



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**RAFAEL NOGUEIRA LIMA**

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DA PALHA E TALO DA  
CARNAÚBA**

**FORTALEZA**

**2018**

RAFAEL NOGUEIRA LIMA

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DA PALHA E TALO DA  
CARNAÚBA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Energias Renováveis.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Alexsandra de Sousa Rios

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- L71a Lima, Rafael Nogueira.  
Avaliação do potencial energético da palha e talo de carnaúba / Rafael Nogueira Lima. – 2018.  
88 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2018.  
Orientação: Prof. Dr. Maria Alexandra de Sousa Rios .
1. Carnaúba. 2. Briquete. 3. Potencial Energético. I. Título.

CDD 620.1

---

RAFAEL NOGUEIRA LIMA

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DA PALHA E TALO  
DA CARNAÚBA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Energias Renováveis.

Aprovada em: 31/ 10 /2018

BANCA EXAMINADORA

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Aleksandra de Sousa Rios (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof.<sup>a</sup> Dr. Adriano Lincoln Albuquerque Mattos  
Laboratório de Tecnologia de Biomassas (EMBRAPA)

A Deus.  
Aos meus pais,  
Raimundo Nonato Bezerra Lima e  
Edna Nogueira Lima.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Criador dos Céus e da Terra que sempre esteve presente em minha vida, guiando meus passos e dando a oportunidade de reiniciar uma nova história a cada dia, com saúde e sabedoria;

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

À Prof. Dra. Maria Alexandra de Sousa Rios, pela excelente orientação.

Aos meus queridos pais e irmãos, pela educação proporcionada, convívio e pelo incentivo em buscar novas conquistas, sempre com base no respeito e ética.

À minha amada esposa Daniela da Silva Ferreira e ao meu filho Miguel Gabriel Nogueira Ferreira Lima, minhas fontes de inspiração, apoiadoras e parceiras de vida, que estão sempre presentes em minha vida.

Ao meu irmão Victor Nogueira Lima pelo apoio e incentivo para continuar o mestrado nos momentos difíceis.

Ao meu grande amigo Antônio Anderson de Jesus Rodrigues que me motivou a concluir o mestrado em meio a tantas dificuldades.

À Universidade Federal do Ceará pela oportunidade e condições financeiras proporcionadas para minha participação e conclusão deste mestrado.

Ao Núcleo de Tecnologia do Estado Ceará (NUTEC) pela permissão de utilização dos laboratórios de pesquisa.

Ao Laboratório de Referência em Biocombustíveis (LarBio) pela liberação dos equipamentos para que o presente estudo fosse possível.

Aos técnicos e bolsistas do Larbio pelos constantes apoios na realização dos experimentos.

À Embrapa pela contribuição a pesquisa através da obtenção dos dados para a análise elementar da carnaúba.

À Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Josy Antevéli Osajima Furtini da Universidade Federal do Piauí pelo auxílio na realização das análises térmicas.

Aos professores participantes da banca examinadora Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire e ao Prof.<sup>a</sup> Dr. Adriano Lincoln Albuquerque Mattos pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos colegas da turma de mestrado, pelas reflexões, críticas e sugestões recebidas.

“Ao homem que o agrada, Deus dá sabedoria,  
conhecimento e felicidade. ”  
(Eclesiastes 2:26)

## RESUMO

A carnaúba (*Copernicia prunifera*) é uma espécie vegetal que existe em abundância na região nordeste, inclusive no estado do Ceará, e que já é utilizada para extração da cera de carnaúba. Este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial energético da biomassa oriunda do talo e da palha da carnaúba, como combustível para a geração de energia térmica. Foi realizada a caracterização do talo e da palha da carnaúba nas formas *in natura* e briquetes. Foi realizado um comparativo entre as propriedades da carnaúba na forma *in natura* e briquete em relação às análises de Teor de Cinza, Teor de Voláteis, Teor de Carbono Fixo, Teor de Umidade e Poder Calorífico Superior (PCS). A caracterização dos resíduos foi realizada utilizando as diretrizes contidas nas normas brasileiras ABNT NBR 8112 e 8633. Também foram estudadas formas de compactação deste material por meio da transformação desta biomassa em briquetes, o qual facilita o manuseio e armazenamento em grande quantidade. A metodologia constituiu-se em secar a biomassa *in natura* e os briquetes separadamente em uma estufa e em seguida, queimá-las em um forno mufla, para a obtenção dos resultados de análise imediata. Para a determinação do PCS foi utilizada um calorímetro. Por meio das análises percebeu-se que a palha da carnaúba e o talo *in natura* apresentaram um teor de umidade de 11,76% e 11,60%, respectivamente, enquanto os briquetes de palha e talo apresentaram um teor de umidade menor (9,34% e 9,96%). Em relação ao teor de voláteis, os valores obtidos foram 70,89% e 81,12% para a palha e o talo *in natura* e 70,02%, 80,41%, para os briquetes de palha e talo, respectivamente. Já para o teor de cinzas, os resultados foram 9,13% e 2,80% para a palha e talo *in natura* e 8,99%, 2,75% para os briquetes de palha e talo. Para o teor de carbono fixo 19,98%, 16,08 % para a palha e talo *in natura* e 20,9%, 16,8% para os briquetes, respectivamente. Os resultados de PCS foram 17,51 MJ/kg e 17,29 MJ/kg para a palha e talo *in natura* e 17,76 MJ/kg e 17,44 MJ/kg para os briquetes de palha e talo. A densidade energética do briquete de palha aumentou de 2,98 para 12,78 kJ/cm<sup>3</sup> e o briquete apresentou uma resistência mecânica de 0,1 MPa; o talo variou de 2,89 para 11,33 kJ/cm<sup>3</sup>, com uma resistência mecânica de 0,3 MPa; a blenda (50% palha; 50% talo) variou de 2,79 para 11,98 kJ/cm<sup>3</sup>, com uma resistência de 0,2 MPa. Constata-se pelos resultados que a briquetagem aumenta a densidade energética do material e que a carnaúba possui um grande potencial de aplicação como fonte de energia térmica.

**Palavras-chave:** Carnaúba. Briquete. PCS. Potencial Energético.



## ABSTRACT

Carnauba (*Copernicia prunifera*) is a plant species that exists in abundance in the northeast region, including in the state of Ceará, and is already used for extracting carnauba wax. The objective of this work was to evaluate the energy potential of the biomass from the stem and the carnauba straw as fuel for thermal energy generation. Characterization of carnauba stalks and straw in natura forms and briquettes was carried out. A comparison between the carnauba properties in the in natura and briquette forms was carried out in relation to the Ash, Volatile Content, Fixed Carbon Content, Moisture Content and Higher Heat Value (HHV) analyzes. The characterization of the residues was carried out using the guidelines contained in the Brazilian standards ABNT NBR 8112 and 8633. Also, ways of compaction of this material were studied by means of the transformation of this biomass into briquettes, which facilitates the handling and storage in large quantity. The methodology is to dry the in natura biomass and briquettes separately in a greenhouse and then burn them in a muffle oven, to obtain the results of immediate analysis. A calorimetric pump was used to determine PCS. The analysis revealed that carnauba straw and in natura stem had a moisture content (11.76% and 11.60%), respectively, whereas straw and stalk briquettes had a lower moisture content (9.34% and 9.96%). In relation to the volatile content, the values obtained were 70.89% and 81.12% for the straw and the in natura stem and 70.02%, 80.41% for the straw and threshing briquettes. As for the ash content, the results obtained were 9.13% and 2.80%, respectively for straw and fresh stalk and 8.99%, 2.75% for straw and threshing briquettes. For Fixed Carbon content 19.98%, 16.08% for straw and fresh stalk and 20.9%, 16.8% for briquettes, respectively. The obtained PCS results were 17.51 MJ / kg, 17.29 MJ / kg for straw and in natura stem and 17.76 MJ / kg, 17.44 MJ / kg for straw and thallium briquettes. The energy density of the briquettes increased from 2.98 to 12.78 kJ / cm<sup>3</sup> and the briquette presented a mechanical resistance of 0.1 MPa; the stalk varied from 2.89 to 11.33 kJ / cm<sup>3</sup> with a mechanical strength of 0.3 MPa; the blend (50% straw, 50% thallus) ranged from 2.79 to 11.98 kJ / cm<sup>3</sup> with strength of 0.2 MPa. It is noticed from the results that the briquetting increases the energy density of the material and that the carnauba has a great application potential as a source of thermal energy.

**Keywords:** Carnauba. Briquette. PCS. Energy Potential.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Panorama Energético do Brasil.....   | 19 |
| Figura 2 – Energias Renováveis na Matriz Energética Nacional.....                           | 20 |
| Figura 3 – Oferta de Potência de Geração Elétrica 2016 no Brasil.....                       | 20 |
| Figura 4 – Esquema de uma estrutura de uma microfibrila.....                                | 22 |
| Figura 5 – Processos de conversão energética da biomassa.....                               | 23 |
| Figura 6 – Carnaubal Plantado em Russas, CE.....  | 24 |
| Figura 7 – Distribuição da Carnaúba na Região Nordeste.....                                 | 25 |
| Figura 8 – Polos de Produção de carnaúba do Ceará em 2008.....                              | 26 |
| Figura 9 – Participação relativa dos estados na extração de pó de carnaúba em 2016.....     | 26 |
| Figura 10 – Produção de carnaúba (em toneladas), no Período de 2007 a 2016.....             | 27 |
| Figura 11 – Amostras de Talo e Palha de Carnaúba.....                                       | 39 |
| Figura 12 – Forno Mufla QUIMIS Q.318.24.....  | 41 |
| Figura 13 – Dessecador.....   | 41 |
| Figura 14 – Analisador de Umidade Infravermelho.....  | 42 |
| Figura 15 – Cadinho de Platina e Forno Mufla (Teor de Voláteis).....                        | 43 |
| Figura 16 – Calorímetro IKA C1.....   | 44 |
| Figura 17 – Prensa Hidráulica.....  | 46 |
| Figura 18 – Cilindro de Compressão.....   | 46 |
| Figura 19 – Cilindro Após Liberação de Carga.....   | 46 |
| Figura 20 – Briquete de Palha de Carnaúba.....  | 47 |
| Figura 21 – Briquetes de Blenda (A), Talo (B) e Palha (C).....                              | 50 |
| Figura 22 – Máquina universal de ensaios EMIC - PCE 100C.....                               | 50 |
| Figura 23 – Friabilômetro.....  | 51 |
| Figura 24 – Compressão diametral briquete de palha antes (A) e após o ensaio (B).....       | 64 |
| Figura 25 – Compressão diametral briquete do Talo antes (A) e após o ensaio (B).....        | 66 |
| Figura 26 – Compressão diametral briquete de Blenda antes (A) e após o ensaio (B).....      | 67 |
| Figura 27 – Amostras de briquetes de blenda (A), talo (B) e palha(C), após o experimento... | 69 |
| Figura 28 – Briquete de talo antes e após a realização do ensaio de friabilidade.....       | 70 |
| Figura 29 – Briquete de palha antes e após a realização do ensaio de friabilidade.....      | 70 |
| Figura 30 – Briquete de blenda antes e após a realização do ensaio de friabilidade.....     | 71 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|   |    |
|---|----|
| Gráfico 1 – Análise imediata da palha e talo da carnaúba <i>in natura</i> ..... | 55 |
| Gráfico 2 – Análise Imediata Carnaúba Densificada. ....                         | 58 |
| Gráfico 3 – Comparação PCS carnaúba <i>in natura</i> e briquete.....            | 59 |
| Gráfico 4 – Comparação PCI carnaúba <i>in natura</i> e briquetes. ....          | 60 |
| Gráfico 5 – Ensaio de Compressão Diametral (Palha).....                         | 65 |
| Gráfico 6 – Ensaio de Compressão Diametral (Talo).....                          | 66 |
| Gráfico 7 – Ensaio de Compressão Diametral (Blenda).....                        | 68 |
| Gráfico 8 – TG Amostra de Palha de Carnaúba. ....                               | 71 |
| Gráfico 9 – DTG Amostra de Palha de Carnaúba. ....                              | 72 |
| Gráfico 10 – TG Amostra de Talo de Carnaúba.....                                | 73 |
| Gráfico 11 – DTG Amostra de Talo de Carnaúba.....                               | 74 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Produção de pó cerífero de carnaúba, dos 20 principais produtores – 2016. ....       | 28 |
| Tabela 2 – Análise elementar para algumas biomassas.....  | 29 |
| Tabela 3 – Teor de Cinzas de diversas biomassas.....  | 30 |
| Tabela 4 – Teor de Umidade de diversas biomassas.....   | 31 |
| Tabela 5 – Teor de Voláteis de algumas biomassas.....   | 31 |
| Tabela 6 – Teor de Carbono Fixo para algumas biomassas.....                                     | 32 |
| Tabela 7 – Poder Calorífico Superior (PCS) de diversas biomassas.....                           | 33 |
| Tabela 8 – Normas e Equipamentos utilizados nas análises experimentais.....                     | 38 |
| Tabela 9 – TU e PCS das amostras <i>in natura</i> .....   | 56 |
| Tabela 10 – Análise Imediata para os Briquetes.....   | 57 |
| Tabela 11 – TU e PCS dos Briquetes.....   | 58 |
| Tabela 12 – Resultados PCI biomassa in natura e briquetes.....                                  | 60 |
| Tabela 13 – Resultados para a densidade a granel das amostras in natura.....                    | 61 |
| Tabela 14 – Resultados Densidade a Aparente dos briquetes.....                                  | 62 |
| Tabela 15 – Variação de Densidade Energética entre as amostras in natura e briquetes.....       | 62 |
| Tabela 16 – Resistência à compressão diametral dos briquetes de palha.....                      | 64 |
| Tabela 17 – Resistência à compressão diametral dos briquetes de talo.....                       | 65 |
| Tabela 18 – Resistência à compressão diametral dos briquetes de blenda.....                     | 67 |
| Tabela 19 – Resultados obtidos no Ensaio de Friabilidade dos briquetes.....                     | 69 |
| Tabela 20 – Resultados da análise TG (intervalos de temperatura com perda em massa).....        | 72 |
| Tabela 21 – Comparação estatística entre os resultados da biomassa in natura e densificada..... | 75 |
| Tabela 22 – Resultados Análise Estatística PCS in natura e briquetes.....                       | 76 |
| Tabela 23 – Resultados Análise Estatística PCI in natura e briquetes.....                       | 77 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|         |   |
|---------|---|
| ABNT    | Associação Brasileira de Normas Técnicas                  |
| ASTM    | American Society for Testing and Materials                |
| b.s.    | Base seca   |
| b.u.    | Base úmida  |
| CHN     | Análise elementar   |
| DTG     | Termogravimetria derivada                                 |
| EMBRAPA | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária               |
| CF      | Carbono Fixo  |
| FB      | Friabilidade  |
| MV      | Materiais Voláteis  |
| NBR     | Norma Brasileira  |
| NUTEC   | Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará         |
| OCDE    | Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico |
| PCI     | Poder Calorífico Inferior                                 |
| PCS     | Poder Calorífico Superior                                 |
| SEMACE  | Superintendência Estadual do Meio Ambiente                |
| TC      | Teor de Cinzas  |
| TU      | Teor de Umidade   |
| TV      | Teor de Voláteis  |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|            |                         |
|------------|-------------------------|
| $\Delta m$ | Variación de massa      |
| d          | Diámetro                |
| FMrup      | Força máxima de ruptura |
| fs         | Fator de segurança      |
| Hemp       | Altura do empilhamento  |
| Mseca      | Massa seca              |
| Múmida     | Massa úmida             |
| $\rho_A$   | Densidade Aparente      |
| $\rho_E$   | Densidade Energética    |
| $\rho_G$   | Densidade a Granel      |

## SUMÁRIO

|                |   |    |
|----------------|---|----|
| <b>1</b>       | <b>INTRODUÇÃO</b> .....   | 16 |
| <b>2</b>       | <b>OBJETIVOS</b> .....  | 18 |
| <b>2.1</b>     | <b>Objetivo Geral</b> .....                                       | 18 |
| <b>2.2</b>     | <b>Objetivos Específicos</b> .....                                | 18 |
| <b>3</b>       | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....                                | 19 |
| <b>3.1</b>     | <b>Matriz Energética do Brasil</b> .....                          | 19 |
| <b>3.2</b>     | <b>Biomassa</b> .....   | 21 |
| <b>3.3</b>     | <b>Aspectos Gerais da Carnaúba</b> .....                          | 23 |
| <b>3.3.1</b>   | <i>Características da carnaúba e Locais de Extração</i> .....     | 23 |
| <b>3.3.2</b>   | <i>Principais Polos de Produção e Aplicações econômicas</i> ..... | 25 |
| <b>3.4</b>     | <b>Caracterização e Densificação da Biomassa</b> .....            | 28 |
| <b>3.4.1</b>   | <b>Análise Elementar</b> .....                                    | 29 |
| <b>3.4.2</b>   | <b>Análise Imediata</b> .....                                     | 29 |
| <b>3.4.2.1</b> | <i>Teor de Cinzas</i> .....                                       | 30 |
| <b>3.4.2.2</b> | <i>Teor de Umidade</i> .....                                      | 30 |
| <b>3.4.2.3</b> | <i>Teor de Voláteis</i> .....                                     | 31 |
| <b>3.4.2.4</b> | <i>Teor de Carbono Fixo</i> .....                                 | 31 |
| <b>3.4.3</b>   | <b>Poder Calorífico</b> .....                                     | 32 |
| <b>3.4.3.1</b> | <i>Poder Calorífico Superior</i> .....                            | 32 |
| <b>3.4.3.2</b> | <i>Poder Calorífico Inferior</i> .....                            | 33 |
| <b>3.4.4</b>   | <b>Densidade a Granel e Aparente</b> .....                        | 33 |
| <b>3.4.5</b>   | <b>Processo de Densificação (Briquetagem)</b> .....               | 34 |
| <b>3.5</b>     | <b>Análise Mecânica</b> .....                                     | 35 |
| <b>3.5.1</b>   | <b>Ensaio de Compressão Diametral</b> .....                       | 35 |
| <b>3.5.2</b>   | <b>Ensaio de Friabilidade</b> .....                               | 35 |
| <b>3.6</b>     | <b>Análise Térmica</b> .....                                      | 36 |
| <b>3.6.1</b>   | <b>Análise Termogravimétrica</b> .....                            | 36 |
| <b>4</b>       | <b>METODOLOGIA</b> .....  | 38 |
| <b>4.1</b>     | <b>Biomassa Utilizada</b> .....                                   | 39 |
| <b>4.2</b>     | <b>Análise Elementar</b> .....                                    | 40 |
| <b>4.3</b>     | <b>Análise Imediata da Biomassa</b> .....                         | 40 |
| <b>4.3.1</b>   | <i>Determinação do Teor de Cinzas</i> .....                       | 41 |
| <b>4.3.2</b>   | <i>Determinação do Teor de Umidade</i> .....                      | 42 |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 4.3.3  | <i>Determinação do Teor de Voláteis</i> .....                                | 43 |
| 4.3.4  | <i>Determinação do Teor de Carbono Fixo</i> .....                            | 44 |
| 4.4.1  | <i>Poder Calorífico Superior</i> .....                                       | 44 |
| 4.4.2  | <i>Determinação do Poder Calorífico Inferior</i> .....                       | 45 |
| 4.5    | <b>Processo de Densificação da Carnaúba</b> .....                            | 45 |
| 4.5.1  | <i>Densidade à granel e densidade aparente</i> .....                         | 47 |
| 4.5.2  | <i>Densidade Energética</i> .....  | 48 |
| 4.6    | <b>Análise Mecânica</b> .....  | 48 |
| 4.6.1  | <i>Ensaio de Compressão Diametral</i> .....                                  | 48 |
| 4.6.2  | <i>Ensaio de Friabilidade</i> .....  | 51 |
| 4.7    | <b>Análise Termogravimétrica</b> .....                                       | 52 |
| 4.8    | <b>Análise Estatística</b> .....   | 52 |
| 5      | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....  | 53 |
| 5.1    | <b>Análise Elementar (Biomassa <i>in natura</i>)</b> .....                   | 53 |
| 5.2    | <b>Análise Imediata da Palha e Talo da Carnaúba (<i>in natura</i>)</b> ..... | 53 |
| 5.3    | <b>Análise Imediata da Biomassa Densificada</b> .....                        | 57 |
| 5.4    | <b>Comparativo entre PCS Biomassa <i>in natura</i> e Densificada</b> .....   | 59 |
| 5.5    | <b>Comparativo entre PCI Biomassa <i>in natura</i> e Densificada</b> .....   | 60 |
| 5.6    | <b>Densidades a granel e Aparente</b> .....                                  | 61 |
| 5.7    | <b>Densidade Energética</b> .....  | 62 |
| 5.8    | <b>Análise Mecânica</b> .....  | 63 |
| 5.8.1  | <i>Ensaio de Compressão Diametral</i> .....                                  | 63 |
| 5.8.2  | <i>Resultados do Ensaio de Friabilidade</i> .....                            | 69 |
| 5.9    | <b>Análise Térmica</b> .....   | 71 |
| 5.9.1  | <i>Análise Termogravimétrica</i> .....                                       | 71 |
| 5.10.1 | <i>Comparação Estatística Análise Imediata</i> .....                         | 74 |
| 5.10.2 | <i>Comparação Estatística Poder Calorífico</i> .....                         | 76 |
| 6      | <b>CONCLUSÃO</b> .....   | 78 |
| 7      | <b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....                                | 79 |
|        | <b>REFERÊNCIAS</b> .....   | 80 |
|        | <b>ANEXO A – PRODUÇÃO DE PÓ DE CARNAÚBA BRASIL - 2016</b> .....              | 87 |
|        | <b>ANEXO B – TABELA T DE STUDENT</b> .....                                   | 88 |



## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um país que apresenta uma grande riqueza vegetal por toda a extensão de seu território e que pode ser utilizada como fonte geradora de biomassa para várias aplicações industriais. Houve um grande aumento de investimento em pesquisas para o aproveitamento da biomassa como combustível no Brasil e em todo o mundo, devido à inevitável escassez de combustíveis fósseis que ocorrerá nas próximas décadas, além do grande impacto ambiental e social causado por gases poluentes (MARQUES, 2012).

