantir que os briquetes tenham resistência suficiente para suportar seu transporte e

armazenamento, faz-se o uso de aglutinantes, para promover a agregação dos particulados da amostra. Em síntese, se não houver a adição de um agente aglutinante, o briquete terá suas características físicas e estruturais corrompidas. (QUIRINO, 2004).

Para tanto, a escolha deste agente de ligação, deve ser tal que, mantenha todas as características primitivas do briquete, não prejudicando o seu rendimento calorífico, nem aumentando voláteis e cinzas e principalmente, não emitindo poluentes no momento da queima do briquete. Ainda, vale ressaltar que tais aglutinantes são escolhidos verificando a disponibilidade do mesmo na região e o custo nele empregado. (FONTES et al. 1984).

Dessa forma, a busca por aglutinantes adequados à biomassa utilizada, tem se tornado um campo de pesquisa de grande importância. Existem mais de 50 tipos de ligantes orgânicos e inorgânicos como menciona Dias et al., (2012) os quais são comumente utilizados no Brasil para a densificação de biomassa.

Como visto a priori, nem sempre a briquetagem é possível por meio apenas da compactação, mas não é via de regra, uma vez que certos produtos que possuam em sua composição elementos como: lignina, proteínas, amido, gorduras e carboidratos solúveis, os quais são ligantes naturais, podem dispensar a adição de outros “adesivos” artificiais. (DIAS et al., 2012).

2.7. PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DOS BRIQUETES

Todo resíduo de origem vegetal pode ser compactado, desde que atenda às necessidades do teor de umidade e da granulometria exigido pelo processo de briquetagem. (QUIRINO, 2004).

Os biocombustíveis sólidos apresentam características variáveis que dependem diretamente da matéria-prima utilizada. Estes possuem características físicas e energéticas como, poder calorífico, resistência mecânica e densidade energética, que são determinantes para a validação e determinação da qualidade do biocombustível referido.

2.7.1. PODER CALORÍFICO

Define-se o poder calorífico como a quantidade de energia liberada pela combustão completa de uma unidade de massa ou volume de gás a pressão e

temperatura constantes, 101,33 kPa (1.013,25 mbar ou 760 mmHg) e 15°C. (ANEEL, 2008). No Sistema Internacional (SI) sua unidade é em joules por grama ou quilojoules por quilograma, podendo ainda, ser apresentado em calorias por grama ou quilocalorias por quilograma. (BRIANE; DOAT, 1985).

Segundo (BRIANE; DOAT 1985), o poder calorífico pode ser classificado em superior e inferior. O Poder Calorífico Superior-PCS refere-se à quando, em uma combustão sob volume constante, a água da reação seja condensada e o calor envolvido nesse processo é recuperado ao fim do processo. Portanto, o Poder Calorífico Inferior-PCI é necessariamente a energia útil do combustível por unidade de massa do mesmo, após a retirada das perdas por evaporação.

Para fins de comparação, na tabela 2.3 são apresentados valores característicos do PCS e PCI de alguns dos combustíveis mais utilizados atualmente, nos mais variados ramos de aplicação.

Tabela 2.3 - Valores característicos de PCS e PCI.

Combustível	PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)
Alcatrão	9.000	8.550
Álcool Etílico Anidro	7.090	6.750
Biodiesel	9.345	9.000
Carvão Vegetal	6.800	6.460
Carvão Metalúrgico Nacional	6.800	6.420
Gasolina Automotiva	11.220	10.400
Lenha Comercial	3.300	3.100
Óleo Diesel	10.750	10.100

Fonte: Adaptado de EPE, 2020.

Segundo (PARIKH, CHANNIWALA e GHOSAL, 2005), uma forma de se calcular o PCS de combustíveis sólidos de diversas biomassas carbonáceas com erro absoluto de 3,74%, dá-se pela Equação 5.

$$PCS = 84,5104 \times (\%CF) + 37,2601 \times (\%Tv) - 1,8642 \times (\%Tz) \quad (\text{Eq.5})$$

Onde:

PCS - Poder Calorífico Superior (KJ Kg⁻¹);

CF - Teor de Carbono Fixo;

Tv – Teor de Materiais Voláteis;

Tz – Teor de Cinzas.

Ainda, (PARIKH, CHANNIWALA e GHOSAL, 2005) trata o cálculo do PCS sendo a subtração do calor latente da vaporização da água, conforme a Equação 6 para obtenção do Poder Calorífico Inferior e pela Equação 7 para obtenção do Poder Calorífico Útil.

$$PCI = PCS - (600 \times 0,09 \times H) \quad (\text{Eq. 6})$$

A quantidade de calor liberado pela queima, onde a água oriunda da queima esteja no estado gasoso, é chamado de Poder Calorífico Útil, considerando-se, portanto, o desconto de energia necessária para evaporar a água referente à umidade da madeira.

$$PCU = (PCI \times (1 - (0,01 \times TU))) - (600 \times 0,01 \times TU) \quad (\text{Eq.7})$$

Onde:

PCI - Poder Calorífico Inferior (KJ Kg^{-1});

PCU – Poder Calorífico Útil (KJ Kg^{-1});

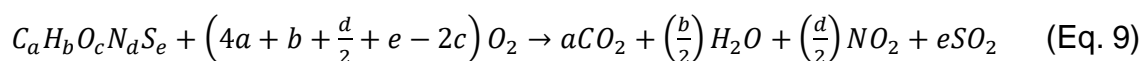
H - Teor de hidrogênio do combustível considerado 5,99 %;

TU - Teor de Umidade do combustível.

Para obter-se o poder calorífico de forma experimental, é comumente utilizado uma bomba calorimétrica, seguindo a norma ASTM D 4.809, que possibilita a determinação da quantidade de calor liberada na combustão. No calorímetro ocorrem trocas de temperatura que permitem um equacionamento relacionando as trocas entre o Calorímetro-C, os Reagentes-R e os Produtos-P, junto das temperaturas iniciais e finais T_1 e T_2 respectivamente.

$$CT1 + RT2 \Rightarrow CT2 + PT2 \quad (\text{Eq. 8})$$

É de notório saber, que na combustão de qualquer substância, tem-se reações secundárias. A exemplo, na Equação 9 está a reação principal de um combustível qualquer e em sequência, estão representadas nas Equações 10 e 11, tais reações secundárias, no qual todas estas reações são de origem exotérmicas, ou seja, existe a liberação de calor.



O cálculo do Poder Calorífico, deve, portanto, desconsiderar as reações secundárias. A Equação 12 representa a equação utilizada na determinação do poder calorífico (PC) em calorímetros adiabáticos.

$$PC = (W \cdot \Delta t - e1 - e2)/m \quad (\text{Eq. 12})$$

Onde:

W - coeficiente calorimétrico do calorímetro utilizado ($\text{cal } ^\circ\text{C}^{-1}$);

e1 e2 - calor liberado por reações secundárias;

Δt - variação de temperatura do calorímetro ($^\circ\text{C}$);

m - massa de amostra utilizada.

2.7.2. RESISTÊNCIA MECÂNICA

Um fator relacionado à qualidade de briquetes, refere-se ao grau de resistência caracterizada ao uso e estocagem dos mesmos. Desse modo Quirino & Brito (1991), tratam alguns testes mais comumente utilizados para a avaliação de qualidade, onde a resistência à compressão, estabelece a capacidade de empilhamento na estocagem dos briquetes. Alinhado ao procedimento de compressão, o índice de quebra e abrasão, que trata da resistência à abrasão provocada durante o transporte e o manuseio dos briquetes, pode ser obtido através do ensaio de tamboramento.

O ensaio de compressão, traz consigo, bons resultados quando se pretende prever o comportamento mecânico dos briquetes no uso comercial, passando pelos processos de embalagem, transporte e estocagem, já que durante tais processos, existe uma gama de esforços aos quais são submetidos. Este teste, consiste em aplicação de pressão gradual até que o briquete sofra fraturas em sua estrutura. (RAMOS E PAULA, 2010).

A determinação da Carga Máxima de Quebra - CMQ tanto longitudinal, quanto diametral, são imprescindíveis para a caracterização da resistência mecânica dos briquetes, já que no transporte e armazenamento tais esforços estarão presentes desde o momento em que os briquetes são produzidos até o momento da queima dos mesmos. Ainda, PETRICOSKI (2017), expõe que a maior taxa de resistência em briquetes, deve ser de forma diametral, uma vez que maiores quantidades de rupturas são apresentadas nesta região nos processos de transporte e estocagem.

Desta forma a resistência mecânica relacionada aos briquetes é de extrema importância para fatores qualitativos, principalmente para fins comerciais, sejam domésticos ou industriais.

2.7.3. DENSIDADE ENERGÉTICA

A densidade é um parâmetro importante para a avaliação da qualidade dos briquetes. Ou seja, fatores qualitativos como alta densidade, baixa umidade e forma adequada se dão pela densificação da matéria prima. Ainda, para determinar a densidade existem muitos métodos, entre eles o método do deslocamento dos líquidos baseado no princípio de Arquimedes, que não é recomendado devido a característica higroscópica dos materiais. Também, o chamado método estereométrico de determinação de densidade, baseado na medição das dimensões (diâmetro e altura) do briquete com o auxílio de um paquímetro digital, ou seja, é medido o volume do cilindro. (PETRICOSKI, 2017).

Ainda para a autora, além dos métodos de determinação da densidade, existem dois tipos de densidade aparente: a densidade de um briquete ou pelete único e a densidade de um aglomerado de briquetes ou peletes, também chamada densidade a granel. A primeira é importante no controle de qualidade do produto e depende da densidade do resíduo lignocelulósico, da pressão de briquetagem e do tempo e temperatura de processamento. Já a segunda é relevante para transporte, armazenamento e venda dos briquetes e dos peletes e depende da forma da embalagem e empilhamento (PETRICOSKI, 2017).

Dessa forma, para se atingir maior quantidade de energia por unidade de volume, se faz necessário uma alta densidade energética, que pode ser obtida através da briquetagem, pois aumenta a densidade energética da biomassa. No mesmo estudo realizado pela autora, são indicados dados em que a densidade aparente dos briquetes varia entre 500 e 1200 kg/m³, e a dos peletes vai de 500 a 750 kg/m³, dificilmente excedendo 500 kg/m³, sendo maior que a densidade a granel da biomassa bruta não adensada. Além disso, um fator a se observar é a densidade e a umidade dos briquetes, que se aumentados prejudicam o processo de combustão devido a diminuição da ignitabilidade. No caso da madeira, sua resistência mecânica e valor energético estão intimamente ligados a sua densidade. Dessa forma, segundo Petricoski (2017), a celulose é um fator determinante para estabelecer maiores

desempenhos, ou seja, quanto maior for a quantidade de celulose maior sua resistência mecânica e seu valor energético e, conseqüentemente, maior a densidade da madeira. Desta forma, a densidade da biomassa utilizada para a fabricação dos briquetes é de extrema importância para a eficiência da densidade energética desses materiais.

CAPÍTULO III

3. METODOLOGIA

3.1. COLETA E SECAGEM DA AMOSTRA

O indevido descarte de RPA e também de erva mate, leva a uma problemática que persiste nos dias atuais e degrada o meio ambiente. É sabido que, em geral esses resíduos são descartados sem devido cuidado e preparo correto. Desta forma, verificando a necessidade de uma solução para tal problema, tem-se o emprego destes resíduos com fins energéticos, tornando aquilo que anteriormente seria descartado sem valor agregado um produto economicamente e ambientalmente viável. A origem dos RPA se dá pelo manejo necessário e preventivo durante todos os meses na cidade e é realizado conforme visto na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Serviço de trituração de podas de árvores da cidade de Foz do Iguaçu.



Fonte: (MEIRA et al, 2012).

O trabalho aqui exposto, possui caráter qualitativo, onde analisou-se a viabilidade do aproveitamento energético de resíduos de RPA e de Erva Mate, por meio da produção de briquetes. Para tanto, o referencial teórico alinhou-se com pesquisas que seguem a mesma linha científica. Dessa forma, foi coletada uma amostra de 5 kg de RPA no Município de Foz do Iguaçu, localizado na região oeste

do Estado do Paraná, com Latitude 25° 32' 49" Sul, Longitude: 54° 35' 18" Oeste e cuja altitude, encontra-se em 174 m.

Também foram coletados 3 kg de resíduo de Erva Mate, utilizada no preparo de chimarrão, obtida durante uma semana no uso interno da empresa Solar Oeste Engenharia na cidade de Medianeira. As amostras de RPA e de Erva Mate foram destinadas para secagem em uma estufa, marca LUCADEMA modelo LUCA-80/480, sob temperatura de 110°C durante 24 horas, conforme visto na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Amostras em processo de secagem em estufa LUCA-80/480.

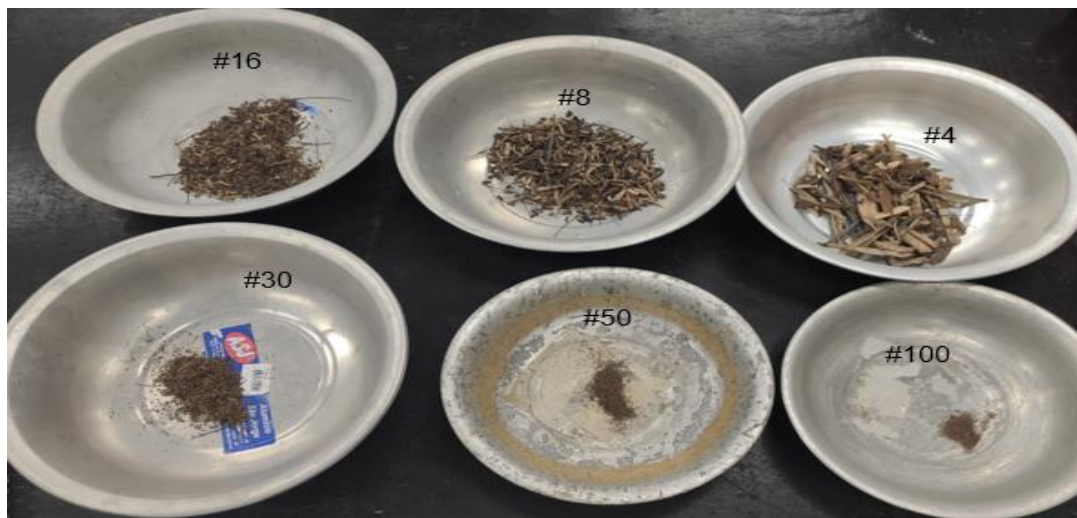


Fonte: O Autor, 2021.

3.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA BIOMASSA

3.2.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A amostra total de RPA, coletada no horto municipal, foi submetida a peneiras de malha, onde o material foi classificado em seis parâmetros (#4, #8, #16, #30, #50 e #100 mesh). Para a caracterização da distribuição granulométrica dos resíduos, foram utilizados 100 g da amostra total. Este montante foi agitado por 10 minutos e a massa retida em cada peneira pode ser visualizada na Figura 3.3. O material utilizado para determinar a análise imediata foi uma junção das frações retidas nas peneiras de 100, 50 e 30 mesh, uma vez que tal parâmetro encontra-se dentro de 35-60 mesh, que é determinado pela Norma Brasileira Regulamentadora (NBR) 6923 (ABNT, 1981).

Figura 3.3 - Massa de RPA retida nas peneiras.

Fonte: O autor, 2021.

3.2.2. TEOR DE UMIDADE

O teor de umidade das amostras de RPA e de Erva Mate foi determinado segundo a norma ASTM D3173-85. Onde, em um cadinho fora posto uma massa de 1 g da amostra, o peso do cadinho é pré-fixado a uma temperatura de 105 °C. Em sequência, o cadinho com a amostra é posto para aquecimento em estufa sob temperatura de 105 °C durante o período de uma hora. Em seguida o cadinho é levado à um dessecador por 15 minutos e então pesado. Assim, os teores de umidade (em base seca) das amostras foram calculados de acordo com a Equação 13:

$$Tu = \frac{m_1 - m_2}{m_1} * 100\% \quad (\text{Eq.13})$$

Onde:

Tu : Teor de umidade da biomassa (%);

m_1 : Massa inicial da biomassa (g);

m_2 : Massa final da biomassa (g).

3.2.3. TEOR DE VOLÁTEIS

Para determinar o teor de voláteis, foram utilizadas as amostras secas in natura dos materiais alternativos utilizadas na determinação do teor de umidade, que foram introduzidos em Forno Mufla modelo Ni 1384, aquecido até 850°C, mantida enfiada

por sete minutos, conforme determinação da norma ASTM E 870-82. Após este procedimento, as amostras foram acondicionadas em dessecador para resfriamento e pesagem. O teor de voláteis foi determinado pela Equação 14:

$$Tv = \frac{m_2 - m_3}{m_2} * 100\% \quad (\text{Eq.14})$$

Onde:

Tv : Teor de voláteis (%);

m_2 : Amostra seca (g);

m_3 : Amostra final, após exposição na mufla (g).

3.2.4. TEOR DE CINZAS

O material utilizado na determinação do teor de voláteis foi novamente levado ao Forno a uma temperatura de 750°C até atingir massa constante, conforme a ASTM E 870-82 (ASTM, 2006). Ao final, restaram somente cinzas dentro do cadinho, resultantes da combustão dos componentes orgânicos e oxidação dos inorgânicos. O teor de cinzas foi calculado por meio da Equação 15:

$$Tz = \frac{m_3 - m_4}{m_2} * 100\% \quad (\text{Eq.15})$$

Onde:

Tz : Teor de cinzas (%);

m_2 : Massa seca da amostra (g);

m_4 : Massa do resíduo após calcinação (g).

3.2.5. TEOR DE CARBONO FIXO

O teor de carbono fixo (Tcf) é determinado pela diferença entre os valores do teor de voláteis e teor de cinzas por meio da Equação 16:

$$Tcf = 100\% - (Tv + Tz) \quad (\text{Eq.16})$$

Onde:

Tcf : Teor de carbono fixo (%);

Tv : Teor de voláteis (%);

Tz: Teor de cinzas (%).