Devido a uma série de crises relacionadas com a produção e utilização de petróleo, que ocorreram na década de 1970, alguns países que apresentavam uma grande dependência deste e de outros tipos de combustíveis fósseis, aumentaram a busca por outras fontes alternativas de energia, diversificando seu parque energético para suprir sua demanda (STRAPASSON, 2004).

Segundo Borges (2015), o Brasil é uma das poucas nações do mundo que possuem um vasto potencial energético a ser explorado com relação a geração de energia elétrica, utilizando a biomassa para esta finalidade. Deve-se ressaltar que o país possui uma ampla capacidade para utilizar novas áreas de plantio de culturas vegetais, voltadas para a biomassa para geração de energia.

A carnaúba (*Copernicia prunifera*) é uma espécie que existe em abundância na região Nordeste do Brasil, com destaque para o estado do Ceará, um dos maiores produtores de cera de carnaúba do país. Essa espécie é adaptada as condições climáticas adversas do Nordeste, região que tem como uma de suas principais características elevadas temperaturas e um volume baixo de chuvas durante o ano todo, o que torna a carnaúba uma biomassa com um grande potencial para ser utilizada como fonte geradora de energia térmica (CÂMARA SETORIAL DA CARNAÚBA, 2009).

A realização da caracterização da biomassa é uma das principais etapas para a sua utilização, pois é através dela que é possível obter as informações necessárias sobre as suas características físicas (massa específica), análise imediata (teor de umidade, teor de voláteis, teor de cinzas e carbono fixo), análise elementar, a qual analisa os elementos químicos presentes, e o seu poder calorífico (VIEIRA, 2012).

A biomassa pode ser compactada para facilitar seu transporte e armazenamento através do processo de densificação. Esse processo é utilizado para aumentar a densidade energética do material. Consiste em aplicar uma carga de compressão diretamente no material a ser compactado,

com o intuito de criar uma massa densificada denominada de briquete (CHEN e KUO, 2010 *apud* BORGES, 2015).

Dentro deste contexto, esta pesquisa teve como objetivo avaliar o potencial energético do talo e da palha de carnaúba, por meio da realização da caracterização dessas biomassas utilizando as técnicas de análise elementar, análise imediata, análise termogravimétrica, ensaios mecânicos de compressão diametral e friabilidade a fim de avaliar sua resistência mecânica para transporte e armazenamento, além da avaliação da viabilidade técnica tanto da palha quanto do talo da carnaúba, após a extração da cera, visando sua transformação em briquetes.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo Geral

Caracterizar energeticamente as amostras *in natura* do talo e da palha da carnaúba, bem como comparar os resultados obtidos, com os resultados da carnaúba na forma de briquetes a fim de avaliar sua possível aplicação como briquetes para a geração de energia térmica.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar energeticamente as amostras *in natura* da carnaúba por meio da análise elementar, análise imediata, Poder Calorífico Superior e Poder Calorífico Inferior.
- Transformar a biomassa de carnaúba em briquetes por meio do processo de densificação por compressão;
- Avaliar os efeitos da densificação nas propriedades físico-químicas da biomassa.
- Determinar as densidades energéticas das biomassas densificadas;
- Caracterização mecânica dos briquetes;
- Determinar os intervalos de temperatura onde ocorre a perda em massa utilizando a análise termogravimétrica.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 Matriz Energética do Brasil

O Brasil, nos últimos 15 anos, buscou diversificar seu parque energético através de um grande investimento em alternativas energéticas que possam complementar a energia elétrica oriunda das hidrelétricas nacionais. Com o avanço das tecnologias para a geração de energia elétrica através de métodos que utilizem fontes renováveis, o país tornou-se uma das grandes nações que são exemplos de geração de energia limpa em todo o mundo (BEN, 2017).

Na Figura 1 está apresentada a origem das fontes de energia utilizadas no Brasil, na atualidade:

Figura 1 – Panorama Energético do Brasil.



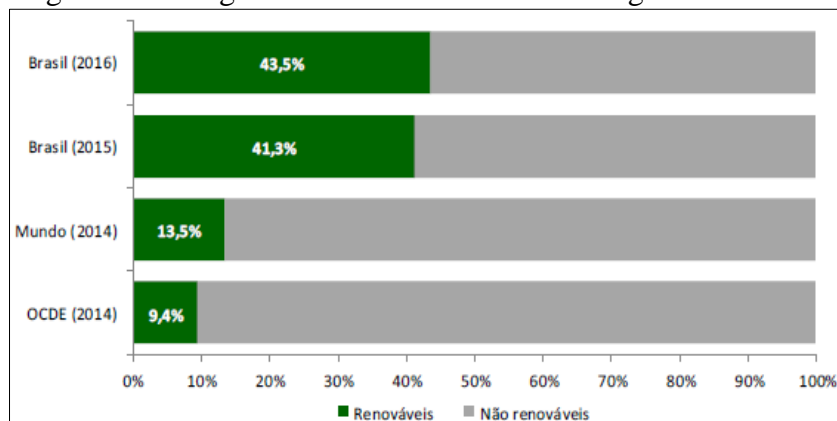
Fonte: BEN, 2017 (Ano base 2016) (Adaptado).

Verifica-se pela Figura 1 que a matriz energética utilizada pelo país apresenta uma grande parcela de energia renovável, em comparação com outros países em todo o mundo. O Brasil possui a matriz energética mais renovável do mundo industrializado, com cerca de 43,5 % de sua produção oriunda de fontes como redes hídricas, queima de biomassa e etanol, além da utilização da energia eólica e solar, com destaque para região Nordeste (BEN, 2017).

A participação de energias renováveis na Matriz Energética Brasileira no ano de 2016 manteve-se entre as mais elevadas do mundo, como ilustra a Figura 2, com pequeno crescimento

devido uma redução ocorrida na oferta interna de petróleo e derivados e expansão da geração hidráulica (BEN, 2017).

Figura 2 – Energias Renováveis na Matriz Energética Nacional.

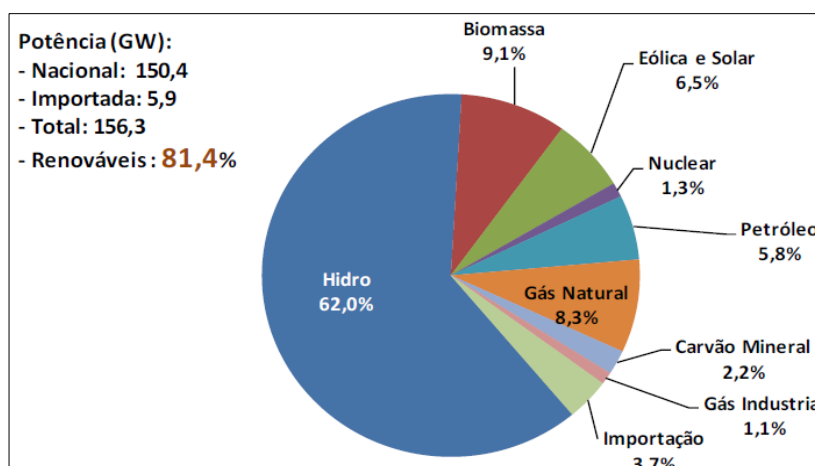


Fonte: BEN, 2017 (Ano base 2016) (Adaptado).

Em todo o mundo, está ocorrendo uma grande modificação da matriz energética para que haja uma maior contribuição das fontes de energias renováveis em seus parques energéticos. Destaca-se como as principais fontes de energias renováveis: a energia eólica, energia solar e o uso de biomassa sob diversas formas, como o etanol oriundo da cana de açúcar (BORGES, 2015).

Na Figura 3 pode-se observar a matriz de oferta de potência de energia elétrica no Brasil. Verifica-se a supremacia da potência hidráulica, com 65,7% de participação, incluindo a importação. A participação das fontes renováveis fica em 81,4%, indicador muito superior ao mundial de 20% (REB, 2017).

Figura 3 – Oferta de Potência de Geração Elétrica 2016 no Brasil.



Fonte: Resenha Energética Brasileira (2016).

Nos últimos 40 anos, a matriz energética brasileira e de outras nações apresentaram alterações importantes em sua estrutura como um todo. No Brasil houve forte aumento na participação da energia hidráulica, da bioenergia líquida e do gás natural (BEN, 2017).

Ocorreu uma forte adição de energia nuclear no bloco da OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico) e também houve um aumento no uso de gás natural. Em outras nações, houve um aumento na utilização do carvão mineral e do gás natural. Em relação a utilização de biomassa sólida, a OCDE apresentou um grande aumento de 1973 para 2016, situação oposta a que ocorreu no Brasil e em outros países. Na OCDE, existe uma tendência de aumento do uso da lenha na indústria de papel e celulose e para o aquecimento residencial (BEN, 2017).

### 3.2 Biomassa

A humanidade tem como grande desafio para este milênio desenvolver alternativas para a inevitável escassez de combustíveis fósseis no mundo. A biomassa é uma dessas importantes alternativas para ser aplicada como fonte geradora de energia para a humanidade. Ela é uma forma natural de armazenar uma parte da energia solar incidente que chega ao nosso planeta (MCT, 2005 *apud* OLIVEIRA, 2014).

Segundo Mckendry (2002), a biomassa pode ser definida como todo tipo de material de origem orgânica proveniente de plantas como árvores, algas e também restos de culturas agrícolas. A biomassa é um tipo de matéria que tem como uma de suas características absorver energia oriunda da luz Solar. A energia solar é armazenada nas ligações químicas dos vegetais e quando as ligações entre as moléculas de carbono (C), oxigênio (O) e hidrogênio (H) são quebradas por processos como digestão celular, combustão ou decomposição ocorre então a liberação da energia química armazenada pela biomassa.

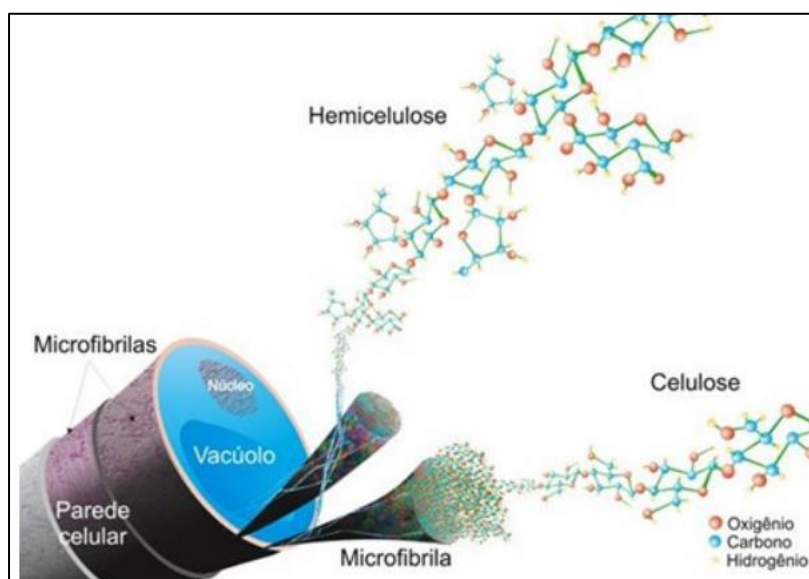
Segundo Cortez *et al.* (2008) *apud* Ponte (2017), a biomassa tem sua origem nos materiais orgânicos biodegradáveis provenientes de plantas, animais e microrganismos. As fontes de biomassa apresentam uma vasta diversidade em todo o mundo.

Segundo Açma (2003) *apud* Vieira (2012), a energia presente numa biomassa pode ser transformada (através de processos de conversão físicos, químicos e biológicos) em diversos tipos de combustíveis como sólidos, líquidos e gasosos. Com a utilização destes processos é possível transformar uma biomassa carbonácea de baixa eficiência energética numa fonte de energia cuja eficiência energética tem viabilidade econômica.

A característica principal de uma célula vegetal que compõe uma biomassa é a existência de um elemento protetor denominado de parede celular. A parede celular é um fator determinante para o tamanho e a forma da célula. Este elemento também é o responsável pela resistência mecânica e a proteção da célula contra ataques de predadores e patógenos. Também é a grande responsável por gerar a adesão entre as células, delimita o tamanho e propriedades físico-químicas das moléculas que têm acesso ao interior da célula, controla o nível de umidade existente em seu interior e ainda pode funcionar como reserva de energia (BUCKERIDGE, 2007).

Ainda segundo Buckeridge (2007) cerca de seis a oito moléculas de celulose se alinham paralelamente para originar uma fibra completa que expulsa as moléculas de água, tornando a microfibrila extremamente longa e com uma grande resistência mecânica. Na superfície das microfibrilas, ficam fixadas as hemiceluloses (polímeros heterogêneos que são classificados de acordo com a composição em monossacarídeos) que revestem a celulose formando a celulose-hemicelulose da parede celular, como é possível observar na Figura 4.

Figura 4 – Esquema de uma estrutura de uma microfibrila.

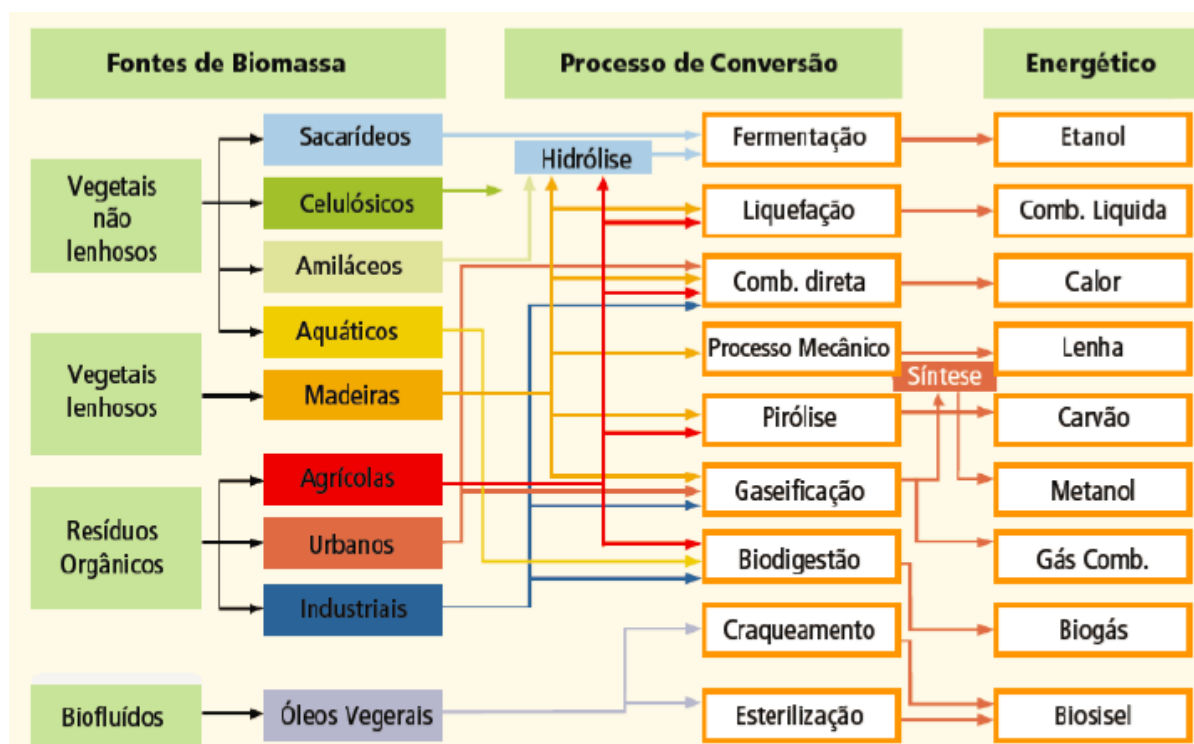


Fonte: BUCKERIDGE (2007).

Ainda sobre biomassa, existem vários tipos de sistemas de conversão de biomassa em energia. Esses sistemas de conversão podem ser comparados em relação a parâmetros como: eficiência energética, emissões de carbono e custos de produção. A adequação de cada processo depende mais da infraestrutura existente e das condições de mercado, do que das condições características de funcionamento de cada processo (BNDES, 2011).

A Figura 5 ilustra as principais fontes de biomassa existentes, as formas de conversões utilizadas para cada tipo e a energia que pode ser gerada.

Figura 5 – Processos de conversão energética da biomassa.



Fonte: Atlas de Energia Elétrica do Brasil (ANELL, 2002) *apud* OLIVEIRA, 2014.

### 3.3 Aspectos Gerais da Carnaúba

#### 3.3.1 Características da carnaúba e Locais de Extração

A carnaúba, *Copernícia prunifera*, é uma espécie de palmeira que tem como uma de suas características se desenvolver próximo a margens de rios da região nordeste do Brasil. Esta planta também existe em regiões da África Equatorial, Ásia e em alguns países sul-americanos. A Carnaúba é conhecida pelo seu grande valor comercial do pó cerífero presente em suas folhas. Após a retirada da cera, o material restante é denominado de palha de carnaúba ou bagana e os principais componentes desta palha são a celulose, lignina e hemicelulose (CÂMARA SETORIAL DA CARNAÚBA, 2009).