3.3. PROCESSO DE BRIQUETAGEM

Após a secagem e peneiramento da amostra de RPA, foram selecionadas as partículas retidas nas peneiras de 100, 50 30 e 16 *mesh*, uma vez que estas apresentaram aspectos semelhantes à amostra de Erva Mate. Assim, verifica-se uma homogeneidade nas amostras tanto de RPA quanto de Erva Mate. Além disso, em testes preliminares, as partículas com granulometria entre 8 e 4 *mesh*, não apresentaram aspectos desejados, sofrendo impacto considerável ao toque sendo, portanto, descartadas por não haver a disponibilidade de um triturador de facas para o aproveitamento completo do material coletado.

Desta forma, para a produção dos briquetes, utilizou-se as amostras de RPA e de Erva Mate nas proporções propostas no planejamento experimental o qual encontra-se na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Plano de ensaios de briquetes com respeito à massa das amostras.

ENSAIO	Amostra de RPA (g)	Amostra de Erva Mate (g)
E1	50	-
E2	25	25
E3	-	50

Fonte: O Autor, 2021.

As amostras de RPA, utilizadas para a compactação, foram misturas de forma manual. Para a compactação, foi necessário a fabricação de um cilindro uniforme em aço, capaz de resistir à alta pressão. Além de um pistão, também em aço, com diâmetro suficientemente idêntico ao diâmetro interno do cilindro, para que o mesmo se desloque sem atrito, mas que não deixa resíduos passarem ou voltarem acima do mesmo. Ainda, foram confeccionadas peças em aço para auxílio no desenforme dos briquetes compactados. A então briquetadeira, pode ser vista na Figura 3.4.

Figura 3.4 - Briquetadeira utilizada para compactação das amostras de RPA e de Erva Mate.



Fonte: O Autor, 2021.

A cada processo de briquetagem, pesou-se em um béquer, 50g de amostra independente se fosse de RPA ou de Erva Mate. Em sequência foi posto o conteúdo do béquer no cilindro (Figura 3.5 a), o pistão foi colocado na sequência. Para a introdução de pressão, utilizou-se uma prensa hidráulica, marca BOVENAU, com limite de 15 toneladas. A montagem do arranjo final, pode ser visto na Figura 3.5 b.

Figura 3.5 - a) Conteúdo de RPA colocado no cilindro, antes da compactação; **b)** Arranjo final da prensa e briquetadeira durante a briquetagem.



a)

b)

Fonte: O Autor, 2021.

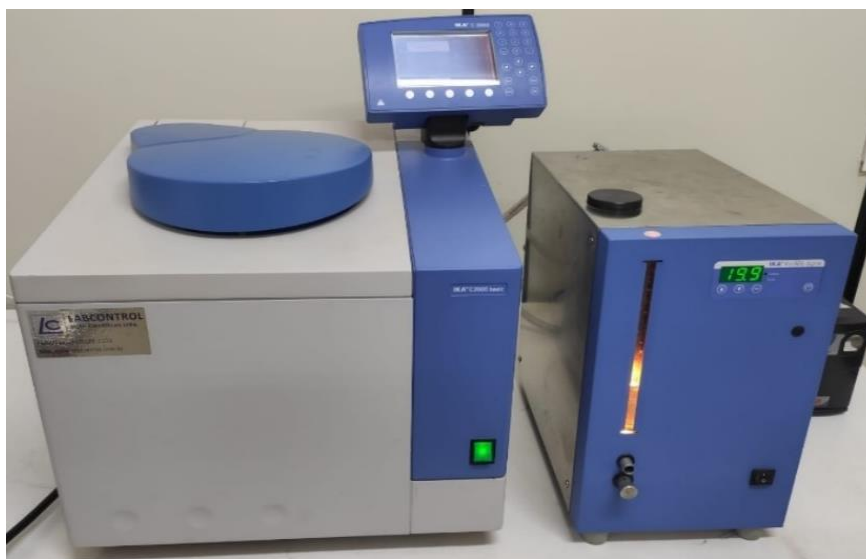
3.4. PODER CALORÍFICO DOS BRIQUETES

Após a compactação das amostras, os produtos formados nos ensaios E1, E2 e E3, foram submetidos a análise para a determinação do poder calorífico superior. Desse modo, tendo em base a norma técnica ABNT - NBR 8633/84, os briquetes

produzidos foram levados ao Laboratório de Análises Térmicas, espectrometria, materiais e combustíveis (LATECOM) da UTFPR, campus de Medianeira-PR. Para tanto foi utilizado um Calorímetro de modelo IKA C2000 acoplado a um refrigerador IKA KV 600 (Figura 3.6) em unidade de J/g.

O calorímetro utilizado, fornece diretamente os valores para o PCS, no entanto, faz-se necessário a utilização das Equações (6) e (7), para a obtenção do PCI e do PCU. Para tanto, o teor de Hidrogênio utilizado será de aproximadamente 6%, uma vez que o mesmo não varia consideravelmente para biomassas providas de madeiras, independentemente da espécie. (BRITO E BARRICHELO 1981).

Figura 3.6 - Calorímetro utilizado para a obtenção do PCS das amostras de RPA e Erva Mate.



Fonte: O Autor, 2021.

3.5. ANÁLISE DA DENSIDADE ENERGÉTICA

Assim como Petricoski (2017), a densidade aparente dos ensaios realizados, foi obtida considerando o volume do formato cilíndrico dos briquetes e sua massa mensurada com uma balança digital de marca, BIOSCALE e modelo, FA-2204-BI com capacidade de 220g e mínimo 0,1mg. Para tanto, foi medido o diâmetro e a altura, utilizando um paquímetro digital de marca, MARBERG com capacidade de medição de 300 mm e erro de $\pm 0,03$ mm. Mostra-se na Figura 3.7 os equipamentos utilizados.

Para a obtenção da densidade aparente, utilizou-se a Equação 1. No que diz respeito à densidade energética dos briquetes, calculou-se por meio da multiplicação da densidade aparente , pelo poder calorífico superior. (PETRICOSKI, 2017).

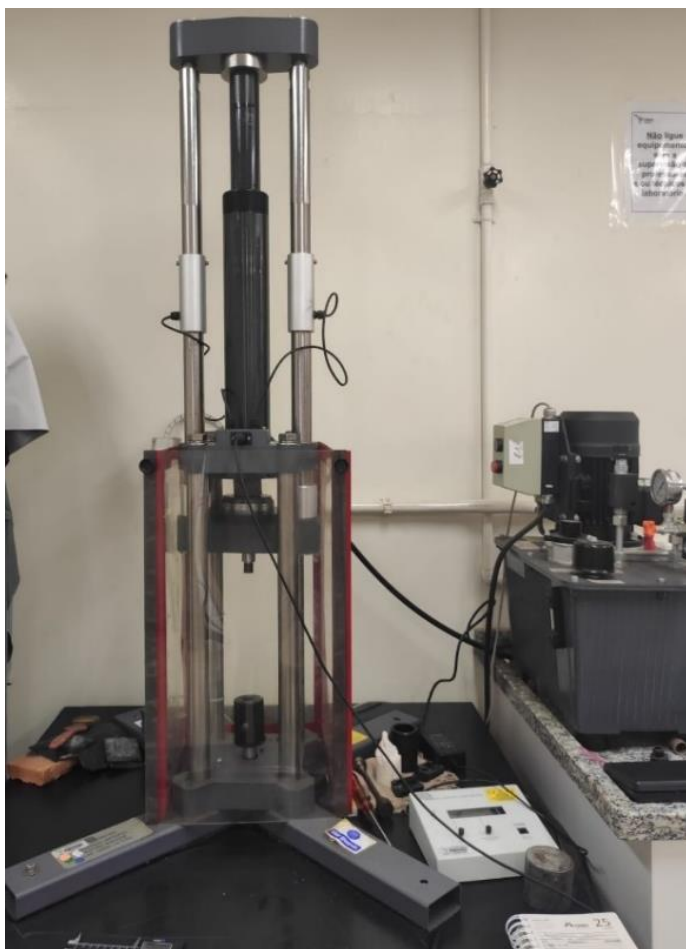
Figura 3.7 - Equipamentos utilizados para obtenção da densidade aparente dos briquetes de RPA e de Erva Mate.



Fonte: O Autor, 2021.

3.6. RESISTÊNCIA MECÂNICA

A resistência mecânica dos briquetes foi avaliada com teste de compressão, que consiste em uma carga ser aplicada no corpo de prova até que o mesmo seja rompido. Sendo, portanto, uma forma de avaliar a quanto esforço o briquete pode ser submetido durante o transporte e armazenamento. Desse modo, para a avaliação da carga máxima dos briquetes, foi utilizado uma prensa hidráulica semiautomática, marca, TECQUIPMENT e modelo, SM1000, cuja capacidade é de 100KN (10 Toneladas) (Figura 3.8).

Figura 3.8 - Avaliação da resistência dos briquetes produzidos.

Fonte: O Autor, 2021.

O ponto de ruptura, mostrado na Figura 3.9, dos briquetes foi adotado como sendo a pressão na qual os agregados começaram a se soltar do corpo de prova. O ensaio foi realizado, inserindo pressão de forma constante até o momento de ruptura.

Figura 3.9 - Ponto de Ruptura dos briquetes produzidos.

Fonte: O Autor, 2021.

3.7. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

A análise estatística dos dados está em detrimento da obtenção do teor de umidade, do teor de materiais voláteis, cinzas e de carbono fixo, das amostras de RPA e erva-mate dos ensaios E1, E2 e E3 do PCS dos briquetes produzidos nos ensaios acima citados, bem como da resistência mecânica e da densidade energética. Todos os testes foram feitos em triplicata, excetuando-se a obtenção da densidade energética que foi realizada em sete briquetes produzidos para cada ensaio.

Foi realizada a estatística descritiva para verificação da variância e por consequência do desvio padrão dos dados obtidos, estes estão apresentados nas tabelas subsequentes. Os dados dos ensaios estão apresentados no formato de Tabela extraída do Excel, apresentados no Apêndice ao final do Trabalho.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. GRANULOMETRIA

Após a coleta das amostras, as mesmas foram secas e passaram pelo processo de peneiramento. A análise granulométrica realizada é de extrema importância, na Tabela 4.1 verifica-se a distribuição dos grãos (em porcentagem) da amostra coletada, tanto de RPA, quanto de Erva Mate.

Tabela 4.1 - Distribuição granulométrica em porcentagem.

Amostra	Mesh						
	#4	#8	#16	#30	#50	#100	Fundo
RPA	51,95	30,3	12,45	3,2	1,6	0,14	0,36
Erva Mate	-	5,27	47,40	32,19	9,5	4,78	0,86

Fonte: O Autor, 2021.

Conforme visto na Tabela acima, a maior concentração de grãos de RPA estão compreendidas entre #4 e #8 Mesh. Testes preliminares com uma mistura total da biomassa, não apresentaram resultados consistentes, uma vez que as partículas na faixa mencionada são muito grandes, e acabam dificultando o processo da briquetagem sendo, portanto, descartadas.

A, biomassa, Erva Mate apresentou resultados significativos, já que existe uma distribuição considerável entre as partículas. Como pode ser visto na Tabela 4.1, a maior quantidade de grãos retidos está na faixa de #16 e #30 Mesh, também se verifica que não houve retenção na peneira de #4 Mesh. Com as devidas granulometrias pré-selecionadas, pode-se manipular uma homogeneidade entre os dois diferentes resíduos e portanto, realizar comparações no que tange às características físicas dos briquetes produzidos.

4.2. TEOR DE UMIDADE

Amostras tanto de RPA, quanto de Erva Mate foram separadas antes do processo de briquetagem e após a secagem e mistura das mesmas. Estas amostras

foram levadas ao Laboratório SiCaMat (Síntese e Caracterização de Materiais) da UNILA, campus PTI, para determinação do teor de umidade. Os ensaios foram realizados em triplicata. Assim, verifica-se na Tabela 4.2, os valores médios e o desvio padrão da umidade presente nas amostras pré-preparadas.

Tabela 4.2 - Teor de Umidade das amostras de RPA e Erva Mate.

Amostra	Teor de Umidade (%)	Desvio Padrão
RPA	11,67	0,2437
RPA + Erva Mate	10,51	0,3064
Erva Mate	9,994	0,1232

Fonte: O Autor, 2021.

A literatura sugere que o teor de umidade das amostras antes de serem submetidas ao processo de briquetagem, esteja na faixa de 10 a 15%, uma vez que se a biomassa estiver muito seca, acaba não sendo gerados briquetes estáveis, sendo facilmente desfeitos com o passar do tempo, tornando inviável todo o processo de armazenamento e transporte. (Dias et al; 2012). Existem, no entanto, contradições na literatura, uma vez que de acordo com Carvalho e Brink (2004), o teor de umidade deve estar compreendido entre 8 e 15%, para que haja aglomeração das partículas. Como não se utilizou nenhum agente aglutinante, não existe uma influência externa no teor de umidade, já que vários destes ligantes possuem propriedades que facilitam e/ou propiciam à absorção de água. Sendo, portanto, apenas a umidade das amostras levadas em consideração neste caso.

Verifica-se ainda, que o teor de umidade da amostra de RPA, é ligeiramente maior que a umidade presente na amostra de Erva Mate com 11,67% e 9,994% respectivamente. Este resultado influi diretamente na blenda das duas amostras, onde o teor de umidade referente à mesma foi de 10,51%. Os testes realizados em triplicata, não se distanciaram muito da média para ambas as amostras. Ainda, vale ressaltar que tais testes estão dentro das faixas estipuladas pelas literaturas mencionadas anteriormente.

Ponte et al (2019), obtiveram resultados diversificados para podas de cajueiro, mangueira e para bagaço de cana-de-açúcar, sendo 23,40%, 10,60% e 14,00% respectivamente. No trabalho desenvolvido por Menezes (2013) a umidade média

obtida de resíduos de maravalha esteve entre 11,34% e 11,30%, sendo consideradas amostras de *A. angustifolia* e de *Pinus sp.*, respectivamente. Já Oshiro (2016), obteve valores entre 12,64% para resíduos agroflorestais e 18,14% para maravalha.

4.3. ANÁLISE IMEDIATA

Trabalhando em base seca e seguindo o cronograma de ensaios, obteve-se os valores referentes à análise imediata das amostras dos resíduos, também realizado em triplicata. Os resultados estão expressos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Análise Imediata das amostras de RPA e Erva Mate.

Amostra	Teor de Voláteis (%)	Teor de Cinzas (%)	Carbono Fixo (%)
RPA	72,56	9,96	17,48
Erva Mate	73,75	9,57	16,68

Fonte: O Autor, 2021.

É notória a similaridade obtida nos valores das duas amostras, o que aponta grande semelhança energética das mesmas. Com o maior teor de voláteis presente na amostra de Erva Mate pode-se inferir que os briquetes produzidos com este resíduo, irão incendiar com maior facilidade se comparado aos briquetes do E1 e por conseguinte do E2, isto é, quanto maior for o teor de material volátil mais rápida a combustão do briquete. Os valores obtidos no trabalho de Petrikoski (2017) para resíduos de podas urbanas, coletados na cidade de Vera Cruz do Oeste-PR, se aproximam aos aferidos neste trabalho.

Verifica-se também, que a amostra de RPA, apresenta uma maior porcentagem de cinzas. Este fato pode ser recorrente do processo total do manejo das podas de árvores, desde o corte, da trituração, do transporte e chegando ao seu acúmulo no horto municipal, visto que em todos estes processos, os resíduos ficam susceptíveis a materiais que possam conter sílica e/ou outros compostos que fogem apenas da biomassa.

No trabalho desenvolvido por Esmelindro et al (2002), obtiveram valores significativamente menores para o teor de cinzas de amostras comerciais de Erva Mate processada, os quais ficaram na casa de 5,07% para o processo final e 6,01%

entre as etapas pelas quais são submetidas antes de entrar em circulação comercial. Idealmente, os valores desejados para o teor de cinzas e seguindo como princípio a norma sueca SS 18 71 21, deveriam estar compreendidos em no máximo 1,5%. Desse modo, os briquetes produzidos, não se enquadrariam nos padrões desta norma. Isso se deve, pelo fato de que materiais com altas concentrações de cinzas, prejudicam a estrutura de fornos, caldeiras, reatores, uma vez que necessitam de quantidades maiores de oxigênio para que haja a queima completa, interferindo desta forma no PCS. (RUSCH, 2019).

Em relação aos resultados obtidos para a porcentagem de Carbono Fixo, Gabardo et al. (2011) trata de que quanto maior for a concentração, maior será o PCS, isso pois o calor gerado durante a queima do material é devido à quantidade de Carbono Fixo. Além disso, quanto maior for esse teor, mais tempo irá durar a queima completa do mesmo. Este constituinte é de fato o que mais ajuda na produção de energia durante a queima, e, portanto, é um fator determinante para a eficiência da mesma (PETRICOSKI, 2017).

Como mencionado anteriormente, os resultados para ambas as amostras não divergiram entre si. Contudo, o teor de Carbono Fixo da amostra de RPA é levemente superior aos resíduos de Erva Mate, contando com uma diferença entre eles de 0,8%.

4.4. PROCESSO DE BRIQUETAGEM

Os briquetes foram produzidos em uma prensa hidráulica da marca BOVENAU, a mesma, possui acionamento manual com capacidade de 15 toneladas. Os corpos-de-prova foram realizados de acordo com o descrito no Capítulo anterior utilizando-se para cada briquete, $50 \pm 0,1$ g das amostras selecionadas para os referidos ensaios, inserindo para tanto, 9 toneladas para cada briquete produzido. Após a inserção da pressão, o tempo de espera até desenformar cada peça foi de 5 minutos até a estabilização da prensa.