“Este vegetal, devido a sua resistência natural a diferentes condições climáticas, apresenta a característica de ser de fácil plantio, pois é totalmente adaptada a regiões de clima seco e quanto



mais a quantidade de luz solar, maior é a sua produtividade” (CÂMARA SETORIAL DA CARNAÚBA, 2009).

As folhas da carnaúba se desenvolvem formando um conjunto em forma esferoidal e a sua copa apresenta uma tonalidade característica verde levemente azulada em decorrência da cera que recobre a lâmina. Suas folhas formam um leque que apresenta comprimentos de até 1,5 m (NETO, 2004 *apud* ALVES, 2008).

A densidade dos carnaubais relaciona-se com o teor de argila presente no solo onde a planta se desenvolveu. Nos solos aluvionares, que apresentam teores mais altos de argila, há uma maior ocorrência da carnaubeira, enquanto nos tabuleiros, mais distantes das margens dos rios, onde o teor de argila no solo é menor, os carnaubais são mais escassos e menos densos (ALBUQUERQUE; CESTARO, 1995 *apud* ALVES, 2008).

A Figura 6 apresenta a *Copernícia prunífera* na região de Russas, no estado do Ceará, que é um dos estados que mais utiliza esta espécie como fonte de renda.

Figura 6 – Carnaubal Plantado em Russas, CE.



Fonte: ALVES (2008).

A Figura 7 apresenta a distribuição da planta em estudo pela região nordeste do país. Percebe-se pela ilustração que é um vegetal abundante em toda a região, mesmo após séculos de ocupação humana por cidades e zonas de plantio de outras culturas, o que reduziu a área ocupada por esta espécie de vegetal.

Figura 7 – Distribuição da Carnaúba na Região Nordeste.



Fonte: CÂMARA SETORIAL DA CARNAÚBA (2008).

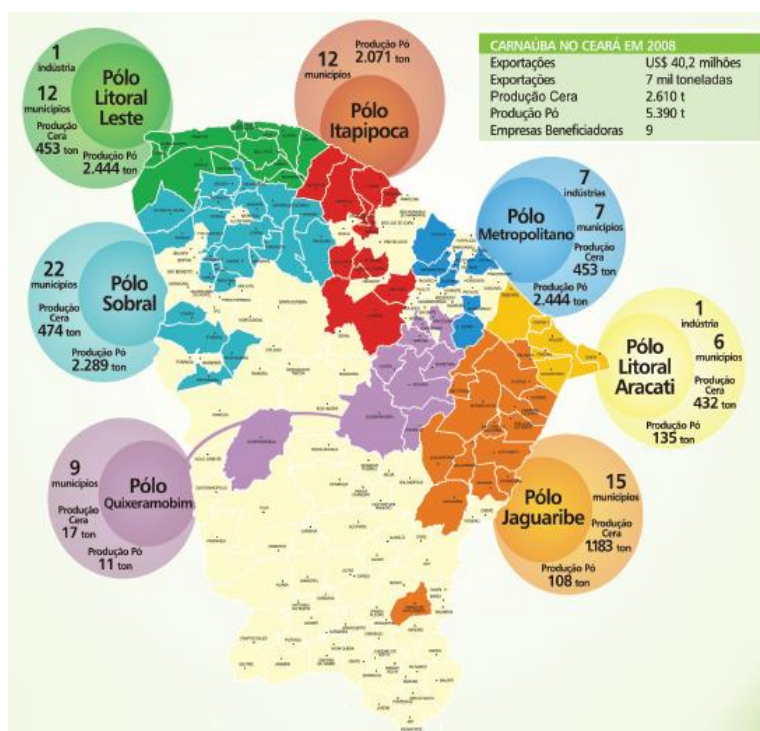
### 3.3.2 Principais Polos de Produção e Aplicações econômicas

Segundo Carvalho e Gomes (2008) *apud* Marques (2012), esta espécie vegetal pode ser aproveitada completamente, pois os seus frutos servem como fonte nutricional, o tronco e as folhas são utilizados como fonte de matéria – prima em atividades de construção e artesanato. O tronco é utilizado como material para construção de edificações, como currais e coberturas de estruturas residenciais, pois a carnaúba possui resistência e durabilidade adequadas para este tipo de aplicação.

A grande versatilidade do uso da carnaúba pode ser observada também em sua cera que é utilizada como revestimentos de cápsulas de medicamentos, cera para uso dental, produtos direcionados ao tratamento de cabelo e pele além da sua aplicação na confecção de materiais como vernizes, tintas, esmaltes, sabonetes, fósforos, isolantes, graxas de sapato, entre outros tipos de produtos (GOMES; LEITE et al, 2009 *apud* MARQUES, 2012).

Na Figura 8 estão apresentados os principais polos de produção de cera de carnaúba no ano de 2008.

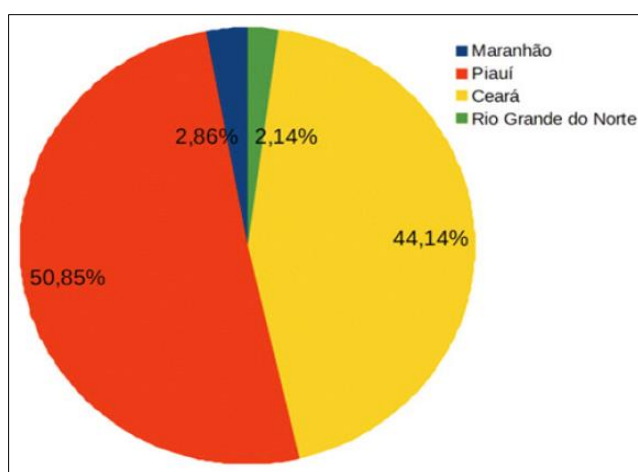
Figura 8 – Polos de Produção de carnaúba do Ceará em 2008.



Fonte: Câmara Setorial da Carnaúba (2008).

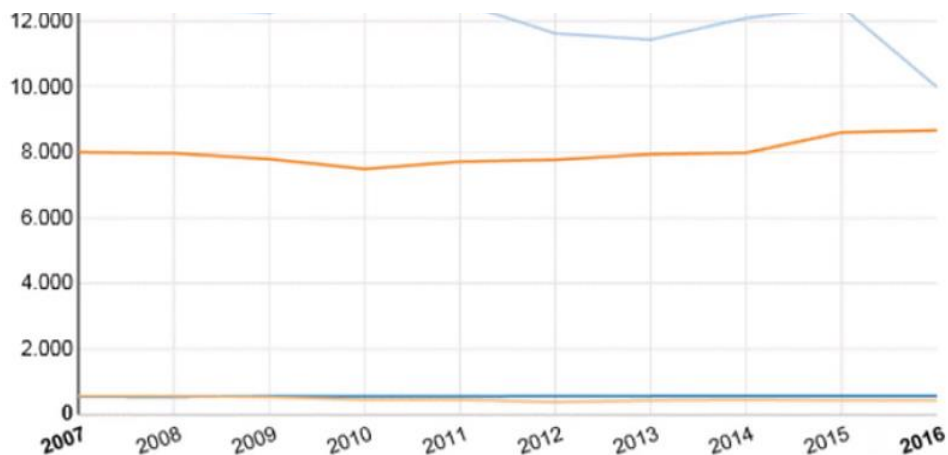
Observa-se nas Figuras 9 e 10 que o Ceará apresenta uma produção de cerca de 8 mil toneladas de cera de carnaúba por ano e é também o segundo maior em quantidade de polos de produção, segundo dados do IBGE de 2006.

Figura 9 – Participação relativa dos estados na extração de pó de carnaúba em 2016.



Fonte: CIDADE VERDE (2017).

Figura 10 – Produção de carnaúba (em toneladas), no Período de 2007 a 2016.



Fonte: CIDADE VERDE (2017).

A produção nacional apresentou uma queda de 10,1% em relação ao ano de 2015, atingindo uma produção de cerca de 17.957 toneladas. O valor total da produção foi avaliado em R\$187,5 milhões. A Região Nordeste foi responsável pela produção total de cera de carnaúba, com destaque para os Estados do Piauí e Ceará, que juntos produziram 96,3% do total de cera produzida no país (IBGE, 2016).

O Piauí é o maior produtor nacional, com uma produção anual de mais de nove mil toneladas por ano de pó de carnaúba. O estado sofreu uma redução de 19,8% em virtude, principalmente, da má formação da palha da carnaúba que foi ocasionada pelo período de falta de chuva prolongado ocorrido em algumas regiões, e pela escassez de mão de obra na atividade de extração do pó. O Cartograma 1, em Anexo 1, auxilia na visualização dos municípios produtores de pó cerífero de carnaúba do país (IBGE, 2016).

O Piauí é o maior produtor de cera de carnaúba, todavia, o estado do Ceará, que atualmente está em segundo lugar no ranking de maiores produtores de cera, possui uma produção anual que representa 44,14 % do total. O Ceará ocupa uma posição de destaque com uma produção de 8.666 toneladas em 2016. Em 2007, o Piauí possuía 59,48 % da produção nacional de cera, tendo produzido 13.359 toneladas, enquanto o Ceará participava com 35,62 % da produção, quando gerou cerca 8.001 toneladas deste produto (CIDADE VERDE, 2017).

Destaca-se ainda que o estado cearense concentra a maior parte das indústrias compradoras do pó de carnaúba que a utilizam para transformar em cera. A produção extrativa em 2016 aumentou em 5,8 %, totalizando uma produção de 7.307 toneladas, possuindo também seis municípios do estado entre os 20 maiores produtores do país. O Município de Granja destaca-se

mais uma vez como o primeiro lugar na produção com 1.875 toneladas, e o Município de Camocim, com 1.039 toneladas, ocupando a segunda posição, como está apresentado na Tabela 1 (IBGE, 2016).

Tabela 1 – Produção de pó cerífero de carnaúba, dos 20 principais produtores – 2016.

| Municípios produtores e Respectivas Unidades da Federação | Carnaúba (pó cerífero)   |                   |           |
|---|--------------------------|-------------------|-----------|
|   | Quantidade Produzida (t) | Participações (%) |           |
|   |                          | Relativa          | Acumulada |
| Brasil  | 17957                    | 100               | -         |
| Granja – CE   | 1875                     | 10,4              | 10,4      |
| Camocim – CE  | 1039                     | 5,8               | 16,2      |
| Campo Maior – PI  | 819                      | 4,6               | 20,8      |
| Piripiri – PI   | 629                      | 3,5               | 24,3      |
| Santana do Acaraú – CE                                    | 620                      | 3,5               | 27,7      |
| Piracuruca – PI   | 615                      | 3,4               | 31,2      |
| Coreaú – CE   | 482                      | 2,7               | 33,9      |
| Araioses – MA   | 450                      | 2,5               | 36,4      |
| Castelo do Piauí – PI                                     | 383                      | 2,1               | 38,5      |
| Floriano – PI   | 340                      | 1,9               | 40,4      |
| Nossa Senhora de Nazaré – PI                              | 318                      | 1,8               | 42,2      |
| Parnaíba – PI   | 275                      | 1,5               | 43,7      |
| Picos – PI  | 269                      | 1,5               | 45,2      |
| São Miguel do Tapuio – PI                                 | 261                      | 1,5               | 46,6      |
| Esperantina – PI  | 252                      | 1,4               | 48        |
| Luís Correia – PI   | 244                      | 1,4               | 49,4      |
| Oeiras – PI   | 242                      | 1,3               | 50,7      |
| José de Freitas – PI                                      | 218                      | 1,2               | 52        |
| Moraújo – CE  | 218                      | 1,2               | 53,2      |
| Morrinhos – CE  | 213                      | 1,2               | 54,4      |

Fonte: IBGE, Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Agropecuária, Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura 2016.

### 3.4 Caracterização e Densificação da Biomassa

A avaliação da biomassa para sua aplicação como fonte de energia é realizada através da caracterização, identificando a composição química com a utilização da análise elementar e outras características identificadas com a aplicação da análise imediata. Atualmente, existe o processo de densificação no qual a biomassa tem seu volume reduzido. Nesta seção, são apresentadas cada

uma destas etapas de análise e transformação do material, utilizando trabalhos científicos existentes sobre o assunto.

### 3.4.1 Análise Elementar

A avaliação do potencial energético de um determinado combustível tem como uma de suas principais etapas a obtenção de informações sobre a composição química elementar. A composição química corresponde a fração, em massa seca, dos principais elementos constituintes da biomassa. Neste sentido, representa-se em percentual o teor de carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N) e enxofre (S) (PROTÁSIO, 2014).

Segundo Tavares e Santos (2013) a composição química elementar (C; H; N; S; O) corresponde ao conteúdo percentual em massa dos principais elementos que constituem a biomassa, geralmente referente a matéria seca, ou seja, sem considerar a presença da água.

A análise elementar de algumas biomassas está representada na Tabela 2.

Tabela 2 – Análise elementar para algumas biomassas.

| <b>Biomassa</b>          | <b>C %</b> | <b>H %</b> | <b>N %</b> | <b>S %</b> | <b>O %</b> | <b>Referência</b> |
|--------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------------|
| Casca de arroz           | 40,96      | 4,3        | 0,4        | 0,01       | 35,86      | SILVA (2016)      |
| Pinhão manso             | 48,98      | 6,92       | 4,56       | 0,17       | 39,36      | TOMELERI (2017)   |
| Bagaço de cana-de-açúcar | 38,85      | 5,2        | 1,0        | 0,6        | 38,9       | PONTE (2017)      |

Fonte: Autor.

### 3.4.2 Análise Imediata

Segundo Tavares e Santos (2013) a composição química imediata determina o percentual de carbono fixo, materiais voláteis, cinzas e umidade presente numa determinada biomassa, baseando-se para sua aferição na massa da mesma.

“O conhecimento desses dois índices percentuais permite estimar o grau de combustão de uma biomassa e o tempo de queima da mesma, maximizando assim, o desenho do projeto de obtenção de energia a partir de biomassas vegetais” (TAVARES; SANTOS, 2013).

Os conceitos e definições sobre cada um destes indicadores são descritos nas seções a seguir.

### 3.4.2.1 Teor de Cinzas

Conforme Nogueira e Rendeiro (2008), os resíduos resultantes da combustão dos componentes orgânicos e oxidações dos inorgânicos são caracterizadas como teor de cinzas. Assim, as cinzas são os materiais restantes gerados pelo processo de combustão da biomassa, a qual se processa em altas temperaturas, tornando-se necessário o conhecimento do comportamento destas cinzas para evitar operações inadequadas.

A Tabela 3 mostra os valores para o teor de cinzas encontrado na literatura para algumas biomassas utilizadas como fonte de energia térmica.

Tabela 3 – Teor de Cinzas de diversas biomassas.

| <b>Biomassa</b>             | <b>TC (%)</b> | <b>Referência</b>      |
|-----------------------------|---------------|------------------------|
| Casca de arroz              | 15,51         | VIEIRA (2012)          |
| Bagaço de cana-de-açúcar    | 15,40         | PONTE (2017)           |
| Pinhão manso                | 7,71          | TOMELERI et al. (2000) |
| Casca de Licuri (triturada) | 7,38          | SCALET (2015)          |
| Brachiaria spp.             | 8,80          | FLORES & YAMAJI (2009) |

Fonte: Autor.

### 3.4.2.2 Teor de Umidade

De acordo com Nogueira e Lora (2003) a umidade é a medida da quantidade de água livre na biomassa, e que pode ser avaliada pela diferença entre os pesos de uma amostra, antes e logo após ser submetida ao processo de secagem.

Segundo Mckendry (2002) duas formas de teor de umidade são de interesse, a umidade intrínseca (teor de umidade do material sem a influência de efeitos climáticos) e a umidade extrínseca (a influência das condições meteorológicas existentes durante o período de colheita da biomassa, que está sendo analisada).

A Tabela 4 mostra os valores de umidade encontrados na literatura para algumas biomassas utilizadas como fonte de energia térmica.

Tabela 4 – Teor de Umidade de diversas biomassas.

| <b>Biomassa</b>             | <b>TU (%)</b> | <b>Referência</b>      |
|-----------------------------|---------------|------------------------|
| Casca de arroz              | 11,31         | VIEIRA (2012)          |
| Bagaço de cana-de-açúcar    | 14,00         | PONTE (2017)           |
| Pinhão manso                | 15,70         | TOMELERI et al. (2000) |
| Casca de Licuri (triturada) | 5,10          | SCALET (2015)          |
| Sabugo de milho             | 16,93         | VIEIRA (2012)          |

Fonte: Autor.

### 3.4.2.3 Teor de Voláteis

Segundo Mckendry (2002) *apud* Vieira (2012), o teor de voláteis é a parte da biomassa que evapora como um gás (incluindo umidade) por aquecimento, ou seja, o teor de voláteis é quantificado medindo-se a fração de massa da biomassa, que volatiliza durante os 15 minutos de aquecimento de uma amostra padronizada e previamente seca, em atmosfera inerte, até temperaturas de aproximadamente 850 °C.

A Tabela 5 mostra os valores de teor de voláteis encontrados na literatura para diversas biomassas que estão sendo estudadas como fontes de energia térmica.

Tabela 5 – Teor de Voláteis de algumas biomassas.

| <b>Biomassa</b>             | <b>TV (%)</b> | <b>Referência</b>      |
|-----------------------------|---------------|------------------------|
| Casca de arroz              | 82,09         | VIEIRA (2012)          |
| Bagaço de cana-de-açúcar    | 69,00         | PONTE (2017)           |
| Pinhão manso                | 65,56         | TOMELERI et al. (2000) |
| Casca de Licuri (triturada) | 75,73         | SCALET (2015)          |
| Sabugo de milho             | 98,19         | VIEIRA (2012)          |

Fonte: Autor.

### 3.4.2.4 Teor de Carbono Fixo

O teor de carbono fixo (CF) representa a massa restante após a liberação de compostos voláteis, excluindo as cinzas e teores de umidade (MCKENDRY, 2002).

Segundo Bataus *et al.* (1989) *apud* Andrade (2009), o teor de carbono fixo do carvão vegetal é uma das características essenciais para a realização de uma análise qualitativa, uma vez que está diretamente relacionado com o poder calorífico.



A lignina é o principal componente químico responsável pela existência de carbono fixo na biomassa, o que contribui para que ocorra a liberação de energia durante o processo de queima direta (CASTRO, 2011).

Segundo Chaves et al., (2013), o teor de carbono fixo tem uma relação direta com o poder calorífico, isto é, quanto maior o teor de carbono fixo maior o conteúdo energético.

A Tabela 6 mostra os valores de carbono fixo para algumas biomassas conforme a literatura.

Tabela 6 – Teor de Carbono Fixo para algumas biomassas.

| <b>Biomassa</b>             | <b>CF (%)</b> | <b>Referência</b>      |
|-----------------------------|---------------|------------------------|
| Casca de arroz              | 2,39          | VIEIRA (2012)          |
| Bagaço de cana-de-açúcar    | 15,40         | PONTE (2017)           |
| Pinhão manso                | 26,72         | TOMELERI et al. (2000) |
| Casca de Licuri (triturada) | 16,89         | SCALET (2015)          |
| Sabugo de milho             | 1,11          | VIEIRA (2012)          |

Fonte: Autor.

### **3.4.3 Poder Calorífico**

O poder calorífico de um material é quantificado pela totalidade de energia que é liberada quando o material sofre o processo de queima. O calor gerado durante a combustão de diferentes espécies vegetais ou de resíduos madeireiros podem ser diversos, dependendo de suas propriedades físicas, químicas e também características morfológicas (ALMEIDA, 2010).

#### **3.4.3.1 Poder Calorífico Superior**

O poder calorífico é denominado poder calorífico superior (PCS) quando a combustão ocorre com um volume constante e no qual, a água formada durante o processo é condensada e o calor latente do vapor d'água não se dissipa (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1984; BRAND, 2010; FRIEDL *et al.*, 2005).

“Um acréscimo do teor de carbono fixo e um decréscimo no teor de materiais voláteis proporciona um aumento no poder calorífico superior” (TRUGILHO; SILVA, 2001; VALE; DIAS; SANTANA, 2010 *apud* NEVES 2012).

Quanto maior a temperatura final de carbonização maior o teor de carbono fixo, menores o rendimento gravimétrico e o teor de materiais voláteis e maior o poder calorífico superior do carvão vegetal. Ressalta-se que o teor de umidade é o grande responsável pela diminuição do poder calorífico nos combustíveis tradicionais (NEVES, 2012).

A Tabela 7 mostra os valores de PCS encontrados na literatura para os resíduos agrícolas estudados.

Tabela 7 – Poder Calorífico Superior (PCS) de diversas biomassas.

| <b>Biomassa</b>             | <b>PCS (MJ/kg)</b> | <b>Referência</b>      |
|-----------------------------|--------------------|------------------------|
| Casca de arroz              | 14,67              | VIEIRA (2012)          |
| Bagaço de cana-de-açúcar    | 15,20              | PONTE (2017)           |
| Pinhão manso                | 17,08              | TOMELERI et al. (2000) |
| Araucária                   | 19,54              | MATTOS et al. (2006)   |
| Casca de Licuri (triturada) | 19,46              | SCALET (2015)          |

Fonte: Autor.

### 3.4.3.2 Poder Calorífico Inferior

O poder calorífico inferior (PCI) é a quantidade de energia existente quando não é considerada a quantidade de calor latente de condensação oriunda da umidade presente nos produtos originados pelo processo combustão (BRAND, 2010 *apud* NEVES 2012).

De acordo com a ASTM (2007) *apud* Lizcano (2015) o poder calorífico inferior (PCI) pode ser descrito como a quantidade de calor que é gerada durante o processo combustão de uma quantidade unitária de combustível( líquido ou sólido), quando é queimado a uma pressão constante de cerca de 0,1 MPa (1 atm), onde a água formada durante a queima permanece na forma de vapor após o processo de combustão.

“O PCI, ao contrário do PCS, assume que a água formada pela combustão assim como aquela que constitui o combustível permanece em estado de vapor” (HUGOT, 1986 *apud* LIZCANO, 2015).

### 3.4.4 Densidade a Granel e Aparente

“A densidade expressa a quantidade de material por unidade de volume, portanto, quanto maior, mais concentração há de energia” (FURTADO *et al.*, 2010).

Dentre os diversos tipos de densidades, em termos práticos de operação com aparelhos de redução, a mais importante é a densidade a granel, pois esta determina o espaço útil a ser ocupado dentro destes equipamentos (BRITO *et al.*, 1982).

A determinação da densidade de um material sólido, como é o caso do carvão vegetal, é realizado através da aferição do peso do carvão contido em uma caixa de 1 m<sup>3</sup> de volume. A relação entre o peso medido e o volume é denominada de densidade a granel, que é dada em kg/m<sup>3</sup>. (BRITO *et al.*, 1982).

### **3.4.5 Processo de Densificação (Briquetagem)**

Segundo Padilla (2016) *apud* Távora (2017) existe um potencial elevado para a produção de briquetes a ser explorado no Brasil. Observa-se pela safra brasileira entre os anos de 2015 a 2016, que o país produziu cerca de 665,6 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, sendo que 367,6 milhões de toneladas foram produzidas pelo estado de São Paulo. Considerando-se que cada tonelada de cana-de-açúcar colhida tem cerca de 140 kg de palha, 93,19 milhões de toneladas foram geradas nessa safra.

A China e a Inglaterra foram as nações pioneiras no processo de briquetagem, no qual se aglomerava de forma manual as partículas, com o uso de substâncias aglomerantes. Entretanto, foi na França, por volta de 1842, que a comercialização de briquetes começou. Estes eram utilizados como fonte de energia térmica para alimentar vários tipos de caldeiras e fornos (MELO 1999).

Nos dias atuais, são produzidos briquetes em grande quantidade em diversas partes do mundo como é o caso dos Estados Unidos, em países da Europa e nações do Sudeste Asiático. Os materiais utilizados nestas nações podem ser de origem vegetal e também originários do carvão mineral (MELO 1999).

Segundo Ferreira *et al.* (2012) *apud* Tavares e Santos (2013), a utilização dos resíduos como fonte de energia através de sua densificação, compactação ou aglomeração proporciona diversos benefícios, quando comparada a sua utilização em estado *in natura*, principalmente, em relação ao armazenamento, manuseio, aumento de densidade e elevação do poder calorífico.

O briquete é uma estrutura constituída de biomassa fabricada através um esforço de compressão, com uma carga média entre de 6 a 8 toneladas (tensão de 90 a 140 kg/cm<sup>2</sup>), gerando temperaturas entre 170 a 270 °C numa câmara de briquetagem, visando a decomposição parcial da lignina. O teor de umidade, em base úmida, varia entre 5 e 15%, sendo o teor de umidade ideal

próximo de 8 %, com ou sem aglutinante, com uma densidade entre 1,0 a 1,5 t/m<sup>3</sup>, apresentando peças cilíndricas ou hexagonais entre 70 a 100 mm (GENTIL, 2008).

De acordo com Quirino (2000) o controle do teor de umidade da biomassa que será utilizada na confecção dos briquetes é um fator muito importante, uma vez que influenciará a qualidade do briquete, sendo que o valor adequado de umidade seria entre 8% e 12%.

A compactação realizada com a aplicação de elevada pressão, consiste na obtenção de um produto com maior densidade e maior durabilidade, especialmente em relação ao manuseio e transporte, pois em estado compactado, o material é mais fácil de transportar (GONÇALVES, 2010).

“Existem dois tipos de briquete: o simples e o composto. O simples consiste em apenas um tipo de matéria-prima. Já o briquete composto resulta da união de diversos resíduos de biomassa, evitando assim a dependência de apenas uma fonte de produção” (DANTAS, 2012).

### **3.5 Análise Mecânica**

#### **3.5.1 Ensaio de Compressão Diametral**

A resistência dos briquetes à compressão foi determinada para se prever o seu comportamento mecânico submetido a uma determinada carga ou esforço, considerando a sua posição de armazenamento. No ensaio, o briquete é submetido à pressão contínua e progressiva até que o mesmo fracture. A resistência à compressão é um parâmetro significativo na avaliação do briquete ao manuseio e condições de trabalho (MELO 2000 *apud* GONÇALVES, 2010).

#### **3.5.2 Ensaio de Friabilidade**

A realização de ensaios de friabilidade em briquetes de biomassa, também denominados testes de tamboreamento, são realizados com a utilização de um equipamento denominado de friabilômetro. O equipamento apresenta funcionamento similar aos que são usados pela indústria farmacêutica. O objetivo principal deste ensaio é avaliar o grau de friabilidade dos produtos (TÁVORA, 2017).

Com a elevação da demanda pelo produto, houve um aumento nas pesquisas relacionadas com a fabricação de briquetes e um estudo sobre a padronização de uma metodologia de ensaio

para esse importante parâmetro do produto final se mostra de fundamental importância para a caracterização (TÁVORA, 2017).

O friabilômetro constitui-se por um cilindro, onde são colocados os comprimidos que serão testados. O cilindro gira em torno do próprio eixo a uma velocidade 25 rpm (rotações por minuto). O número de voltas do cilindro corresponde ao número total de quedas que os materiais testados sofrerão (DCTECH, 2017).

### 3.6 Análise Térmica

A análise térmica de um material é realizada com a utilização de técnicas que tornam possível realizar uma avaliação quantitativa das modificações nas propriedades físicas ou químicas de um determinado material em função da variação controlada de parâmetros de temperatura ou tempo (MOTHÉ; AZEVEDO, 2008 *apud* MARQUES, 2012).

#### 3.6.1 Análise Termogravimétrica

A análise termogravimétrica (TG) consiste numa técnica termoanalítica que utiliza um equipamento denominado de termobalança que constitui-se por um programador de temperatura, além de outros componentes que realizam a aferição da massa de forma constante de uma determinada amostra e acompanham sua perda e/ou ganho de massa em função da variação de temperatura (DENARI, 2012 *apud* PONTE, 2017).

Na análise termogravimétrica mede-se a variação de massa de uma substância quando é submetida a uma programação de controle de temperatura. A termogravimetria derivada (DTG) é um recurso matemático que fornece a derivada primeira da curva TG e seus picos determinam áreas proporcionais à perda de massa sofrida pela amostra (PEREIRA; SCHNITZLER; CARVALHO FILHO, 2005, *apud* PONTE, 2017).

Segundo Ionashiro (2004) na termogravimetria derivada (DTG), a derivada da variação de massa em relação ao tempo ( $dm/dt$ ) é registrada em função da temperatura ou tempo, como pode-se observar na equação 1.

$$\frac{dm}{dt} = f(T) \quad (\text{Equação 1})$$

Portanto, neste método são obtidas curvas que correspondem à derivada primeira da curva TG e nos quais os degraus são substituídos por picos que delimitam áreas proporcionais às alterações de massa sofridas pela amostra (IONASHIRO, 2004).

Segundo Brown (1988) *apud* Marques (2012) através desta análise é possível identificar as modificações ocasionadas pelo aquecimento da substância, sendo possível determinar o intervalo de temperatura em que ocorre a decomposição inicial da massa.

## 4 METODOLOGIA

Este estudo foi realizado no Laboratório de Referência em Biocombustíveis – Professor Expedito Parente (Larbio), pertencente ao NUTEC (Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará), localizado na Universidade Federal do Ceará (UFC), Campus do Pici.

Na Tabela 8 estão apresentados todos os equipamentos e normas utilizados na realização deste trabalho. Os detalhes sobre os equipamentos, operação e especificações das normas serão expostas ao longo dessa seção.

Tabela 8 – Normas e Equipamentos utilizados nas análises experimentais.

| Análise |                      | Norma                      | Equipamento               |   |
|---------|----------------------|----------------------------|---------------------------|---|
|         |                      |                            | Marca                     | Modelo                                  |
| 1       | Cinzas               | NBR 13999 (ABNT, 2003b)    | Mufla QUIMIS              | Q.318.24                                |
| 2       | Voláteis             | NBR 8112 (ABNT, 1986)      | Mufla QUIMIS              | Q.318.24                                |
| 3       | Umidade              | NBR 8112 (ABNT, 1986)      | Determinador MARTE        | ID200                                   |
| 4       | Carbono Fixo         | NBR 8112 (ABNT, 1986)      | Manipulação algébrica     | Manipulação algébrica                   |
| 5       | PCS                  | ASTM E711-87 (ASTM, 2004)  | Calorímetro digital IKA   | C1                                      |
| 6       | PCI                  | -                          | Manipulação algébrica     | Manipulação algébrica                   |
| 7       | Compressão Diametral | NBR 7222 (ABNT, 2011)      | Prensa de compressão EMIC | PCE 100C                                |
| 8       | Densidade a Granel   | NBR ISO 3852 (ABNT, 2009)  | Béquer Astral Científica  | 1000 ml                                 |
| 9       | Densidade Aparente   | NBR ISO 2420 (ABNT, 2015)  | Paquímetro Starrett       | 125MEA                                  |
| 10      | Densidade Energética | -                          | Manipulação algébrica     | Manipulação algébrica                   |
| 11      | Friabilidade         | -                          |                           |   |
| 12      | Termogravimetria     | ASTM E1131-08 (ASTM, 2008) | TA Instruments            | SDT Q600 V20.9 BUILD 20                 |
| 13      | Análise Elementar    | ASTM D3176-15 (ASTM, 2015) | Perkin Elmer              | 2400 serie II CHNS/O Elemental Analyzer |

Fonte: Autor.

#### 4.1 Biomassa Utilizada

No desenvolvimento deste trabalho foram utilizados a palha e o talo da carnaúba (*Copernicia prunifera*) que foram coletados na cidade de Morrinhos-CE. As podas foram coletadas no mês de janeiro de 2017, seus acondicionamentos foram feitos em um *container*, em temperatura ambiente, em Fortaleza, onde localiza-se o NUTEC, sob proteção contra radiação solar direta e/ou chuva.

Para a preparação do material para a realização das análises, o mesmo passou pela etapa de coleta de uma amostra no local de acondicionamento, e posterior redução de seu tamanho. Esta redução exigia a trituração das podas, para tanto, teve-se o auxílio de um triturador TR200 da marca Trapp, 35 de 1,5 CV de potência, pertencente a EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), que fica localizada no Campus do Pici.

A Figura 11 exibe as amostras de talo e palha de carnaúba utilizada para a realização deste trabalho.

Figura 11 – Amostras de Talo e Palha de Carnaúba.



Fonte: Autor.

Por último, o material triturado foi peneirado manualmente em uma peneira Granutest de 4 mm e posteriormente, foi mantido dentro de um saco de polímero fechado, a fim de evitar grandes trocas de umidade com o ambiente.

Também foram produzidos briquetes de palha e talo de carnaúba na forma *in natura* e em forma de blendas constituídas de palha e talo na proporção de 50% de cada material, para os experimentos em quadruplicata e os resultados comparados com os da biomassa *in natura*.



## 4.2 Análise Elementar

As análises elementares que resultaram nos teores de carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N), enxofre (S) e oxigênio (O), foram solicitadas ao Laboratório de Biomassa da Embrapa, seguindo a norma ASTM D3176-15 (ASTM, 2015) adaptada, com um equipamento Perkin Elmer modelo 2400 Series II CHNS/O Elemental Analyzer, operando na configuração de CHNS.

As amostras de palha e talo *in natura* de carnaúba foram trituradas e peneiradas, com o auxílio de uma peneira de 60 mesh. Após o peneiramento, o material foi seco em estufa à temperatura de  $(105 \pm 10)$  °C. Para a realização do experimento, utilizou-se cerca de 2 mg das amostras de cada biomassa e foram colocados em um porta-amostra de estanho. Posteriormente, os conjuntos (amostras + porta-amostras) foram posicionados no carrossel do equipamento para a realização das medições.

O teor de oxigênio (O) foi determinado por diferença, conforme Equação 2 (PROTÁSIO, 2014).

$$\% O = 100 - (\% C) - (\% H) - (\% N) - (\% S) \quad (\text{Equação 2})$$

Na qual:

- O é o teor de oxigênio (%);
- C é o teor de carbono (%);
- H é o teor de hidrogênio (%);
- S é o teor de enxofre (%).

## 4.3 Análise Imediata da Biomassa

As análises imediatas, ou seja, caracterização pelos componentes de voláteis, cinzas e carbono fixo dos materiais, foram obtidas fazendo-se uso de um Forno Mufla QUIMIS Q.318.24 como mostra a Figura 12.

As amostras foram pesadas em uma balança de precisão, antes de serem colocadas nos cadinhos para a realização dos experimentos. Foi utilizado um dessecador (Figura 13) para que fosse retirado o ar através de uma bomba de vácuo e em seguida, colocado em uma sala fria para que resfriasse até a temperatura ambiente, conforme a norma NBR 13999 recomenda.

Figura 12 – Forno Mufla QUIMIS Q.318.24.



Fonte: Autor.

Figura 13 – Dessecador.



Fonte: Autor.

#### 4.3.1 Determinação do Teor de Cinzas

Para o teor de cinzas (TC), seguiram-se as orientações da NBR 13999 (ABNT, 2003b). Colocou-se de 1-2 g da amostra nos cadinhos. Em seguida, os cadinhos foram conduzidos para um Forno Mufla pré-aquecido a  $(530 \pm 10) ^\circ\text{C}$ , permanecendo durante 4 horas, até que a amostra queimasse completamente. Após serem retirados do Forno Mufla, os cadinhos foram colocados em um dessecador até resfriarem e em seguida pesados. De acordo com a Equação 3 foi calculado o teor de cinzas:

$$TC = \frac{m_i - m_f}{m} \times 100 \quad (\text{Equação 3})$$

Na qual:

- TC= teor de cinzas, em %;
- $m_i$  = massa do cadinho, em g;
- $m_f$  = massa do cadinho + resíduo, em g;
- $m$  = massa da amostra, em g.

### 4.3.2 Determinação do Teor de Umidade

Executaram-se as análises de umidade (TU) pelo método da balança analítica (Figura 14) para a biomassa *in natura* e utilização convencional da estufa para os briquetes, adaptando-se a normatização prevista na NBR 14929 (ABNT, 2003a). A umidade foi expressa em base seca com base na Equação 3 (NOGUEIRA, LORA, 2003).

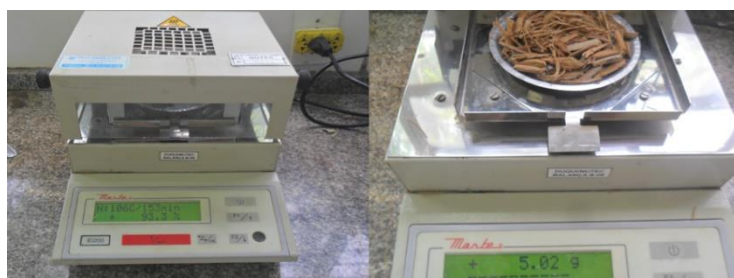
O teor de umidade para as amostras *in natura* foi realizado utilizando-se cadinhos previamente secos, onde foram colocados 5 g de biomassa triturada e úmida a 105 °C. Para o teor de umidade dos briquetes foi utilizada uma estufa (105 ± 10) °C. Os briquetes foram colocados inteiros em cadinhos e colocados na estufa por um período de 6 horas. Após esse tempo, os cadinhos foram pesados. O procedimento foi repetido até se obter um valor de massa constante. O teor umidade foi calculado pela Equação 4:

$$TU = \frac{M_{úmida} - M_{seca}}{M_{seca}} \times 100 \quad (\text{Equação 4})$$

Na qual:

- MU = Massa úmida;
- MS = Massa seca.

Figura 14 – Analisador de Umidade Infravermelho



Fonte: Autor.

### 4.3.3 Determinação do Teor de Voláteis

Para a determinação do teor de voláteis foi utilizada a norma NBR 8112 de 1986. A Figura 15 mostra o cadinho de platina utilizado para a realização do ensaio de teor de voláteis, colocado na tampa da mufla e, em seguida, colocado dentro do Forno Mufla, conforme a norma recomenda.

Com os cadinhos secos e à temperatura ambiente, colocou-se 1 g da amostra na tampa do Forno Mufla regulada a  $(900 \pm 10)$  °C e mantidos durante 3 minutos. Após o tempo determinado, foram retirados os cadinhos da tampa Forno Mufla e foram colocados dentro do Forno Mufla por um período de 7 minutos, perfazendo um total de 10 minutos, conforme a norma recomenda. Após o período de 10 minutos no Forno, os cadinhos foram conduzidos para um dessecador para resfriar e em seguida pesados, para obter-se o teor de voláteis. Por meio da diferença entre a massa final e inicial determinou-se o teor de voláteis. O teor de voláteis foi calculado pela Equação 4:

$$TV = \frac{m_i - m_f}{m} \times 100 \quad (\text{Equação 5})$$

Na qual:

- TV = teor de voláteis, em %;
- $m_i$  = massa inicial do cadinho + amostra, em g;
- $m_f$  = massa final do cadinho + amostra, em g;
- $m$  = massa da amostra, em g.