Foram produzidos 7 briquetes para cada ensaio, sem contar os testes preliminares, com a inserção de pressões menores e maiores à mencionada. Estes não obtiveram resultados satisfatórios, pois com pressão menor, os mesmos acabavam rompendo com facilidade após alguns dias, já os briquetes produzidos com pressões mais elevadas, apresentaram certa dificuldade para desenformar, o que

acabou degradando significativamente as bordas. Totalizou-se, portanto, 21 briquetes (Figura 4.1) que seguiram o mesmo procedimento.

Figura 4.1 - Briquetes produzidos de RPA, RPA +Erva Mate e de Erva Mate.



Fonte: O Autor, 2021.

Os briquetes produzidos como testes preliminares, ficaram reservados em uma caixa de papelão durante uma semana. Este período foi suficiente para os mesmos apresentarem o surgimento de mofo e bolor, principalmente no topo das peças. Isso ocorre pela condição climática do período em questão e por decorrência dos mesmos estarem expostos à uma umidade relativamente grande. Portanto, os briquetes produzidos após esse período com a pressão de 9 toneladas, foram colocados na estufa, durante 1 semana, com temperatura controlada em 23°C.

4.5. RESISTÊNCIA MECÂNICA

Em sequência, os briquetes foram retirados da estufa e submetidos ao ensaio de carga máxima de ruptura, para a validação de sua resistência mecânica, sendo levados à prensa hidráulica da Figura 3.8. Estes foram forçados até que os efeitos de ruptura começassem a aparecer, conforme visto na Figura 3.9. Dessa forma, é apresentado na Tabela 4.4, os valores de carga máxima, suportada pelos corpos-de-prova produzidos.

Tabela 4.4 - Carga máxima de ruptura dos briquetes produzidos.

Briquetes	Resistência Mecânica (kgf/cm²)	Desvio Padrão
RPA	1,69	0,987
RPA + Erva Mate	1,39	1,193
Erva Mate	1,06	1,159

Fonte: O Autor, 2021.

Verifica-se na Tabela acima que os briquetes preparados a partir das amostras de RPA, apresentaram maior resistência no ensaio de compressão, seguidos da blenda com Erva Mate e dos briquetes de Erva Mate. Provavelmente pela natureza resinosa da amostra tomada, o valor da carga máxima tenha sido maior para tal amostra. Resultados estes, que alcançaram valores relativamente altos, se comparados com análises semelhantes presentes na literatura. Dias et al (2012) recomenda que o tamanho das partículas esteja na faixa de 6 a 8 mm, para que os espaços entre as partículas sejam reduzidos, criando dessa forma laços mais fortes no processo de briquetagem e por conseguinte, auxiliando na resistência dos produtos gerados. Tendo em vista a granulometria utilizada nos testes, verifica-se uma concordância com o exposto do autor.

Petricoski (2017) obteve valores próximos a 1,2 kgf/cm² para podas urbanas, os briquetes de RPA deste trabalho alcançaram 1,69 kgf/cm² e tendo em consideração a semelhança dos resíduos, pode-se considerar que tais produtos apresentam uma vantagem mecânica se comparados aos desenvolvidos pela autora. Em contrapartida, Protásio et al. (2012) citado pela autora, apresentaram briquetes com resistência muito superiores, chegando a 12,03 kgf/cm² para briquetes in natura. Assim, o resultado obtido é relativo, uma vez que são encontrados valores muito divergentes na literatura. Ainda assim, as peças obtidas apresentam um padrão aceitável, uma vez que a resistência mecânica dos briquetes trata da viabilidade de transporte e armazenamento em escala deste biocombustível.

4.6. PODER CALORÍFICO

Imediatamente após os briquetes serem rompidos, os particulados que se soltaram dos mesmos foram levados ao LATECOM, na UTFPR do campus de Medianeira, sob a supervisão do Prof. Dr. Paulo Rodrigo Stival Bittencourt. Os valores

obtidos para o PCS, PCI, PCU e do desvio padrão para os valores do PCS, são vistos na Tabela 4.5.

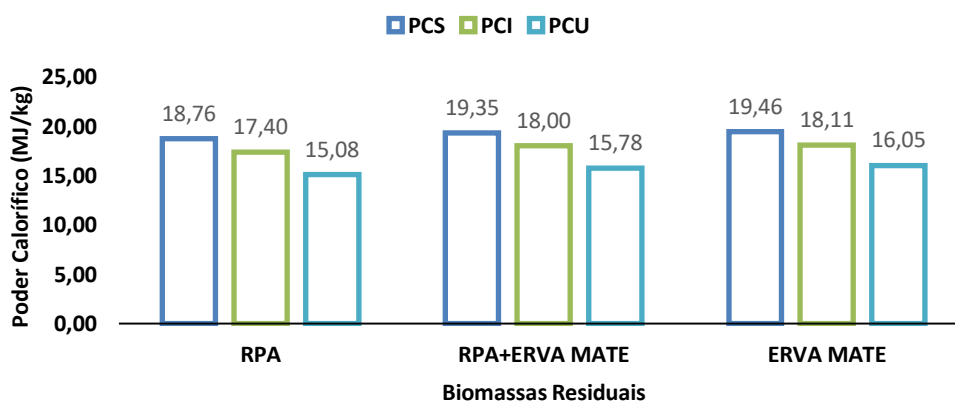
Tabela 4.5 - Análise energética dos briquetes.

Briquetes	PCS (MJ kg ⁻¹)	PCI (MJ kg ⁻¹)	PCU (MJ kg ⁻¹)	Desvio Padrão (PCS)
RPA	18,76	17,40	15,08	0,0591
RPA + Erva Mate	19,35	18,00	15,78	0,1141
Erva Mate	19,46	18,11	16,05	0,3883

Fonte: O Autor, 2021.

Como visto no Capítulo II, o PCS é um indicativo de quanto de energia é liberada durante o processo de combustão. Assim, quanto maior for o valor do PCS, mais efetivo em termos de transferência de calor, será o combustível. No gráfico presente na Figura 4.2 fica claro a magnitude do PCS, do PCI e também do PCU, das amostras analisadas. Vale a ressalva que os testes foram realizados em Triplicata.

Figura 4.2 - Gráfico de Barras para valores do PCS, PCI e PCU determinados para os ensaios E1, E2 e E3.



Fonte: O Autor, 2021.

O PCS de combustíveis varia de acordo com a matéria prima e com outros agentes utilizados no caso de briquetes com a inserção de agentes aglutinantes.

No trabalho de Quirino et al. (2004) verificou-se que serragens e os pós de serra conhecidos por “maravalhas” que são mais utilizadas em Goiás (na época

estudada), apresentam um PCS na faixa de 21,756 MJ/kg, enquanto espécies mais frondosas (que possuem maiores quantidades de folhas) apresentam um PCS de 19,246 MJ/kg. A devida variação é correlata com o tipo de biomassa a ser estudada, mas um dos fatores que mais influenciam na análise do PCS é o Teor de Umidade, uma vez que quanto maior o for, maior será a energia consumida no processo de carbonização da amostra, sendo, portanto, menor o PCS. É visto que os resíduos estudados apresentam enorme semelhança, desde a análise imediata, onde houve pouca variação entre os valores nela obtidos. Ainda, fora visto que o teor de umidade da amostra de Erva Mate fora ligeiramente menor, o que contribuiu para o maior PCS entre os Ensaios estudados. Petricoski (2017) obteve briquetes de podas urbanas, glicerina e resíduos de processamento de mandioca, estes apresentaram um PCS variando entre 16,229 MJ/kg e 18,973 MJ/kg. Já, Alves (2014), citado pela autora, obteve valores semelhantes, com 16,73 MJ/kg para o bagaço de mandioca, 18,89 MJ/kg para maniva de mandioca, 18,92 MJ/kg para sabugo de milho e 18,44 MJ/kg para palha de milho. Outros autores obtiveram, valores elevados para o PCS, como 25,55 MJ/kg para briquetes de carvão vegetal oriundos de cinzas de bagaço de cana. (TEIXEIRA; PENA E MIGUEL, 2010). Este valor é sem dúvidas interessante, uma vez que se verifica de forma direta a influência do processo de pirólise lenta, sobre o PCS. Para tanto, estende-se o campo de pesquisa para resíduos após sofrerem tal processo, comumente chamado de torrefação, levando para borra de café e até mesmo cápsulas de café.

4.7. DENSIDADE ENERGÉTICA

Para a determinação da densidade energética dos briquetes, faz-se necessário a obtenção da densidade básica dos mesmos. Para tanto, o método estereométrico foi utilizado, sobre os 7 briquetes produzidos. Conforme o método, a determinação do volume foi feita por meio das dimensões dos briquetes produzidos.

Para a utilização do método é importante que os corpos de prova estivessem em perfeito estado, com superfícies lisas, lados paralelos, sem defeitos e com o teor de umidade padronizado. Na tabela 4.6, estão presentes os valores obtidos para a densidade básica e da densidade energética, que se dá pela multiplicação do PCS pela densidade básica.