Figura 15 – Cadinho de Platina e Forno Mufla (Teor de Voláteis).



Fonte: Autor.

#### 4.3.4 Determinação do Teor de Carbono Fixo

O teor carbono fixo foi calculado utilizando-se a equação presente na norma NBR 13999, somando o teor de voláteis e o teor de cinzas e o resultado desta soma subtraiu-se do número 100. O resultado final destes cálculos é o teor de carbono fixo presente em cada amostra.

Segundo Santos (2008), o carbono fixo é o combustível residual da liberação dos compostos voláteis, excluindo os teores de umidade e as cinzas. Para a determinação do teor de CF foi utilizado a Equação 6:

$$CF = 100 - (TC + TV) \quad (\text{Equação 6})$$

Na qual:

- CF = teor de carbono fíco, em %;
- CZ = teor de cinzas, em %;
- MV = teor de voláteis, em %.

#### 4.4 Determinação do Poder Calorífico

##### 4.4.1 Poder Calorífico Superior

Verificou-se o Poder Calorífico Superior (PCS) de cada material *in natura*, pela ASTM E711-87 (ASTM, 2004). Os estudos foram realizados em um calorímetro IKA C1(Figura 16). O procedimento foi realizado em quadruplicata, para cada amostra.

Figura 16 – Calorímetro IKA C1.



Fonte: Autor.

#### 4.4.2 Determinação do Poder Calorífico Inferior

Para a obtenção dos valores do poder calorífico inferior de cada biomassa analisada neste trabalho foi utilizada a equação descrita por Brito (1993), que leva em consideração a quantidade percentual de hidrogênio presente na amostra e que é obtida na análise elementar. O PCI pode ser calculado algebricamente segundo a Equação 7.

$$\text{PCI} = \text{PCS} - \left( \frac{600 \times 9H}{100} \right) \quad (\text{Equação 7})$$

Na qual:

- PCI poder calorífico inferior, em kcal/kg;
- PCS poder calorífico superior, em kcal/kg;
- H teor de hidrogênio, em %.

#### 4.5 Processo de Densificação da Carnaúba

Os briquetes foram produzidos com o auxílio de uma prensa hidráulica Marcon MPH-15 (Figura 17), aplicando-se uma força de aproximadamente 7,5 toneladas, adquirindo-se uma pressão próxima de 37,5 MPa e um tempo de repouso de aproximadamente 10 minutos. O molde cilíndrico, constituído de aço inox, com 5 cm de diâmetro interno foi utilizado para aplicação das cargas de compressão. (Figura 18).

A altura de cada briquete foi medida com um paquímetro, imediatamente após o material compactado ser retirado da forma. Após o período de 10 minutos, a carga era liberada e o cilindro retirado como mostra a Figura 19.

Figura 17 – Prensa Hidráulica.



Fonte: Autor.

Figura 18 – Cilindro de Compressão.



Fonte: Autor.

Cada briquete foi formado com cerca de 8 g do material *in natura*. No processo de briquetagem não foram utilizados materiais aglutinantes, nem aquecimento.

Figura 19 – Cilindro Após Liberação de Carga.



Fonte: Autor.

A Figura 20 – apresenta um briquete de palha de carnaúba logo após ser retirado do cilindro de compressão. Todos os briquetes, inclusive as blendas de palha e talo foram fabricadas utilizando o mesmo procedimento experimental descrito nesta seção.

Figura 20 – Briquete de Palha de Carnaúba.



Fonte: Autor.

#### 4.5.1 Densidade à granel e densidade aparente

Para a caracterização da densidade a granel da matéria *in natura* utilizou-se a normatização adaptada da NBR ISO 3852 (ABNT, 2009). Após a matéria ser compactada, determinou-se sua densidade aparente seguindo-se uma adaptação da NBR ISO 2420 (ABNT, 2015).

Para obter a densidade a granel foi utilizado um béquer de 1000 ml e foi adicionado 40 gramas de carnaúba *in natura* e foi verificado o volume ocupado em ml, conforme a NBR 3852. Foram realizadas 4 medições de volume utilizando este método para o material *in natura* de palha, talo e blenda de carnaúba. Após as medições das médias dos volumes foi efetuado o cálculo de densidade, conforme a Equação 8.

$$\text{Densidade} = \frac{\text{massa}}{\text{Volume}} \quad (\text{Equação 8})$$

Na qual:

- Densidade           g/ml;
- Massa                g;
- Volume              ml.

Para a obtenção da densidade aparente dos briquetes foi utilizado um paquímetro da marca Starrett modelo 125 MEA, para aferir os diâmetros dos briquetes e suas espessuras. Após as



medições, os briquetes foram pesados e utilizando a Equação 8 foi obtido a densidade aparente dos briquetes

#### 4.5.2 Densidade Energética

O cálculo de densidade energética foi realizado com a utilização dos dados de densidade a granel, para o cálculo da densidade energética do material *in natura* e os resultados da densidade aparente para a obtenção da densidade energética dos briquetes de carnaúba. Também foi utilizado os resultados obtidos para o PCS das biomassas *in natura* e densificadas para a realizado do cálculo de densidade energética, conforme foi calculado por SCALET (2015) e Ponte (2017).

Foi utilizada a Equação 9, conforme SCALET (2015) relata em seu trabalho.

$$\rho_E = \rho \times PCS \quad (\text{Equação 9})$$

Na qual

- $\rho_E$  Densidade energética (kJ/cm<sup>3</sup>);
- $\rho$  Densidade (g/cm<sup>3</sup>);
- PCS Poder Calorífico Superior (MJ/kg).

## 4.6 Análise Mecânica

### 4.6.1 Ensaio de Compressão Diametral

Cada briquete foi formado com cerca de 50 g do material *in natura* (Figura 22). Na prensagem não foram utilizados materiais aglutinantes ou alguma forma de aquecimento da biomassa.

Após a fabricação dos briquetes de palha, talo e blenda (50% palha, 50% talo) foi realizada a análise de compressão diametral (CD) com o uso de uma máquina universal de ensaios EMIC - PCE 100C, pertencente ao Laboratório de Biomassa da Embrapa localizado no Campus do Pici (UFC), com célula de carga de 500 kgf, a uma velocidade constante de 3 mm/min.

O ensaio foi utilizando com uma adaptação da norma NBR 7222 (ABNT, 2011), para determinação da resistência a tração por compressão diametral em amostras cilíndricas de concreto

e argamassa. Esta norma foi utilizada, pois não há uma norma específica para a realização de ensaio de compressão diametral em briquetes.

O número de amostras empilhadas verticalmente (N), que determina a quantidade máxima de amostras que podem ser empilhadas, foi calculado utilizando a força máxima de ruptura (F<sub>Rup</sub>), que foi obtida no ensaio de compressão diametral, por um fator de segurança (FS) e pela massa (m) de cada briquete em kg.

O FS foi considerado como 300%, como sugerido por Silva et al. (2015a) e também utilizado por Ponte (2017).

A Equação 10 exhibe a equação utilizada por SILVA et al., (2015a) e por Ponte (2017) para o cálculo de N.

$$N = \frac{F_{Rup}}{FS \times M} \quad (\text{Equação 10})$$

Na qual:

- N Número de briquetes empilhados;
- F<sub>Rup</sub> Força máxima de ruptura obtida durante o ensaio CD;
- FS Fator de Segurança;
- M Resistência mecânica dos briquetes.

Com o resultado do N<sub>emp</sub> é possível realizar o cálculo da altura de empilhamento (H<sub>emp</sub>). Com o diâmetro (d) das amostras em cm, H<sub>emp</sub> é dada pela Equação 11 (SILVA et al., 2015a).

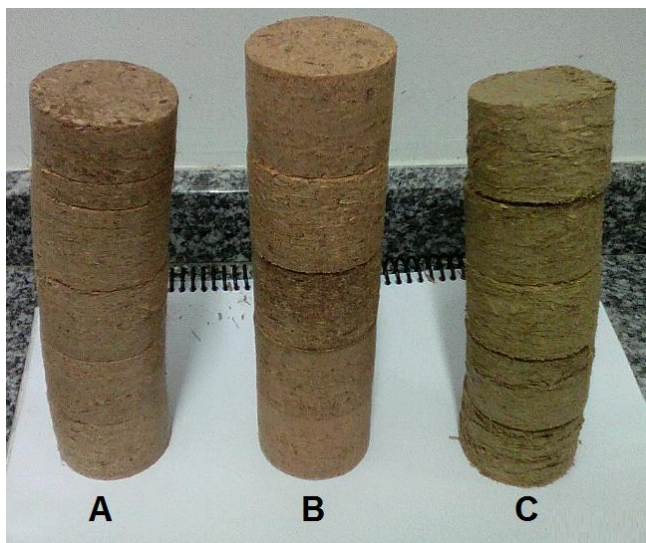
$$H = \frac{N \times d}{100} \quad (\text{Equação 11})$$

Na qual:

- H Altura de empilhamento;
- D Diâmetro dos briquetes;
- N Número de briquetes empilhados.

Na Figura 21 estão apresentados os briquetes de blenda (50% palha; 50% talo); Talo e Palha de carnaúba respectivamente, utilizados no experimento de compressão.

Figura 21 – Briquetes de Blenda (A), Talo (B) e Palha (C).



Fonte: Autor.

A Figura 22 representa a máquina universal de ensaios EMIC – PCE 100 C utilizada no ensaio de compressão diametral dos briquetes de palha, talo e blenda de carnaúba.

Figura 22 – Máquina universal de ensaios EMIC - PCE 100C.



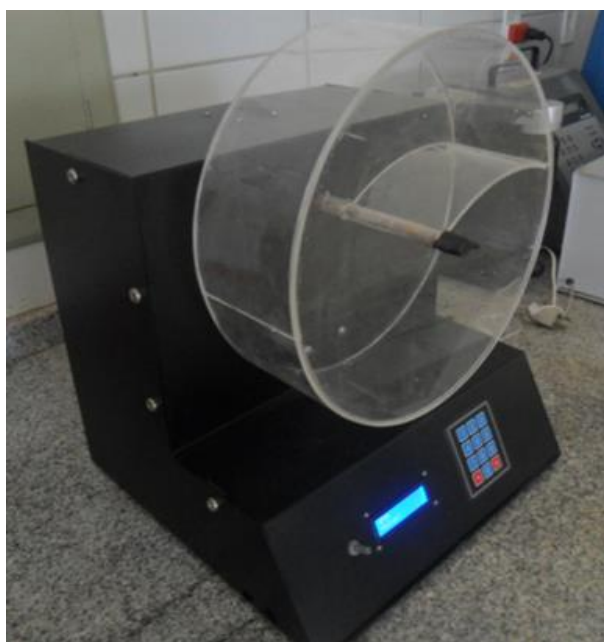
Fonte: Autor.

Para uso comercial, os briquetes devem apresentar, relativamente, boa resistência mecânica e resistência ao impacto, para que assim possam ser transportados e/ou armazenados sob um limite de esforços físicos.

#### 4.6.2 Ensaio de Friabilidade

O friabilômetro, desenvolvido por Aguiar (2017), foi utilizado para a realização dos testes de tamboreamento, onde os briquetes em análise são inseridos (Figura 23) no interior do cilindro de acrílico que está conectado a um motor através de um eixo. O cilindro realiza voltas em torno do eixo submetendo o briquete aos choques (TÁVORA, 2017).

Figura 23 – Friabilômetro.



Fonte: Autor.

Segundo Távora (2017) o equipamento possui uma interface de fácil utilização e como parâmetros operacionais a velocidade (rpm) e o número de voltas que podem ser escolhidas pelo operador para a realização do ensaio. Esses parâmetros são ajustáveis e podem ser selecionados nos seguintes intervalos:

- Velocidade: 0 – 99 rpm;
- Número de voltas: 0 – 999 voltas.

Com o objetivo de explorar o comportamento quanto a resistência à abrasão e ao impacto dos briquetes de palha, talo e blenda foi realizado o ensaio com a aplicação de uma rotação de 30 rpm e um total de 100 voltas, baseado no experimento realizado por Távora (2017), pois não existe uma norma específica para o ensaio de friabilidade para briquetes.

As amostras foram pesadas antes e depois de serem submetidas à ação do equipamento. O aglomerado compactado de maior massa foi considerado o que restou do briquete após o teste de friabilidade. Foi utilizada a Equação 12 para calcular a perda de massa percentual durante o ensaio de friabilidade dos briquetes (SCALET, 2018).

$$\%Perda = \frac{m_f}{m_i} \times 100 \quad (\text{Equação 12})$$

Na qual:

- $m_f$  Quantidade de massa perdida após o ensaio dada em g;
- $m_i$  Quantidade de massa inicial antes do ensaio dada em g;
- $\%Perda$  Perda percentual de massa durante o ensaio de friabilidade.

#### 4.7 Análise Termogravimétrica

A análise de Termogravimetria (TG) foi realizada pelo Laboratório do Núcleo Interdisciplinar de Materiais Avançados (LIMAV) da UFPI - Universidade Federal do Piauí. Foi utilizado o equipamento, SDT Modelo Q 600 V 20.9 Build 20 da TA Instruments. O equipamento possui uma faixa de temperatura entre 30 °C e 1000 °C.

As amostras foram aquecidas da temperatura ambiente até 1000°C, sob um fluxo de argônio de 50 mL/min, a uma taxa de aquecimento de 10 °C/min, em que foram utilizadas amostras de aproximadamente 5 a 6 mg. A curva termogravimétrica foi registrada de 100 a 600 °C. Com os dados obtidos na análise foram construídos gráficos de perda de massa em função da variação de temperatura.

#### 4.8 Análise Estatística

Utilizando o Teste t de Student foi realizado um teste estatístico comparando os resultados obtidos para análise imediata do material *in natura* e os resultados para o material após ser transformado em briquete. Utilizou-se a ferramenta estatística análise de dados do software Microsoft Excel 2013 para os cálculos dos valores de t.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados referentes à caracterização de cada material *in natura*, descrevendo sobre a umidade e o poder calorífico, as análises imediata, elementar e termogravimétrica e as suas densidades (a granel, aparente e energética) para as biomassas de palha, talo e blenda de carnaúba (50 % palha; 50 % talo). No segundo tópico será descrito os resultados sobre a resistência mecânica dos briquetes através do ensaio de compressão diametral e friabilidade, descritos na metodologia e, por fim, em um último tópico, segue a apresentação dos resultados obtidos na análise estatística descrita na metodologia.

### 5.1 Análise Elementar (Biomassa *in natura*)

Na Tabela 8 estão apresentados os resultados relativos ao talo e a palha de carnaúba na forma *in natura*.

Tabela 8 – Análise elementar da biomassa de carnaúba *in natura*.

| <b>Biomassa</b> | <b>C (%)</b> | <b>H (%)</b> | <b>N (%)</b> | <b>S (%)</b> | <b>O (%)</b> |
|-----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>Palha</b>    | 39,4         | 4,76         | 2,66         | 2,34         | 47,61        |
| <b>Talo</b>     | 44,03        | 5,14         | 1,35         | 1,87         | 50,84        |

Fonte: Autor.

Percebe-se pelos resultados da análise elementar, que a palha de carnaúba apresenta uma quantidade percentual menor de carbono, hidrogênio e oxigênio em relação aos dados obtidos para o talo da mesma.

No estudo de Tavares e Santos (2013) a palha de carnaúba apresentou uma quantidade de carbono de 40,4 %, hidrogênio de 5,61 % e nitrogênio de 1,72 %. Os valores indicados por este pesquisador estão próximos aos valores encontrados neste trabalho. Não foram encontrados na literatura resultados para a análise elementar para o talo de carnaúba.

### 5.2 Análise Imediata da Palha e Talo da Carnaúba (*in natura*)

A Tabela 9 exhibe os resultados para análise imediata para o talo e a palha de carnaúba. Também foi feita a análise imediata misturando amostras de palha (50% em massa) e talo (50% em massa), originando a blenda.

Tabela 9 – Análise imediata da biomassa *in natura*.

| <b>Biomassa</b> | <b>Teor de Voláteis (TV) (%)</b> |                    | <b>Teor de Cinzas (TC) (%)</b> |                    | <b>Teor de Carbono Fixo (%)</b> |                    |
|-----------------|----------------------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------|---------------------------------|--------------------|
|                 | Média                            | $\sigma$ ( $\pm$ ) | Média                          | $\sigma$ ( $\pm$ ) | Média                           | $\sigma$ ( $\pm$ ) |
| <b>Palha</b>    | 70,89                            | 0,8                | 9,13                           | 0,7                | 19,98                           | 0,1                |
| <b>Talo</b>     | 81,12                            | 1,1                | 2,8                            | 0,2                | 16,08                           | 1,0                |
| <b>Blenda</b>   | 73,7                             | 0,7                | 7,3                            | 0,5                | 19,04                           | 1,1                |

Fonte: Autor.

O teor de voláteis de uma biomassa indica a facilidade de se queimar o material, enquanto o teor de carbono fixo expressa o tempo de duração da queima do composto. Quando uma biomassa apresenta um alto valor de teor de voláteis e um menor teor de cinzas, geralmente, possui um maior poder calorífico (TAVARES; SANTOS, 2013).

No estudo de Tavares e Santos (2013) a palha de carnaúba apresentou um teor de voláteis (TV) de 89,42 %, já para Bizerra (2017) este teor foi de 75,77 %, entretanto, neste estudo o teor apresentou uma média de 70,89 %, valor próximo ao mencionado por estes autores.

Para as amostras de talo e blenda (50% de palha e 50% de talo) os valores encontrados para o teor médio de voláteis foram respectivamente 81,12 e 73,7 %. Não foram encontrados na literatura dados para análise imediata do talo e blenda de carnaúba.

No entanto, comparando com outras biomassas, para o bagaço de cana-de-açúcar, segundo Ponte (2017) o TV para esta biomassa foi de 69%. Comparando com outra biomassa, no caso a casca de Licuri, estudada por Scalet (2015), o TV foi de 75,73%. Isto mostra que os valores obtidos para a palha, o talo e a blenda são similares aos de outras biomassas que foram estudadas como possíveis fontes de energia térmica.

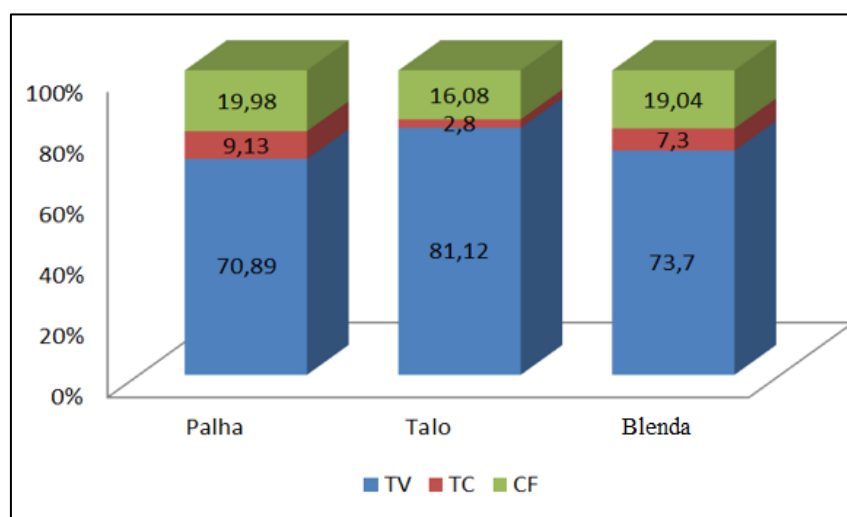
Segundo Pincelli (2011), o conhecimento do teor de cinzas é importante e que deve ser avaliado quando se utiliza uma biomassa com a finalidade energética, pois quanto maior o teor de cinzas, maior a influência negativa no poder calorífico da biomassa, e maior será a porcentagem de impurezas presentes neste material. Ainda segundo Pincelli (2011), o teor de cinzas também ocasiona um aumento nos custos de processamento da conversão global da biomassa em energia.