Tabela 4.6 - Densidade básica e Energética dos ensaios E1, E2 e E3.

Briquetes	Densidade Básica (kg/m³)	Densidade Energética (MJ/m³)	Desvio Padrão (Densidade Energética)
RPA	723,953	13579,191	586,770
RPA + Erva Mate	818,014	15831,840	615,121
Erva Mate	843,496	16415,838	459,293

Fonte: O Autor, 2021.

Pode-se observar que os maiores valores da média da densidade básica foram para os briquetes de Erva Mate com 843,496 kg/m³, seguidos da blenda do E2 com 818,014 kg/m³ e por fim, com menor valor de densidade básica de 723,953 kg/m³ para os briquetes realizados com RPA. Para fins de comparação, Leite et al (2011) obtiveram para briquetes de casca de café, uma densidade aparente (básica) superior a 1000 kg/m³. Para Ponte et al (2019), os briquetes feitos com bagaço de cana-de-açúcar apresentaram uma densidade aparente de 870 kg/m³, enquanto para blendas de poda de mangueira e bagaço de cana, resultaram em uma densidade aparente de 830 kg/m³. E ainda, briquetes com blenda de podas de cajueiro e bagaço de cana, tiveram resultados de 750 kg/m³, bem como a blenda das três amostras, totalizaram uma densidade aparente de 710 kg/m³. Ainda, para Pimenta et al. (2015) os briquetes de carvão de cascas de coco resultaram em valores para a densidade aparente de 660 kg/m³ e 710 kg/m³ para briquetes com blenda de amido e argila usados como aglutinante.

Na tabela 4.6 são mostrados os valores da densidade energética para os três ensaios. Nela se verifica que ainda persistem os maiores valores para os briquetes de erva mate, seguidos da blenda e por último os de RPA. É natural que o resultado seja este, uma vez que seguem os valores do PCS, para o cálculo da mesma. Como visto antes, o PCS é maior para os briquetes de Erva Mate e aliado à densidade aparente maior para eles, resultam em uma densidade energética consideravelmente maior em relação aos briquetes de RPA.

4.8. ANÁLISE COMPARATIVA

Com o trabalho desenvolvido, pode-se verificar algumas características dos briquetes produzidos, sendo para tanto visto na Tabela 4.7 uma análise comparativa entre os mesmos.

Tabela 4.7 - Análise comparativa entre os briquetes produzidos.

	Teor de Umidade (%)	PCS (MJ/kg)	Resistência Mecânica (kgf/cm ²)	Densidade Energética (MJ/kg)
RPA	11,67	18,76	1,69	13579,191
RPA + Erva Mate	10,51	19,35	1,39	15831,840
Erva Mate	9,994	19,46	1,06	16415,838

Fonte: O Autor, 2021.

É notório que os briquetes de RPA apresentam uma densificação energética menor se comparada com os briquetes oriundos da blenda das amostras e também em relação aos briquetes de Erva Mate e como a densidade energética é diretamente proporcional ao PCS o resultado para a mesma já era esperado ser maior para os briquetes que apresentaram um maior valor do PCS, no caso: os briquetes do E3.

Os resultados obtidos para o PCS estão acima do esperado, considerando que os valores típicos para Rocha, (2014), estão compreendidos entre 16,92 e 17,64 (MJ/kg), conforme visto na Tabela 2.1. Isso, contudo deve ser tratado com certa cautela, já que a biomassa utilizada é totalmente heterogênea, devido ao fato das amostras de RPA serem simplesmente misturadas durante o processo de trituração e acomodação no local de destino. Os resultados para a Erva Mate, em contrapartida, são interessantes, já que são valores altos para o PCS comparados por exemplo com o PCS do carvão vegetal (28,45 MJ/kg, obtido na conversão da Tabela 2.3).

Vale a ressalva, que mesmo que os briquetes de Erva mate e da blenda, tenham apresentado bons valores para os parâmetros tratados acima, os mesmos apresentaram uma resistência à compressão inferior aos briquetes de RPA. O que é significativamente importante, já que tal parâmetro irá determinar se tal biocombustível tem ou não condições para serem transportados sem que acabem esfarelando e, por conseguinte, voltando à forma de origem.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSÕES

Conclui-se ao analisar a fundamentação teórica deste trabalho, que processo de briquetagem ainda não possui grandes utilizações no território brasileiro, muito devido à falta de incentivos, e também pela inexistência de normativas nacionais para a produção do mesmo. Outro ponto que atua como impedimento para a propagação para uso energético deste biocombustível, se deve pela falta de conhecimento sobre a existência dessa alternativa sustentável. O aproveitamento de resíduos lignocelulósicos, pelo método de briquetagem, ainda assim é uma alternativa rentável que possui grande potencial para geração de energia, uma vez que os briquetes produzidos apresentam umidade relativamente baixa, e teor de voláteis elevados. Esses fatores contribuem para uma densidade energética maior e a obtenção de um PCS elevado. Dessa forma, com a temática do reaproveitamento de resíduos lignocelulósicos o presente trabalho buscou uma solução para o aproveitamento de RPA e de Erva Mate, visando o uso energético com a mínima agressão ambiental possível. Para tanto, constatou-se que as podas de árvore da cidade de Foz do Iguaçu, são descartadas junto ao Horto municipal e deixadas para apodrecerem com o intuito de virar adubo orgânico. Já os resíduos de Erva Mate, são muitas vezes descartados de forma irregular, junto com os resíduos domésticos em aterros sanitários e/ou lixões. Por decorrência desse mau uso e destinação inadequada concluiu-se, que é possível a produção de briquetes de RPA e de Erva Mate, mesmo sem a adição de aglutinantes, que tornaria o processo um pouco mais caro. Portanto, com a produção deste biocombustível, é visível que o acúmulo destes resíduos diminuiria drasticamente, podendo haver uma destinação econômica e sustentável, bem como a conservação ambiental e descarte adequado dos resíduos de Erva Mate.

Deste modo foram verificadas as características físicas e energéticas dos briquetes produzidos, onde os teores de umidade dos Ensaios E1, E2 e E3, antes da briquetagem estiveram dentro da faixa catalogada pela literatura citada. O Ensaio que apresentou maior teor de umidade foi o E1 com 11,67%, enquanto o E3 apresentou o menor valor para este parâmetro, com 9,994%.

Nos testes de análise Imediata, as amostras de RPA, apresentaram maiores valores para o teor de cinzas e de Carbono Fixo, com 9,96 e 17,48% respectivamente.

Contudo, foi constatado um menor valor para o teor de materiais voláteis, com 72,56%, enquanto as amostras de Erva Mate apresentaram para os teores de materiais voláteis, de cinzas e de carbono fixo, 73,75, 9,57 e 16,68% respectivamente. Aqui vale a ressalva que todos os ensaios se excetuando o de densidade energética, foram realizados em Triplicata.

Com tais resultados, é possível verificar a tendência para os parâmetros energéticos dos briquetes que seriam realizados na sequência. Isso em decorrência de o teor de cinzas comportar-se de forma inversamente proporcional ao poder calorífico. Com isso, já se espera que os briquetes de RPA, tivessem uma menor magnitude no que tange o PCS.

Conforme o exposto, os resultados maiores para o PCS, PCI e também para o PCU, foram obtidos para os briquetes produzidos com Erva Mate, seguidos pela blenda 50% RPA e 50% Erva Mate e por fim de somente RPA. Os Resultados para o E1 para o PCS, PCI e PCU foram de 18,76; 17,40 e 15,08 MJ/kg, respectivamente com desvio padrão de 0,591 para o PCS. Assim como, para a blenda, os resultados na mesma ordem, foram de 19,35; 18 e 15,78 MJ/kg, com desvio padrão de 0,1141. Já para os briquetes de Erva Mate, obteve-se 19,46; 18,11 e 16,05 MJ/kg, respectivamente, com desvio padrão de 0,3883. Conclui-se nestes resultados, a influência do teor de umidade, uma vez que o Ensaio E3, que obteve menor TU, apresentou um maior PCS, PCI e também PCU.

Em relação à resistência mecânica, dos briquetes de Erva Mate, concluiu-se que não apresentaram uma resistência tão elevada, quanto os briquetes de RPA, os quais ultrapassaram 1,6 kgf/cm². Mesmo assim, apresentaram bons resultados, com 1,06 kgf/cm². A blenda de RPA + Erva Mate, ficou com valores intermediários entre os outros dois, sendo 1,39 kgf/cm²

Por fim, os briquetes com a maior densidade tanto aparente, quanto energética, foram obtidos com amostras de Erva mate, seguido da blenda e finalizando com as amostras de RPA. Sendo, portanto, 13.579,191 MJ/m³ a densidade energética para briquetes de RPA, 15.831,84 MJ/m³ para a blenda e 16.415,838 MJ/m³ para os briquetes de Erva Mate.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, 1981. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6923/81. Rio de Janeiro.

ABNT. 1984. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8633/84. Determinação do poder calorífico superior. 13p. 1984.