Para Tavares e Santos (2013), a palha contém 9,74 % de teor de cinzas, neste experimento, o valor médio foi de 9,13 %, variando de 8,34 a 9,93%. Ferreira *et al.* (2012) *apud* Tavares e Santos (2000), encontraram um teor médio de cinzas de 5,2%.

Para as amostras de talo e blenda os valores encontrados para o teor de cinzas foram respectivamente 2,8e 7,3%. Em comparação com outras biomassas utilizadas como fonte de energia, como por exemplo, o bagaço de cana-de-açúcar que tem um TC de 15,4 % (PONTE, 2017) e para a casca de arroz 20,6 % (NOGUEIRA, 2007) o teor de cinzas obtido apresentou-se com um valor reduzido, o que significa um resultado promissor para um possível combustível, pois quanto menor este valor, menos danos as cinzas podem causar a dutos e componentes do sistema que está sendo utilizado (HOFFMANN, 2010).

No Gráfico1 estão representados os resultados obtidos na análise imediata para as biomassas de carnaúba.

Gráfico 1 – Análise imediata da palha e talo da carnaúba *in natura*.



Fonte: Autor.

Ainda segundo Hoffmann (2010) *apud* Vieira (2012), um alto teor de cinzas leva a uma diminuição da eficiência devido ao aumento do consumo de oxigênio para derreter as cinzas e que, para a gaseificação o menor teor de cinzas inibe o entupimento e incrustações por escórias no equipamento.

Segundo Brito e Barrichelo (1982), o teor de carbono fixo para madeira varia entre 15 e 25 %, o que mostra que os resultados encontrados para as amostras de carnaúba são similares aos valores encontrados por esses pesquisadores.



O teor de Carbono Fixo presente na palha (em estudo) teve uma média de 19,98 % enquanto que na literatura (Tavares e Santos (2013)), este valor foi de 10,82 %. O talo e a blenda apresentaram valores de carbono fixo respectivamente de 16,08 e 19,04 %.

Outra razão se deve ao fato de que as amostras não serem oriundas de uma mesma localização geográfica ou do mesmo solo, o que pode interferir na composição química e conseqüentemente, nos resultados obtidos. As condições meteorológicas em que o procedimento é realizado também podem interferir, principalmente na umidade (VIEIRA, 2012).

A Tabela 10 apresenta os dados de umidade e PCS de todas as amostras *in natura* analisadas. Os resultados de umidade foram determinados em base seca.

Tabela 9 – TU e PCS das amostras *in natura*.

| Biomassa      | Teor de Umidade (%) |                    | PCS (MJ/kg) |                    |
|---------------|---------------------|--------------------|-------------|--------------------|
|               | Média               | $\sigma$ ( $\pm$ ) | Média       | $\sigma$ ( $\pm$ ) |
| <b>Palha</b>  | 11,76               | 0,5                | 17,51       | 0,1                |
| <b>Talo</b>   | 11,6                | 0,5                | 17,29       | 0,1                |
| <b>Blenda</b> | 11,45               | 0,2                | 17,26       | 0,1                |

Fonte: Autor.

Segundo Vieira (2012), quando a biomassa possui um teor de umidade elevado o processo de combustão é menor comparado ao material seco. A umidade é um fator limitante na escolha do combustível (biomassa), não sendo permitido valores acima de 50%, pois acima deste ponto é liberada energia insuficiente para a combustão e conseqüentemente, para a produção de calor (KLAUTAU, 2008 *apud* VIEIRA, 2012).

Quirino (2002) recomenda que a umidade para materiais que serão utilizados na queima deva possuir teor de umidade variando de 8 a 12%, o que é observado nas duas formas do material, tornando-os atrativos para queima quando o quesito avaliado é a umidade.

O teor de umidade médio encontrado na palha foi de 11,76 %, para Tavares e Santos (2013) esta amostra possui um teor de umidade de 9,98 %. Segundo Marques (2012) o teor de umidade da palha é de 7,83 %.

Para Gomes (2009) o teor de umidade da palha de carnaúba é 8,3 %. Os valores encontrados na literatura estão próximos ao valor médio apresentado nesta pesquisa, sendo que a variação

provavelmente se deve as condições de solo e geográficas de onde foram extraídas as amostras utilizadas por cada pesquisador, técnica de armazenamento e método de medição da umidade.

Os valores obtidos para o teor de umidade do talo e da blenda de carnaúba são respectivamente 11,60 e 11,45 %. A palha de carnaúba, segundo Tavares e Santos (2013), apresentou um poder calorífico superior (PCS) de 17,78 MJ/kg e para Ferreira *et al.* 2012, 20,35 MJ/kg. Neste estudo, como pode ser observado na Tabela 10, o PCS variou de 17,44 MJ/kg a 17,59 MJ/kg, tendo uma média de 17,51 MJ/kg, estando próximo aos valores encontrados na literatura.

Segundo Ferreira, *et al.* (2012) *apud* Tavares e Santos (2000), encontraram o valor médio de 20,37 MJ/kg para a palha de carnaúba, com um teor médio de umidade em base úmida de 5,2%.

O talo e a blenda apresentaram valores próximos aos da palha e os valores são respectivamente 17, 29 MJ/kg e 17,26 MJ/kg. A blenda apresentou um valor de PCS intermediário em relação aos resultados obtidos com a palha e o talo.

### 5.3 Análise Imediata da Biomassa Densificada

A carbonização foi realizada por existir diferença entre a biomassa *in natura* e o carvão vegetal, tal diferença está nas características (teor de umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo) das amostras. Na Tabela 10 estão apresentados os resultados para a análise imediata para os briquetes de palha e talo de carnaúba.

Tabela 10 – Análise Imediata para os Briquetes.

| Biomassa      | Teor de Voláteis (TV) (%) |                    | Teor de Cinzas (TC) (%) |                    | Teor de Carbono Fixo (%) |                    |
|---------------|---------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------|--------------------------|--------------------|
|               | Média                     | $\sigma$ ( $\pm$ ) | Média                   | $\sigma$ ( $\pm$ ) | Média                    | $\sigma$ ( $\pm$ ) |
| <b>Palha</b>  | 70,02                     | 1,1                | 8,99                    | 0,5                | 20,9                     | 1,0                |
| <b>Talo</b>   | 80,41                     | 1,1                | 2,75                    | 0,3                | 16,8                     | 1,0                |
| <b>Blenda</b> | 74,5                      | 1,7                | 7,17                    | 0,2                | 18,4                     | 1,8                |

Fonte: Autor.

Observa-se pelo Gráfico 2 uma redução na formação de cinzas e voláteis na biomassa densificada, comparando com os resultados do Gráfico 1, para a análise imediata da biomassa *in natura*.

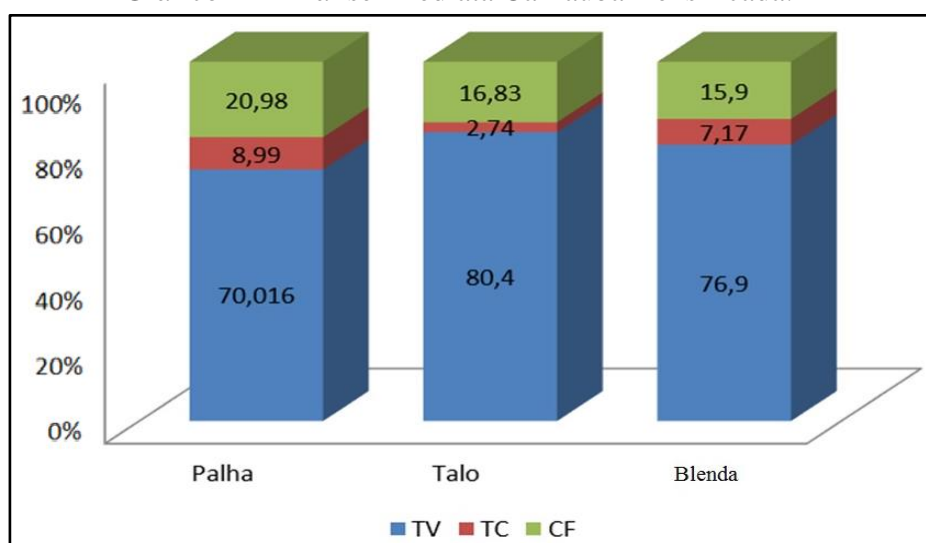
O briquete de palha de carnaúba apresentou um o teor médio de voláteis de 70,02 %. Para as amostras de briquete de talo e blenda (50% de palha e 50% de talo) os valores encontrados para

o teor médio de voláteis foram respectivamente 80,41 e 74,5 %. Não foram encontrados na literatura dados para análise imediata para a carnaúba em forma de briquete.

Neste experimento o valor médio obtido para o teor de cinzas para o briquete de palha foi de 8,99 %. Para as amostras de talo e blenda os valores encontrados para o teor médio de cinzas foram respectivamente 2,75 % e 7,17 %.

O teor de Carbono Fixo presente no briquete de palha teve uma média de 20,9 %. O talo e a blenda apresentaram valores de carbono fixo respectivamente de 16,8 e 18,4 %.

Gráfico 2 – Análise Imediata Carnaúba Densificada.



Fonte: Autor.

Pela Tabela 11 observa-se uma relação direta entre teor de umidade e PCS, pois quanto maior o teor de umidade, menor o valor do PCS liberado pela amostra. Comparando estes mesmos resultados com os obtidos para a biomassa *in natura*, observa-se que o processo de densificação reduz a quantidade de umidade da amostra e, conseqüentemente, aumenta o PCS do material.

Tabela 11 – TU e PCS dos Briquetes.

| Biomassa      | Teor de Umidade (%) |                    | PCS (MJ/kg) |                    |
|---------------|---------------------|--------------------|-------------|--------------------|
|               | Média               | $\sigma$ ( $\pm$ ) | Média       | $\sigma$ ( $\pm$ ) |
| <b>Palha</b>  | 9,34                | 0,7                | 17,76       | 0,1                |
| <b>Talo</b>   | 9,96                | 0,5                | 17,44       | 0,1                |
| <b>Blenda</b> | 9,3                 | 0,9                | 17,60       | 0,1                |

Fonte: Autor.

O teor de umidade médio encontrado para o briquete de palha foi de 9,34 %. Os valores obtidos para o teor de umidade do talo e da blenda de carnaúba em forma de briquetes são respectivamente 9,96 % e 9,3 %.

Neste estudo, como pode ser observado na Tabela 12, o PCS do briquete de palha variou de 17,68 MJ/kg a 17,78 MJ/kg, tendo uma média de 17,76 MJ/kg.

Os briquetes de talo e blenda apresentaram valores respectivamente de 17,44 MJ/kg e 17,60 MJ/kg. A blenda apresentou um valor de PCS intermediário em relação aos resultados obtidos com os briquetes de palha e talo.

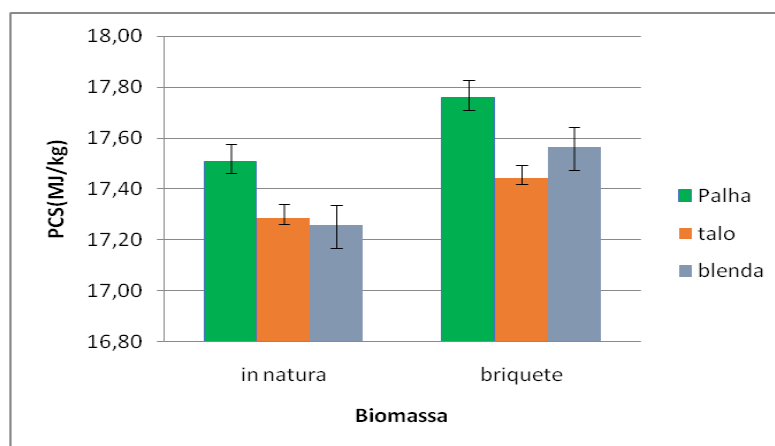
#### 5.4 Comparativo entre PCS Biomassa *in natura* e Densificada

A umidade é uma propriedade que varia de material para material e depende das condições atmosféricas locais, como a umidade do ar e a pressão. Ela pode ser controlada com o auxílio de secadores, comumente utilizados em usinas de briquetagem.

Como pode ser visualizado no Gráfico 3 as amostras de carnaúba *in natura* apresentaram um teor de umidade maior em relação aos briquetes, um dos motivos pode ser devido ao processo de densificação que devido a aplicação de uma elevada carga de compressão, durante a fabricação dos briquetes, ocorre o aumento da temperatura que não só derrete a lignina presente no material como vaporiza a água presente na amostra *in natura*.

O teor de umidade é de suma importância tanto para biomassa *in natura* quanto densificada, pois a mesma exerce influência sobre outras características das amostras, como exemplo o PCS e a liberação de energia.

Gráfico 3 – Comparação PCS carnaúba *in natura* e briquete.



Fonte: Autor.

### 5.5 Comparativo entre PCI Biomassa *in natura* e Densificada

Como pode ser visualizado na Tabela 12 as amostras de carnaúba *in natura* apresentaram um PCI menor em relação aos briquetes, um dos motivos pode ser devido ao processo de densificação que em decorrência da aplicação de uma elevada carga de compressão durante a fabricação dos briquetes.

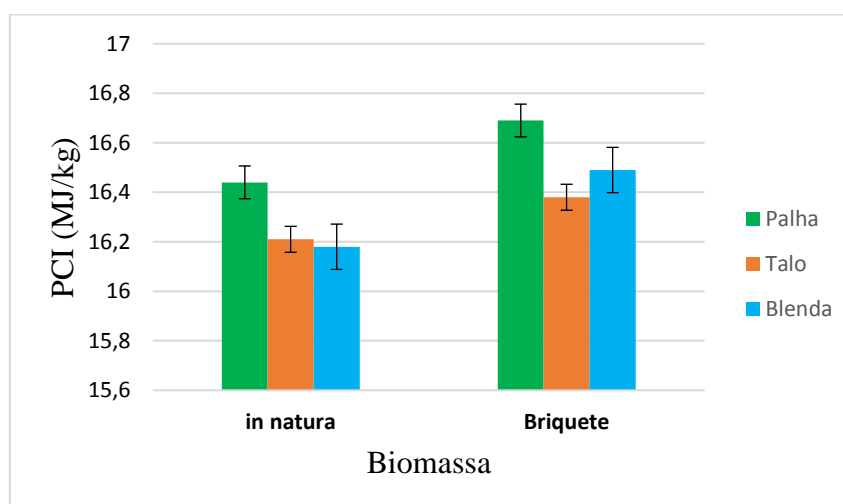
Tabela 12 – Resultados PCI biomassa *in natura* e briquetes.

| Biomassa      | <i>in natura</i> | briquete   |
|---------------|------------------|------------|
|               | MJ/kg            | MJ/kg      |
| <b>Palha</b>  | 16,44± 0,1       | 16,69± 0,1 |
| <b>Talo</b>   | 16,21± 0,1       | 16,38± 0,1 |
| <b>Blenda</b> | 16,18± 0,1       | 16,49± 0,1 |

Fonte: Autor.

No Gráfico 4 realiza-se uma comparação entre a biomassa *in natura* e densificada em relação ao PCI.

Gráfico 4 – Comparação PCI carnaúba *in natura* e briquetes.



Fonte: Autor.

## 5.6 Densidades a granel e Aparente

Os resultados obtidos para a densidade a granel para as amostras *in natura* de palha, talo e blenda de carnaúba estão expostos na Tabela 13.

Tabela 13 – Resultados para a densidade a granel das amostras *in natura*.

| <b>Biomassa</b> | <i>in natura</i> |                                  |
|-----------------|------------------|----------------------------------|
|                 | PCS<br>(MJ/kg)   | $\rho_G$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) |
| <b>Palha</b>    | 17,51            | 0,17                             |
| <b>Talo</b>     | 17,29            | 0,17                             |
| <b>Blenda</b>   | 17,26            | 0,16                             |

Fonte: Autor.

Segundo Quirino *et al.* (2004), quanto maior for o valor da densidade de uma biomassa, maior será o valor que este material apresentará em relação a quantidade de energia contida por unidade de volume.

Comparando com outras biomassas, por exemplo, a casca de Licuri apresentou uma densidade a granel de 0,38g/cm<sup>3</sup> (SCALET, 2015) e o bagaço de cana-de-açúcar apresentou um valor de 0,08g/cm<sup>3</sup> (PONTE, 2017), o que mostra que este parâmetro varia muito de uma biomassa para outra e que os valores obtidos para as biomassas oriundas da carnaúba estão dentro da faixa de valores que são encontrados para outras biomassas encontradas na literatura.

Observa-se pelos resultados que os valores de densidade a granel são similares, com uma pequena diferença de 0,1 g/cm<sup>3</sup> para a blenda. Os resultados obtidos para a densidade aparente para os briquetes de palha, talo e blenda de carnaúba estão expostos na Tabela 14.

Tabela 14 – Resultados Densidade a Aparente dos briquetes.

| <b>Biomassa</b> | <b>PCS<br/>(MJ/kg)</b> | <b><math>\rho_A</math><br/>(g/cm<sup>3</sup>)</b> |
|-----------------|------------------------|---|
| <b>Palha</b>    | 17,76                  | 0,72  |
| <b>Talo</b>     | 17,44                  | 0,65  |
| <b>Blenda</b>   | 17,6                   | 0,68  |

Fonte: Autor.

Observa-se pelos resultados de densidade aparente que a densidade da palha de carnaúba apresenta um valor de 0,72 g/cm<sup>3</sup>, valor relativamente maior do que os resultados obtidos para o talo (0,65 g/cm<sup>3</sup>) e para a blenda (0,68 g/cm<sup>3</sup>), respectivamente.

### 5.7 Densidade Energética

Os resultados obtidos para a densidade energética para as amostras *in natura* de palha, talo e blenda de carnaúba estão expostos na Tabela 15. Pode-se constatar pelos resultados contidos na Tabela 15 um grande aumento da  $\rho_E$  para as 3 amostras. A palha teve um aumento de 2,98kJ/cm<sup>3</sup> para 12,78kJ/cm<sup>3</sup>, uma variação de 329,38 %; enquanto o talo teve um aumento de 2,89kJ/cm<sup>3</sup> para 11,33kJ/cm<sup>3</sup>, representando uma variação de 291,62% em sua  $\rho_E$ . A blenda também obteve um aumento expressivo de 2,79 kJ/cm<sup>3</sup> para 11,98kJ/cm<sup>3</sup> que representou uma variação em sua  $\rho_E$  de 329,54%.