AEN. 2019. MAIOR PRODUÇÃO DO PAÍS, ERVA-MATE ENVOLVE 100 MIL FAMÍLIAS NO PARANÁ. [S. l.]: Agricultura, outubro 2019. Disponível em: <https://www.aen.pr.gov.br/modules/noticias/article.php?storyid=104046>. Acesso em: 15 set. 2021.

ALVES, D.A.H. AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DE RESÍDUOS DE PRODUÇÃO AGRÍCOLA PROVENIENTES DO BENEFICIAMENTO DA MANDIOCA E DO MILHO. 2014. 80p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2014.

ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. (Diário Oficial, de 11 set. 2008, seção 1, p. 89).

ASTM. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter (Intermediate Precision Method). United States: ASTM D 4809, 9 p.

ASTM. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM International. ASTM E870-82. Standard Test Methods for Analysis of Wood Fuels, United States, 2006.

ASTM D 3173-85 - Standard Test of Humidity. (1985).

BARATTA JÚNIOR, A.P; MAGALHÃES, L.M.S. APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DA PODA DE ÁRVORES DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO PARA COMPOSTAGEM. Ciências Agroambientais, Rio De Janeiro. dez. 2010.

BARROS, V. C. C.. Monografia de graduação. Universidade Federal de Viçosa, setembro de 2013. BRIQUETES PRODUZIDOS COM RESÍDUOS DE PODA

URBANA E EMBALAGENS CARTONADAS. Orientadora: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.

BRACESCO, N. et al. RECENT ADVANCES ON ILEX PARAGUARIENSIS RESEARCH: Minireview. Journal of ethnopharmacology. v.136, n.3, p.378-384. Jul. 2011.

BRAND, Martha Andreia. ENERGIA DE BIOMASSA FLORESTAL. Rio de Janeiro: Interciência, 2010.

BRIANE, D.; DOAT, J. GUIDE TECHNIQUE DE LA CARBONISATION: LA FABRICATION DU CHARBON DE BOIS. Aix-en-Provence, ÉDISUD, 1985. 180p.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. CARVÃO VEGETAL DE MADEIRA DE DESBASTE DE PINUS. Circular Técnica IPEF, Piracicaba, v. 146, p. 1-12, jun. 1981.

CARVALHO, E. A.; BRINCK, V. CETEM: BRIQUETAGEM – CAP. 15. CT2004-190-00 COMUNICAÇÃO TÉCNICA ELABORADA PARA A 4ª EDIÇÃO DO LIVRO DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS. p.613 - p.636. Rio de Janeiro. 2004.

COPEL. BIOMASSA. 18 jan. 2016. Disponível em: <https://www.copel.com/hpcopel/rot/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2Fdocs%2F24349F1A246428E1032574240049F201>. Acesso em: 15 out. 2019.

CORTEZ, L.A.B. LORA, E. E. S. GÓMEZ, E. O. BIOMASSA PARA ENERGIA – Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2008.

DIAS, J.M.C.S. et al. PRODUÇÃO DE BRIQUETES E PELETES A PARTIR DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS, AGROINDUSTRIAIS E FLORESTAIS. Brasília: Embrapa Agroenergia, 2012.130p.

EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL). Balanço Energético Nacional 2020: Ano base 2019 / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro : EPE, 2020.

ERIKSSON, S., PRIOR, M. THE BRIQUETTING OF AGRICULTURAL WASTES FOR FUEL. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO), Rome, 1990.

ESMELINDRO, Maria Carolina et al. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA ERVA MATE: INFLUÊNCIA DAS ETAPAS DO PROCESSAMENTO INDUSTRIAL. Food Science and Technology, v. 22, n. 2, p. 199-204, 2002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cta/a/vzhPDmJ9ghm5pxbHMZTPnbN/?format=pdf&lang=pt> acesso em 11 set 2021.

FELFLI, F.F. et al. BIOMASS BRIQUETTING AND ITS PERSPECTIVES IN BRAZIL. Biomass and bioenergy. jan. 2011.

FONTES, P. J. P. de; QUIRINO, W. F.; PASTORE JUNIOR, F.; FILGUEIRAS, S. M. S. AGLUTINANTE PARA BRIQUETAGEM DE CARVÃO VEGETAL. Brasília: DPQ/IBDF, 1984.

FREITAS, G. B. L. et al. ERVA-MATE, MUITO MAIS QUE UMA TRADIÇÃO, UM VERDADEIRO POTENCIAL TERAPÊUTICO. Revista Eletrônica de Farmácia, [S. l.], p. 101-113, 22 set. 2011.

GABARDO, R.P. et al. APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE ORIGEM FLORESTAL PARA A PRODUÇÃO DE CARVÃO. In: Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, Londrina – PR, 2011.

GUEDES, C. L. B. et al. AVALIAÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEL DERIVADO DO BIO-ÓLEO OBTIDO POR PIRÓLISE RÁPIDA DE BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA COMO ADITIVO PARA GASOLINA. Química Nova, São Paulo, v. 33, n. 4, p. 781-786, 2010.

GÓMEZ, E. O. et al. PROJETO DE PIRÓLISE RÁPIDA CONTÍNUA DE BIOMASSA COM AR EM REATOR DE LEITO FLUIDIZADO ATMOSFÉRICO. 2003. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC_00000000220000002000_20&script=sci_arttext>. Acesso em: 06 nov. 2018.

GRIPPI, Sidney., 2009. O GÁS NATURAL E A MATRIZ ENERGÉTICA NACIONAL. Rio de Janeiro :Editora Interciência.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Produção da extração vegetal e silvicultura. Rio de Janeiro: IBGE, 2016. p.54 p

IEE USP. FONTES DE BIOMASSA. Disponível em: <http://gbio.webhostusp.sti.usp.br/?q=pt-br/livro/fontes-de-biomassa>. Acesso em: 29 set. 2019.

KALIYAN, N.; VANCE MOREY, R. FACTORS AFFECTING STRENGTH AND DURABILITY OF DENSIFIED BIOMASS PRODUCTS, BIOMASS AND BIOENERGY. p.337-359, 2009.

LEITE, E.R.S. et al. INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA E UMIDADE DAS PARTÍCULAS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E FÍSICAS DOS BRIQUETES DE CASCA DE CAFÉ. In: 6º Congresso Internacional de Bioenergia, 2011, Curitiba. Anais... Curitiba: Centro de Eventos da FIEP, 2011.

LIPPEL. BRIQUETES DE BIOMASSA E CARVÃO. Disponível em:<http://www.lippel.com.br/br/briquetes-de-biomassa-e-carvao.html>. Acesso em: 13 nov. 2019.

LORA, E. S., et al. GASEIFICAÇÃO E PIRÓLISE PARA A CONVERSÃO DA BIOMASSA EM ELETRICIDADE E BIOCOMBUSTÍVEIS. Biocombustíveis, 2012, vol. 1, p. 411-498.

MARTINS, Claudia Rocha. et al., CICLOS GLOBAIS DE CARBONO, NITROGÊNIO E ENXOFRE: A IMPORTÂNCIA NA QUÍMICA DA ATMOSFERA. Cadernos temáticos de química nova na escola, São Paulo, n. 5, p. 28-41, nov. 2003.

MEIRA, A. L. B et al. PLANO MUNICIPAL DE SANEAMENTO BÁSICO MUNICÍPIO DE FOZ DO IGUAÇU / PR. Prefeitura de Foz do Iguaçu, Foz do Iguaçu, 2012.

MENEZES, M. J. S. PODER CALORÍFICO E ANÁLISE IMEDIATA DA MARAVALHA DE PINUS (PINUS SP) E ARAUCÁRIA (ARAUCARIA ANGUSTIFOLIA) DE REFLORESTAMENTO COMO RESÍDUOS DE MADEIREIRA. 65p. Cascavel, PR: UNIOESTE, 2013.

NOGUEIRA, L. A.; LORA, E. S. DENDROENERGIA: FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES – 2 eds. – Rio de Janeiro. 2003.

NOGUEIRA, M. F. M.; RENDEIRO, G. (2008). CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DA BIOMASSA VEGETAL. BARRETO, Eduardo José Fagundes (Coord). Combustão e Gaseificação da Biomassa Sólida: Soluções Energéticas para a Amazônia. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. p. 52-63.

OGATA, Bruna Harumi. CARACTERIZAÇÃO DAS FRAÇÕES CELULOSE, HEMICELULOSE E LIGNINA DE DIFERENTES GENÓTIPOS DE CANA-DE-AÇÚCAR E POTENCIAL DE USO EM BIORREFINARIAS. 2013. w p. Dissertação de mestrado (Ciências) - USP, Piracicaba, 2013.

OSHIRO, Thaís Liemi. PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE BRIQUETES PRODUZIDOS COM RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS. 2016. 58p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2016.

PARIKH, J.; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. A CORRELATION FOR CALCULATING HHV FROM PROXIMATE ANALYSIS OF SOLID FUELS. Fuel, v. 84, n. 5, p. 487-494. 2005.