Tabela 15 – Variação de Densidade Energética entre as amostras *in natura* e briquetes.

| <b>Biomassa</b> | <b><i>in natura</i></b> |   |  | <b>briquete</b>        |   |  | <b>Varição<br/><math>\rho_E</math><br/>(%)</b> |
|-----------------|-------------------------|---|--|------------------------|---|--|--|
|                 | <b>PCS<br/>(MJ/kg)</b>  | <b><math>\rho_G</math><br/>(g/cm<sup>3</sup>)</b> | <b><math>\rho_E</math><br/>(kJ/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>PCS<br/>(MJ/kg)</b> | <b><math>\rho_A</math><br/>(g/cm<sup>3</sup>)</b> | <b><math>\rho_E</math><br/>(kJ/cm<sup>3</sup>)</b> |  |
| <b>Palha</b>    | 17,51                   | 0,17  | 2,98   | 17,76                  | 0,72  | 12,78  | 329,38   |
| <b>Talo</b>     | 17,29                   | 0,17  | 2,89   | 17,44                  | 0,65  | 11,33  | 291,62   |
| <b>Blenda</b>   | 17,26                   | 0,16  | 2,79   | 17,60                  | 0,68  | 11,98  | 329,54   |

Fonte: Autor.

Comparando estes resultados da palha com outras biomassas, como é o caso do briquete de bagaço de cana-de-açúcar, que apresentou uma densidade energética de 13,22 kJ/cm<sup>3</sup> (Ponte, 2015), resultou em um aumento de 955% em relação ao material *in natura*.

De acordo com os resultados obtidos juntamente com os dados da literatura, pode-se inferir que o processo de briquetagem aumenta a densidade energética de uma biomassa, em decorrência da compactação do material e conseqüentemente da redução do volume. A densidade está diretamente ligada com os custos de transporte e aumentando a densidade do material é possível uma redução nos custos de transporte (QUIRINO, 2002 *apud* SCALET, 2015).

## **5.8 Análise Mecânica**

### **5.8.1 Ensaio de Compressão Diametral**

“Para usos comerciais, os briquetes devem apresentar boa resistência mecânica para que assim possam ser transportados e/ou armazenados sob um limite de esforços físicos” (PONTE, 2017).

Ainda segundo Ponte (2017) a tensão máxima de ruptura é uma das formas de realizar uma avaliação sobre a resistência mecânica de um briquete, pois este parâmetro indica qual a força de aderência que existe entre as partículas de uma determinada biomassa. Desta forma, quanto maior for o valor da resistência mecânica, maior será a resistência do briquete.

A Tabela 16 apresenta o resultado do ensaio mecânico de compressão diametral para os briquetes de palha e os cálculos do número de briquetes que suportam serem empilhados verticalmente e a altura resultante desse empilhamento.

Observa-se nas Figuras 24 a 26 o ensaio de compressão diametral realizado nos briquetes de palha, talo e blenda, respectivamente, antes e após atingir o máximo esforço de ruptura.

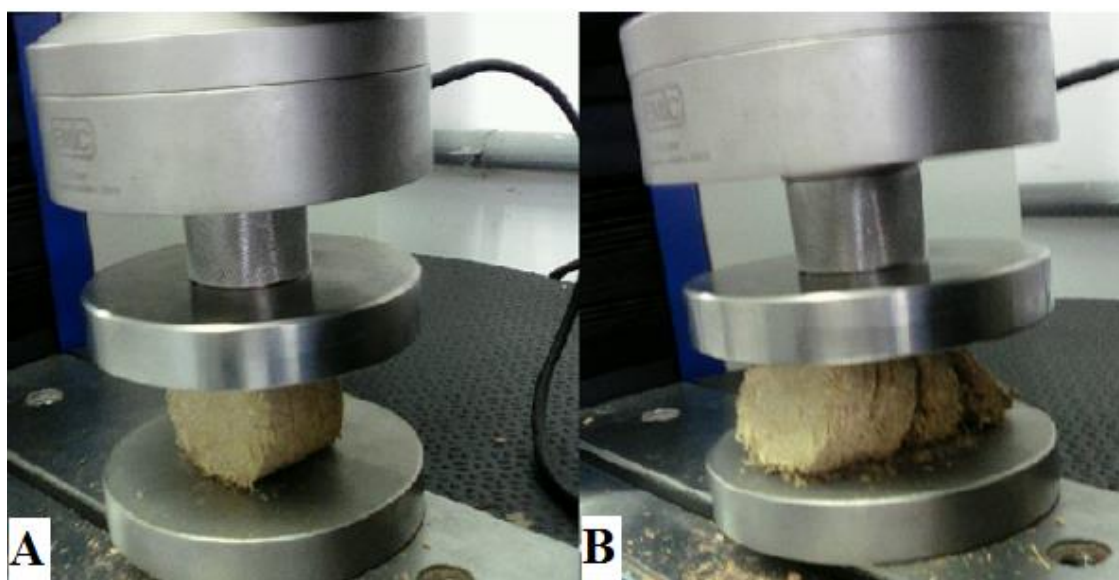


Tabela 16 – Resistência à compressão diametral dos briquetes de palha.

| Briquete | F (rup)<br>(N) | Diâmetro<br>(mm) | L (mm) | Resistência<br>Mecânica (MPa) | N      | H<br>(m) |
|----------|----------------|------------------|--------|-------------------------------|--------|----------|
| 1        | 87,94          | 51,18            | 31,4   | 0,03                          | 841,02 | 43,04    |
| 2        | 96,64          | 51,32            | 34,82  | 0,03                          | 935,18 | 47,99    |
| 3        | 250,29         | 51,09            | 31,36  | 0,10                          | 838,48 | 42,84    |
| 4        | 186,51         | 51,22            | 36,15  | 0,06                          | 969,01 | 49,63    |
| 5        | 115,00         | 51,10            | 35,05  | 0,04                          | 937,32 | 47,90    |
| Média    | 147,28         | 51,18            | 33,76  | 0,055                         | 904,20 | 46,28    |

Fonte: Autor.

Figura 24 – Compressão diametral briquete de palha antes (A) e após o ensaio (B).

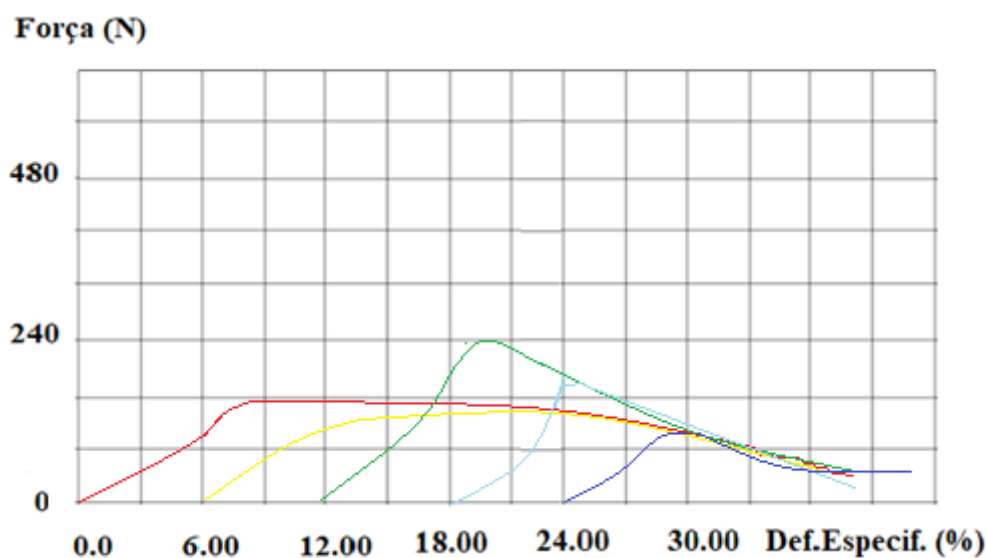


Fonte: Autor.

A altura máxima de empilhamento pode ser vista na Tabela 16. A palha que apresentou a menor resistência mecânica 0,055 (MPa), obteve uma altura máxima de empilhamento de 46,28m.

No Gráfico 5 pode-se observar a curva que apresenta a força aplicada e a deformação sofrida por cada briquete, durante todo o ensaio até o momento da ruptura do material.

Gráfico 5 – Ensaio de Compressão Diametral (Palha).



Fonte: Autor.

Observa-se pelos resultados obtidos para os briquetes de palha uma baixa resistência mecânica dos briquetes. É uma característica que pode ser melhorada, realizando testes com granulometrias e umidades distintas, a fim de se verificar a melhor condição para formação dos briquetes de palha de carnaúba (SCALET, 2015).

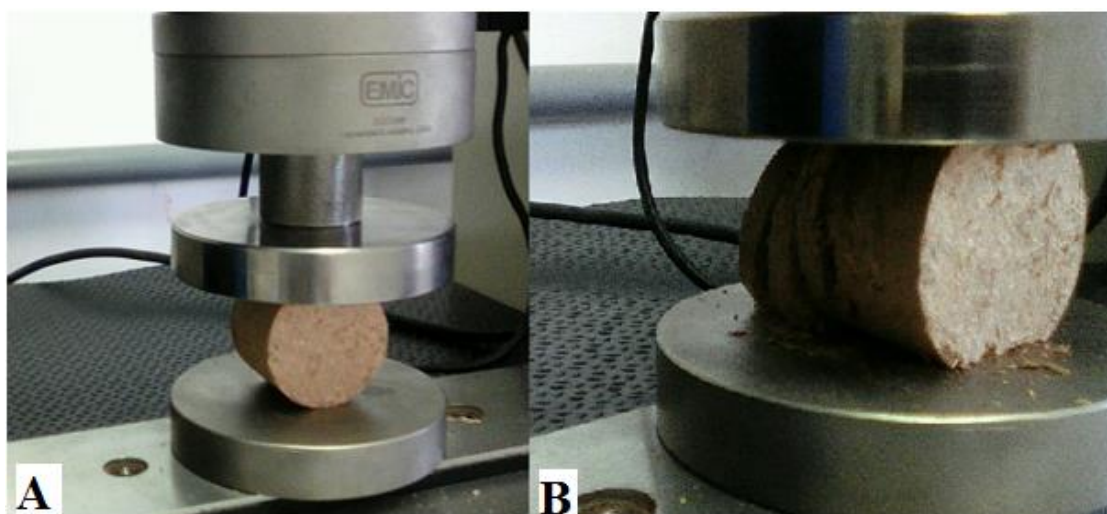
A Tabela 17 apresenta o resultado do ensaio mecânico de compressão diametral para os briquetes de talo e os cálculos do número de briquetes que suportam serem empilhados verticalmente e a altura resultante desse empilhamento.

Tabela 17 – Resistência à compressão diametral dos briquetes de talo.

| Briquete | F (rup)<br>(N) | Diâmetro<br>(mm) | L (mm) | Resistência Mecânica<br>(MPa) | N       | H<br>(m) |
|----------|----------------|------------------|--------|-------------------------------|---------|----------|
| 1        | 873,60         | 51,18            | 37,53  | 0,29                          | 1005,21 | 51,45    |
| 2        | 977,00         | 51,23            | 37,80  | 0,32                          | 1013,43 | 51,92    |
| 3        | 1049,48        | 51,06            | 37,12  | 0,35                          | 991,90  | 50,65    |
| 4        | 686,12         | 50,55            | 39,15  | 0,22                          | 1035,69 | 52,35    |
| 5        | 949,94         | 51,28            | 37,62  | 0,31                          | 1009,59 | 51,77    |
| Média    | 907,23         | 51,06            | 37,844 | 0,30                          | 1011,17 | 51,63    |

Fonte: Autor.

Figura 25 – Compressão diametral briquete do Talo antes (A) e após o ensaio (B).

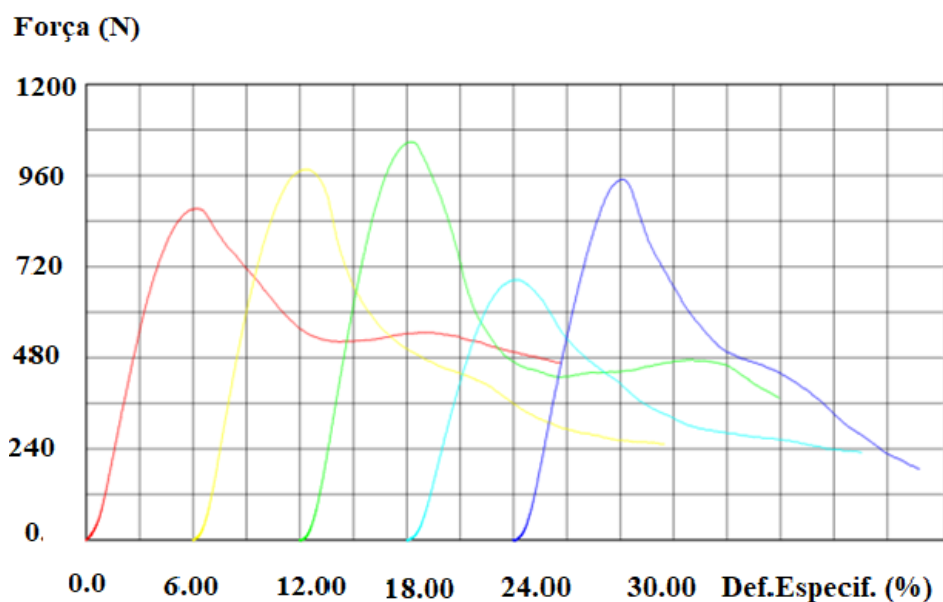


Fonte: Autor.

A altura máxima de empilhamento pode ser vista na Tabela 17 O talo que apresentou a maior resistência mecânica 0,3 (MPa), obteve uma altura máxima de empilhamento de 51,63m.

No Gráfico 6 pode-se observar a curva que apresenta a força aplicada e a deformação sofrida por cada briquete durante todo o ensaio até o momento da ruptura do material.

Gráfico 6 – Ensaio de Compressão Diametral (Talo).



Fonte: Autor.

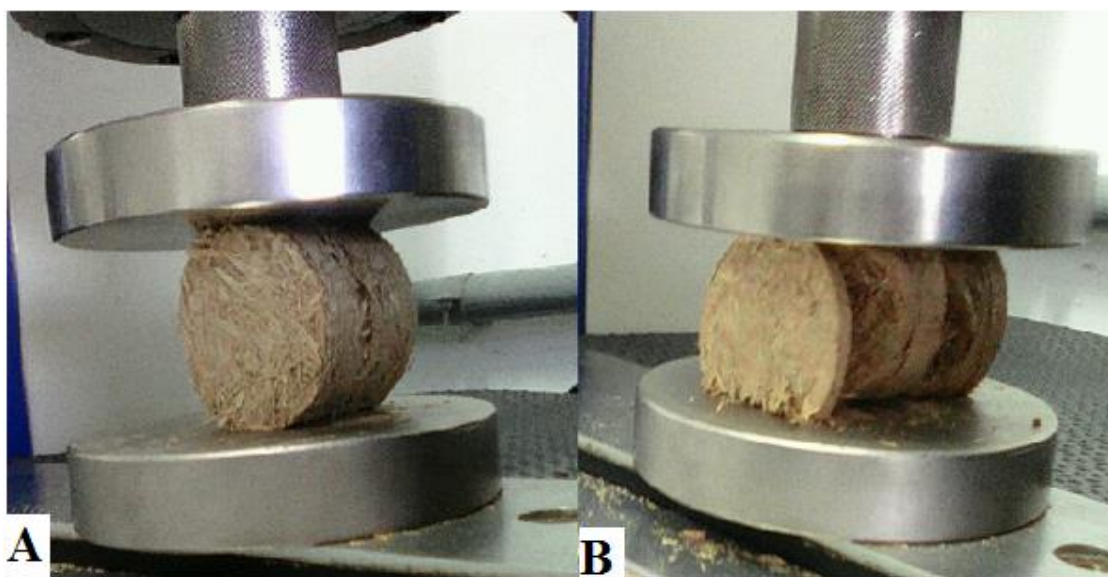
A Tabela 18 apresenta o resultado do ensaio mecânico de compressão diametral para os briquetes de blenda e os cálculos do número de briquetes que suportam serem empilhados verticalmente e a altura resultante desse empilhamento.

Tabela 18 – Resistência à compressão diametral dos briquetes de blenda.

| Briquete | F (rup) (N) | Diâmetro (mm) | L (mm) | Resistência Mecânica (MPa) | N       | H (m) |
|----------|-------------|---------------|--------|----------------------------|---------|-------|
| 1        | 524,74      | 51,06         | 34,55  | 0,19                       | 923,22  | 47,14 |
| 2        | 368,19      | 51,18         | 36,04  | 0,13                       | 965,30  | 49,40 |
| 3        | 513,14      | 51,10         | 35,37  | 0,18                       | 945,88  | 48,33 |
| 4        | 486,08      | 51,32         | 35,43  | 0,17                       | 951,56  | 48,83 |
| 5        | 658,10      | 51,15         | 37,52  | 0,22                       | 1004,35 | 51,37 |
| Média    | 510,05      | 51,162        | 35,782 | 0,18                       | 958,06  | 49,02 |

Fonte: Autor.

Figura 26 – Compressão diametral briquete de Blenda antes (A) e após o ensaio (B).

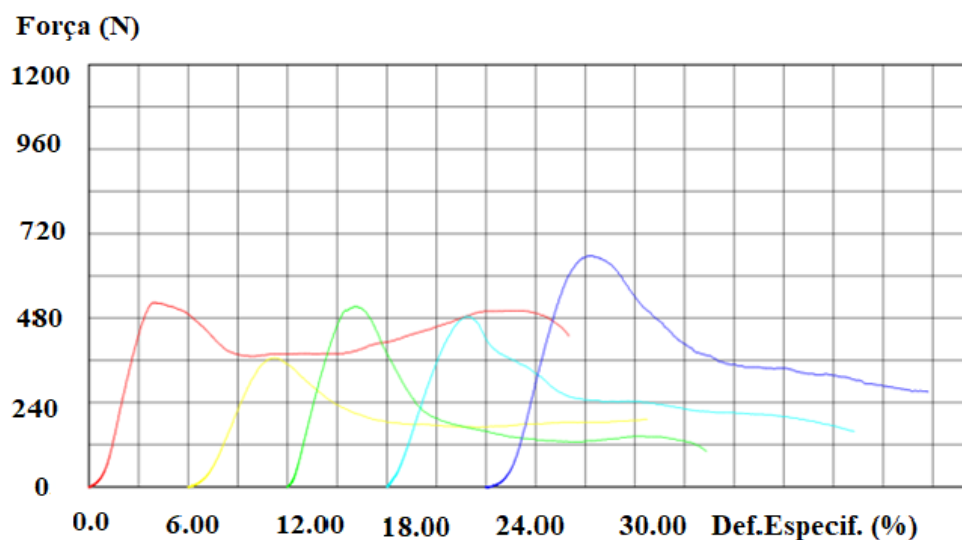


Fonte: Autor.

A altura máxima de empilhamento pode ser vista na Tabela 18. A blenda que apresentou a menor resistência mecânica 0,18 (MPa), obteve uma altura máxima de empilhamento de 49,02 m.

No Gráfico 7 pode-se observar a curva que apresenta a força aplicada e a deformação sofrida por cada briquete durante todo o ensaio até o momento da ruptura do material.

Gráfico 7 – Ensaio de Compressão Diametral (Blenda).