PETRICOSKI, Silvia Maccari. Ma. Universidade Estadual do Oeste do Paraná UNIOESTE, março, 2017. BRIQUETES PRODUZIDOS COM MISTURA DE PODAS URBANAS, GLICERINA E RESÍDUOS DE PROCESSAMENTO DE MANDIOCA. Professor. Orientador Dr. Armin Feiden. Professora Coorientadora Dra. Adriana Ferla de Oliveira.

PIMENTA, A.S. et al. UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE COCO (COCOS NUCIFERA) CARBONIZADO PARA A PRODUÇÃO DE BRIQUETES. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 25, n.1, p.137-144, jan/mar. 2015.

PONTE, M.R.; GADELHA, A.M.T.; MACHADO, Y.L., et al. BLENDS DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR, PODAS DE MANGUEIRA E CAJUEIRO: CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES E INVESTIGAÇÃO DE SEUS POTENCIAIS ENERGÉTICOS. Revista Matéria, v.24, n.2, 2019.

PROTÁSIO, T.P. et al. TORREFAÇÃO E CARBONIZAÇÃO DE BRIQUETES DE RESÍDUOS DO PROCESSAMENTO DOS GRÃOS DE CAFÉ. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.16, n.11, p. 1252–1258, 2012.

QUIRINO, W. F. BRIQUETAGEM DE RESÍDUOS LIGNO-CELULÓSICOS. Laboratório de Produtos Florestais – LPF/IBAMA. Brasília, 2004.

QUIRINO, W. F. et al. PODER CALORÍFICO DA MADEIRA E DE DESCARTES LIGNOCELULÓSICOS. Biomassa e Energia, v.1, n. 2, p. 173-182, 2004.

QUIRINO, W.F.; BRITO, J.O. CARACTERÍSTICAS E ÍNDICE DE COMBUSTÃO DE BRIQUETES DE CARVÃO VEGETAL. Brasília: IBAMA / LPF- Laboratório de Produtos Florestais, 1991. (Série Técnica, n.13).

RAMOS E PAULA, L, E. PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO DE BRIQUETES DE RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS. 72 p. Dissertação apresentada ao Programa de PósGraduação em Ciência e Tecnologia da Madeira - Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG, 2010

ROCHA, J. D. BRIQUETES E PELLETS DE RESÍDUOS: TECNOLOGIA E POTENCIAL. 9º Congresso Internacional de Bioenergia. Embrapa, São Paulo: 2014.

RUSCH, Fernando. PRODUÇÃO DE PAINÉIS DE ALTA DENSIDADE E USO ENERGÉTICO DE BAMBU COM COPARTICIPAÇÃO DE ERVA-MATE / Fernando Rusch. – Irati, PR : [s.n.], 2019.

TEIXEIRA, S.R.; PENA, A.F.V.; MIGUEL, A.G. BRIQUETTING OF CHARCOAL FROM SUGARCANE BAGASSE FLY ASH (SCBFA) AS AN ALTERNATIVE FUEL. Waste Management, v.30, n.5,p.804–807, may. 2010.

VALE, Victor Hugo Duarte do. DIAGNÓSTICO DOS RESÍDUOS DE PODAS DO MUNICÍPIO DE NATAL/RN. 2016. 42 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

VIEIRA, A. C. CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA PROVENIENTE DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA. / Ana Carla Vieira — Cascavel, PR: UNIOESTE, 2012.

VILAS BOAS, M. A. EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO DA MADEIRA PARA PRODUÇÃO DE BRIQUETES / Mariana Almeida Vilas Boas. – Viçosa, MG, 2011.

APÊNDICE A – Teor de Umidade

	Erva Mate	RPA	RPA+EM
CADINHO	66,6633	38,9151	55,8864
CAD+AMOS	71,8875	44,2373	61,9652
AMOSTRA	5,2242	5,3222	6,0788
SECA 110	71,372	43,5993	61,3056
massa seca	4,7087	4,6842	5,4192
TU	9,86754	11,98752	10,85083

	Erva Mate	RPA	RPA+EM
CADINHO	68,3359	57,5525	55,8864
CAD+AMOS	73,5131	62,9232	59,9652
AMOSTRA	5,1772	5,3707	4,0788
SECA 110	72,9977	62,3112	59,5396
massa seca	4,6618	4,7587	3,6532
TU	9,955188	11,39516	10,43444

	Erva Mate	RPA	RPA+EM
CADINHO	68,3359	57,5525	55,8864
CAD+AMOS	73,5131	62,9232	63,5971
AMOSTRA	5,1772	5,3707	7,7107
SECA 110	72,9977	62,3112	62,8065
massa seca	4,6618	4,7587	6,9201
TU	10,16139	11,62735	10,25328

APÊNDICE B – Análise Imediata

	erva mate	RPA
Cadinho	43,8686	44,0093
amostra+ cadinho	48,6523	48,7775
amostra	4,7837	4,7682
850	45,1175	45,3115
m volateis	1,2489	1,3022
Teor de Volateis	73,8925936	72,68990395
750	44,6332	44,8242
m cinza	0,7646	0,8149
Teor de Cinzas	10,12396262	10,21978944
Carbono Fixo	15,98344378	17,09030661

	erva mate	RPA
Cadinho	44,0093	43,8686
amostra+ cadinho	48,7901	48,3031
amostra	4,7808	4,4345
850	45,2159	45,0545
m volateis	1,2066	1,1859
Teor de Volateis	74,76154618	73,25741346
750	44,7342	44,5882
m cinza	0,7249	0,7196
Teor de Cinzas	10,07571954	10,51527793
Carbono Fixo	15,16273427	16,2273086

	erva mate	RPA
Cadinho	43,8686	44,0093
amostra+ cadinho	48,1123	48,3269
amostra	4,2437	4,3176
850	45,0306	45,2286
m volateis	1,162	1,2193
Teor de Volateis	72,61823409	71,75977395
750	44,6691	44,8336
m cinza	0,8005	0,8243
Teor de Cinzas	8,518509791	9,148601075
Carbono Fixo	18,86325612	19,09162498

APÊNDICE C – Resistência Mecânica

	RESISTÊNCIA MECÂNICA (KN)				
	T1	T2	T3	Média	Desvio Padrão
RPA	34,5	32,9	32,7	33,367	0,987
RPA+EM	28,7	26,8	26,5	27,333	1,193
EM	20,3	20,1	22,2	20,867	1,159

APÊNDICE D – Poder Calorífico

PCS1	PCS2	PCS3	Média	Desvio Padrão
18,728	18,718	18,825	18,757	0,059101607
19,238	19,358	19,466	19,354	0,114052619
19,201	19,908	19,276	19,46167	0,388350786

	kcal/kg		
	PCS	PCI	PCU
RPA	4483,0355	4159,576	3604,133
RPA+Erva Mate	4625,7221	4302,262	3786,895
Erva Mate	4651,4551	4327,995	3835,457

	MJ/kg		
RPA	18,76	17,40	15,08
RPA+ERVA			
MATE	19,35	18,00	15,84
ERVA MATE	19,46	18,11	16,05

APÊNDICE E – Densidade Aparente e Energética

RPA					
mg	vcm3	mkg	Vm3	db	de
37,1	53,01438	0,0371	5,30144E-05	699,8102	13126,34
37,6	49,08739	0,0376	4,90874E-05	765,9809	14367,5
47,7	68,72234	0,0477	6,87223E-05	694,0974	13019,19
48,3	70,68583	0,0483	7,06858E-05	683,3052	12816,76
49,1	66,75884	0,0491	6,67588E-05	735,4831	13795,46
51,1	68,72234	0,0511	6,87223E-05	743,5719	13947,18
48,3	64,79535	0,0483	6,47953E-05	745,4239	13981,92
				723,9532	13579,19

RPA + Erva Mate					
49,8	58,90486	0,0498	5,89049E-05	845,4311	16362,47
47,6	56,94137	0,0476	5,69414E-05	835,9476	16178,93
53,6	62,83185	0,0536	6,28319E-05	853,0705	16510,33
52,6	62,83185	0,0526	6,28319E-05	837,155	16202,3
54,4	68,72234	0,0544	6,87223E-05	791,5912	15320,46
48,9	62,83185	0,0489	6,28319E-05	778,2677	15062,59
49,3	62,83185	0,0493	6,28319E-05	784,6339	15185,8
				818,0138	15831,84

Erva Mate					
52,19	62,83185	0,05219	6,28319E-05	830,6296	16165,44
53,72	62,83185	0,05372	6,28319E-05	854,9804	16639,34
56,1	66,75884	0,0561	6,67588E-05	840,3381	16354,38
58,82	68,72234	0,05882	6,87223E-05	855,908	16657,4
60,265	68,72234	0,060265	6,87223E-05	876,9346	17066,61
56,355	66,75884	0,056355	6,67588E-05	844,1578	16428,72
51,935	64,79535	0,051935	6,47953E-05	801,5236	15598,98
				843,496	16415,84

Briquete	Db	DE	desvio Padrão DE
RPA	723,953	13579,191	586,770
RPA+EM	818,014	15831,840	615,121
EM	843,496	16415,838	459,293