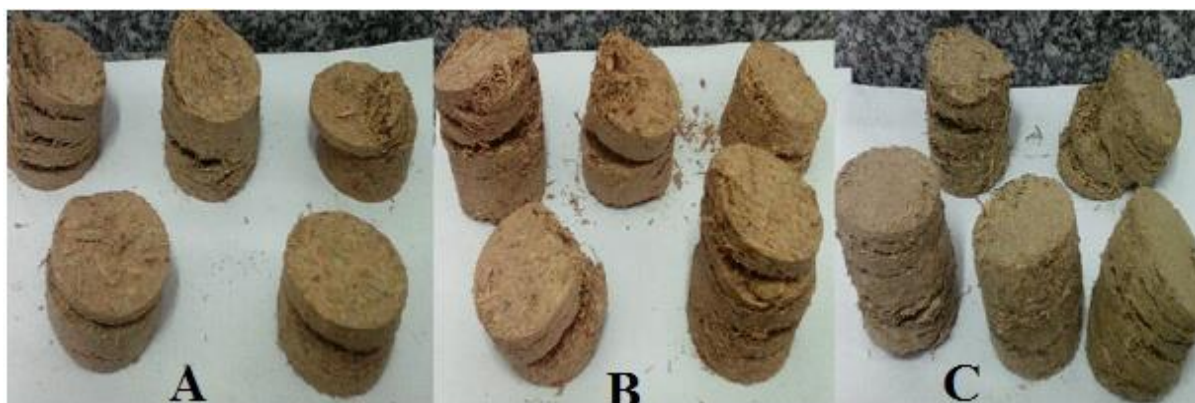
Fonte: Autor.

Comparando os resultados das biomassas de carnaúba com outras biomassas, como o estudo realizado por Ponte (2017) para o bagaço de cana-de-açúcar que obteve valores de 1,022 MPa, para resistência mecânica dos briquetes e uma força de ruptura de 3800 N, a carnaúba apresenta uma resistência menor 0,3 MPa para o talo, que apresentou maior resistência, porém, a altura de empilhamento foi satisfatória, pois obteve valores acima de 40 m, o que a torna viável para armazenamento.

Comparando com a casca de Licuri (SCALET, 2015) que apresentou uma força de ruptura de 330 N, o talo e a blenda apresentou valores de 907 e 510 N, respectivamente, o que demonstra que a carnaúba apresentou valores satisfatórios para este parâmetro.

Na Figura 27 podem-se observar os corpos de prova após a realização do ensaio de compressão diametral.

Figura 27 – Amostras de briquetes de blenda (A), talo (B) e palha(C), após o experimento.



Fonte: Autor.

### 5.8.2 Resultados do Ensaio de Friabilidade

Na Tabela 19 estão apresentados os resultados obtidos para o ensaio de friabilidade das amostras de palha, talo e blenda respectivamente, com o uso do friabilômetro descrito na metodologia.

Tabela 19 – Resultados obtidos no Ensaio de Friabilidade dos briquetes.

| Ensaio de Friabilidade |                   |                 |                    |                          |
|------------------------|-------------------|-----------------|--------------------|--------------------------|
| Biomassa               | Massa Inicial (g) | Massa Final (g) | Perda em Massa (%) | Perda em Massa Média (%) |
| <b>Palha</b>           | 39,71             | 21,30           | 53,65              | <b>50,46</b>             |
|                        | 41,32             | 18,81           | 45,52              |                          |
|                        | 39,36             | 20,28           | 51,54              |                          |
|                        | 40,77             | 20,85           | 51,13              |                          |
| <b>Talo</b>            | 39,84             | 0,64            | 1,60               | <b>1,95</b>              |
|                        | 40,96             | 1,08            | 2,65               |                          |
|                        | 41,65             | 0,90            | 2,16               |                          |
|                        | 40,54             | 0,57            | 1,40               |                          |
| <b>Blenda</b>          | 40,64             | 15,52           | 38,19              | <b>39,93</b>             |
|                        | 41,14             | 17,21           | 41,84              |                          |
|                        | 39,80             | 15,94           | 40,06              |                          |
|                        | 41,64             | 16,50           | 39,63              |                          |

Fonte: Autor.

Comparando os resultados obtidos com os de outras biomassas, como briquetes de casca de licuri que obteve uma perda de 68,3% em sua massa final (SCALET, 2015) e para briquetes formados a partir de serragem de eucalipto a perda de material varia de 8 a 32% (Gonçalves et al.,

2012). Constata-se assim que os briquetes de carnaúba apresentam uma boa friabilidade, com destaque para o talo que obteve uma perda abaixo de 2% durante o experimento.

Na Figura 28 observa-se a realização do ensaio de friabilidade utilizando um briquete de talo antes e após o término da rotação do friabilômetro.

Figura 28 – Briquete de talo antes e após a realização do ensaio de friabilidade.



Fonte: Autor.

Nas Figuras 29 e 30 verifica-se a realização do ensaio de friabilidade utilizando briquetes de palha e blenda, respectivamente, antes e após o término da rotação do friabilômetro.

Figura 29 – Briquete de palha antes e após a realização do ensaio de friabilidade.



Fonte: Autor.

Figura 30 – Briquete de blenda antes e após a realização do ensaio de friabilidade.



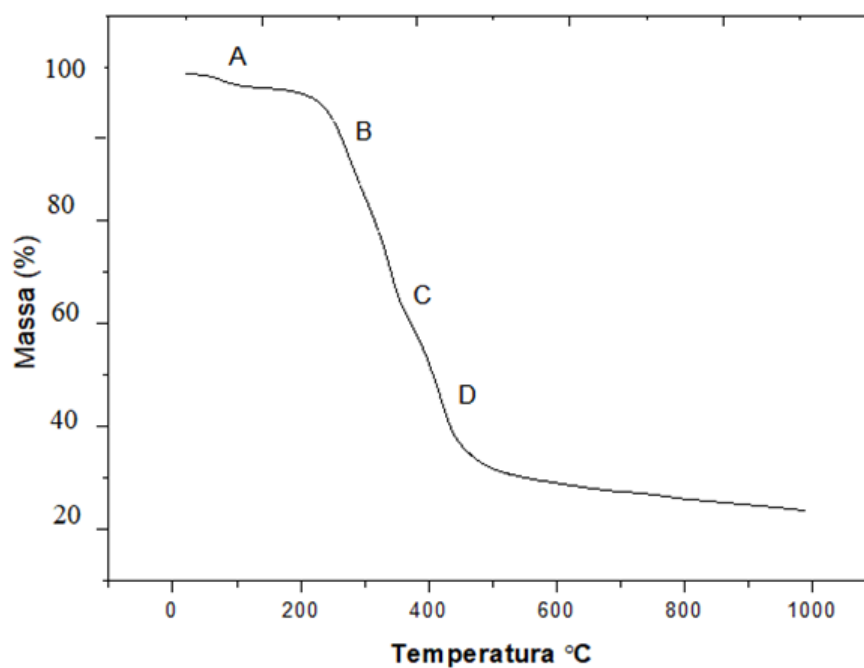
Fonte: Autor.

## 5.9 Análise Térmica

### 5.9.1 Análise Termogravimétrica

As curvas termogravimétricas de (TG) e DTG da palha são apresentadas nos Gráficos 8 e 9, respectivamente.

Gráfico 8 – TG Amostra de Palha de Carnaúba.



Fonte: Autor.



Observa-se pelo Gráfico 8 e pela Tabela 20 que a primeira etapa (A) de perda de massa ocorre entre as temperaturas de 50 °C e 140°C, em decorrência da evaporação da umidade contida na amostra. Entre as temperaturas 200 °C e 600 °C (B, C e D) ocorre uma perda de massa acentuada, que representa a quantidade de materiais voláteis presente na amostra.

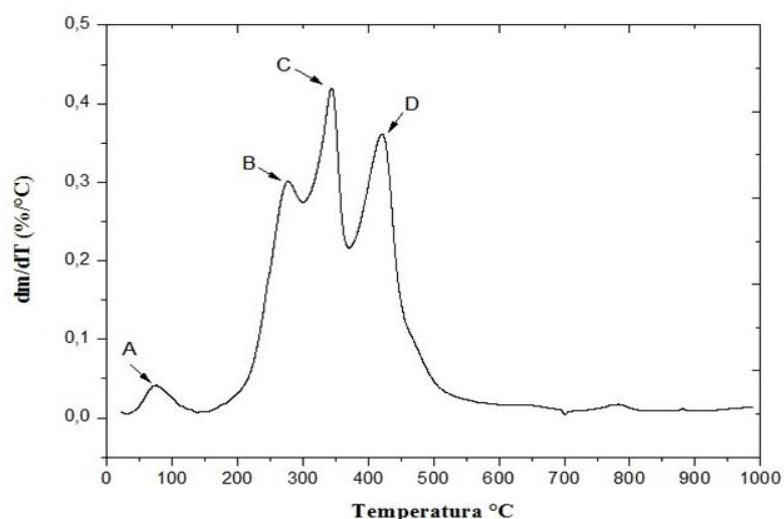
Tabela 20 – Resultados da análise TG (intervalos de temperatura com perda em massa).

| Biomassa     | Umidade         |                    | Voláteis        |                    | Massa Final     |                    |
|--------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|
|              | $\Delta T$ (°C) | Perda em massa (%) | $\Delta T$ (°C) | Perda em massa (%) | $\Delta T$ (°C) | Perda em massa (%) |
| <b>Palha</b> | 50- 140         | 5                  | 200-600         | 65                 | 600-1000        | 20                 |
| <b>Talo</b>  | 50-200          | 5                  | 200 - 400       | 68                 | 600 - 1000      | 20                 |

Fonte: Autor.

No entanto, na análise derivativa (DTG) (Gráfico 9) estão apresentados quatro eventos distintos (A, B, C e D), destacados por suas respectivas temperaturas de pico: 74, 275, 351 e 419°C. Quatro picos exotérmicos podem ser observados no Gráfico 9.

Gráfico 9 – DTG Amostra de Palha de Carnaúba.



Fonte: Autor.

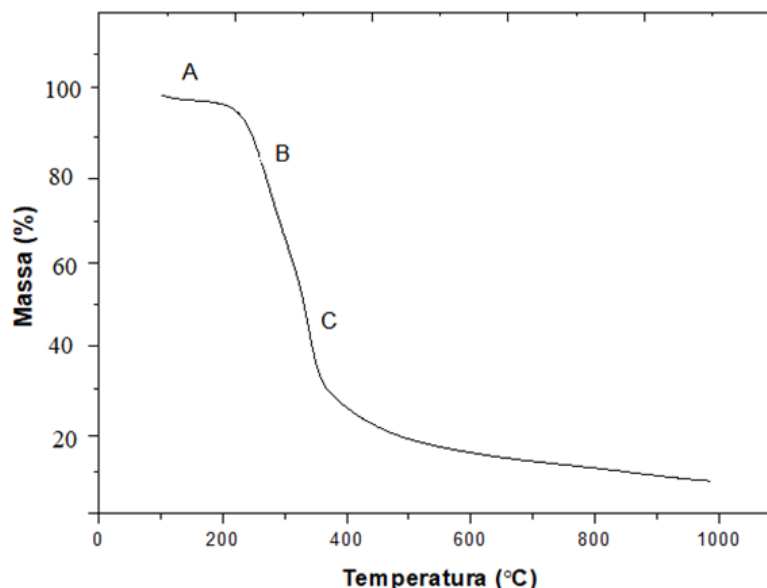
O primeiro evento ocorre na faixa de 30 a 150 °C (aproximadamente), com temperatura de pico de 74 °C, esse evento provavelmente está relacionado à volatilização de toda água livre da amostra.

Os dois eventos posteriores provavelmente estão relacionados à degradação térmica da hemicelulose, celulose e parcialmente da lignina, os quais degradam-se quando submetidos a temperaturas acima de 220 °C (PROTÁSIO, 2014). Esses eventos apresentaram temperaturas de pico de 275 °C e 351 °C.

A lignina é um componente de reforço da parede celular de uma biomassa e se decompõe gradualmente entre as temperaturas 137 °C e 667 °C (ZHOU et al., 2016).

As curvas termogravimétricas de (TG) e DTG do talo são demonstradas nos Gráficos 10 e 11, respectivamente.

Gráfico 10 – TG Amostra de Talo de Carnaúba.



Fonte: Autor.

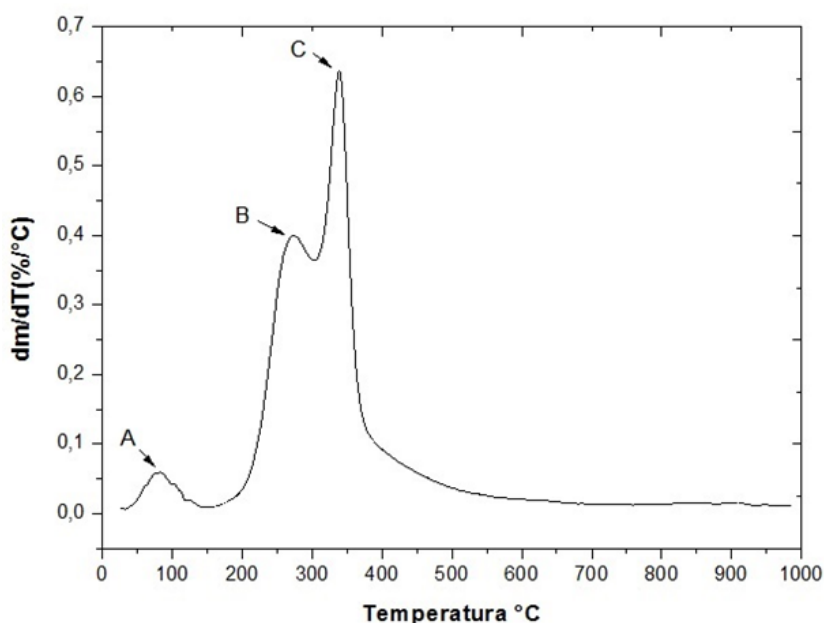
Observa-se pelo Gráfico 11 e pela Tabela 20 que a primeira etapa de perda de massa ocorre entre as temperaturas de 50 e 150 °C, em decorrência da evaporação da umidade contida na amostra. Entre as temperaturas de 200 a 600 °C ocorre uma perda de massa acentuada, que representa a quantidade de materiais voláteis presente na amostra. Para materiais lignocelulósicos a literatura estabelece a que a decomposição ocorre em quatro eventos (MORTARI et al., 2010), como ilustra o Gráfico 11.

O primeiro evento ocorre na faixa de 35 a 150 °C (aproximadamente), com temperatura de pico de 80,5°C, muito próxima da temperatura de pico do primeiro evento da TG da palha de

carnaúba, esse evento provavelmente está relacionado à volatilização de toda água livre da amostra.

Os dois eventos posteriores provavelmente estão relacionados à degradação térmica da hemicelulose, celulose e parcialmente da lignina, os quais se degradam quando submetidos a temperaturas acima de 220 °C (PROTÁSIO, 2014). Esses eventos apresentaram temperaturas de pico de 271,4 °C (B) e 338,5 °C (C). Três picos exotérmicos podem ser observados na curva DTG (Gráfico 11). O primeiro pico está relacionado ao calor liberado da combustão do material volátil.

Gráfico 11 – DTG Amostra de Talo de Carnaúba.



Fonte: Autor.

## 5.10 ANÁLISE ESTATÍSTICA

### 5.10.1 Comparação Estatística Análise Imediata

Na Tabela 21 estão apresentados os resultados da análise imediata juntamente com os valores dos parâmetros estatísticos de média, variância, desvio padrão, erro padrão e o valor t obtido para o teste estatístico t de Student.

Tabela 21 – Comparação estatística entre os resultados da biomassa *in natura* e densificada.

| Biomassa    | Resultado   | TU (%)           |          | TV (%)           |          | TC (%)           |          | CF (%)           |          |
|-------------|-------------|------------------|----------|------------------|----------|------------------|----------|------------------|----------|
|             |             | <i>in natura</i> | Briquete | <i>in natura</i> | Briquete | <i>in natura</i> | Briquete | <i>in natura</i> | Briquete |
| Palha       | Média       | 11,76            | 9,34     | 70,89            | 70,02    | 9,13             | 9,00     | 19,98            | 20,98    |
|             | Variância   | 0,26             | 0,42     | 0,59             | 1,15     | 0,49             | 0,29     | 1,07             | 1,36     |
|             | $\sigma$    | 0,51             | 0,65     | 0,76             | 1,07     | 0,70             | 0,54     | 1,04             | 1,17     |
|             | Erro padrão | 0,25             | 0,32     | 0,38             | 0,54     | 0,35             | 0,27     | 0,52             | 0,58     |
|             | Teste T     | 5,88             |          | 1,33             |          | 0,30             |          | 1,29             |          |
|             | Talo        | Média            | 11,60    | 9,96             | 81,12    | 80,41            | 2,80     | 2,75             | 16,08    |
| Variância   |             | 0,21             | 0,28     | 1,26             | 1,30     | 0,03             | 0,08     | 1,16             | 0,94     |
| $\sigma$    |             | 0,46             | 0,53     | 1,12             | 1,14     | 0,17             | 0,28     | 1,08             | 0,97     |
| Erro padrão |             | 0,23             | 0,26     | 0,56             | 0,57     | 0,08             | 0,14     | 0,54             | 0,48     |
| Teste T     |             | 4,68             |          | 0,88             |          | 0,32             |          | 1,04             |          |
| Blenda      | Média       | 11,45            | 9,30     | 73,65            | 74,46    | 7,31             | 7,17     | 19,04            | 18,37    |
|             | Variância   | 0,04             | 0,80     | 0,47             | 2,85     | 0,00             | 0,00     | 1,30             | 3,27     |
|             | $\sigma$    | 0,21             | 0,90     | 0,69             | 1,69     | 0,55             | 0,16     | 1,14             | 1,81     |
|             | Erro padrão | 0,10             | 0,45     | 0,34             | 0,84     | 0,27             | 0,08     | 0,57             | 0,90     |
|             | Teste T     | 4,68             |          | 0,88             |          | 0,49             |          | 0,62             |          |

Fonte: Autor.

Em relação ao teor de umidade para as biomassas palha, talo e blenda observam-se pelos resultados obtidos para o valor de t de Student, considerando uma significância de 5%, que os valores t são superiores aos valores indicados na Tabela t de Student (Anexo B). Estes resultados indicam que a hipótese nula, onde os resultados para as médias são iguais, deve ser descartada, ou seja, admite-se a hipótese alternativa, onde pelo menos uma média difere.

Isto significa que existem indícios estatísticos de que o processo de briquetagem altera significativamente o teor de umidade das biomassas analisadas.

Os resultados obtidos para o Teste t de Student para os teores de voláteis, cinzas e carbono fixo foram valores abaixo de 2, e pela Tabela t de Student, estes valores estão contidos no intervalo de t para uma significância de 5% e com 6 graus de liberdade. Pode-se concluir assim que a hipótese nula pode ser aceita, ou seja, as médias para as amostras *in natura* e briquetes são iguais.

Em outras palavras, existem indícios estatísticos de que o processo de briquetagem não altera estas propriedades.

### 5.10.2 Comparação Estatística Poder Calorífico

A Tabela 22 apresenta um comparativo entre o PCS para as biomassas nas formas *in natura* e briquete.

Tabela 22 – Resultados Análise Estatística PCS *in natura* e briquetes.

| Biomassa    | Resultado   | PCS (MJ/kg)      |          |
|-------------|-------------|------------------|----------|
|             |             | <i>in natura</i> | Briquete |
| Palha       | Média       | 17,51            | 17,76    |
|             | Variância   | 0,004            | 0,002    |
|             | $\sigma$    | 0,07             | 0,05     |
|             | Erro padrão | 0,03             | 0,02     |
|             | Teste T     | 6,0502           |          |
|             | Talo        | Média            | 17,29    |
| Variância   |             | 0,00             | 0,00     |
| $\sigma$    |             | 0,05             | 0,02     |
| Erro padrão |             | 0,03             | 0,01     |
| Teste T     |             | 5,36             |          |
| Blenda      | Média       | 17,26            | 17,57    |
|             | Variância   | 0,01             | 0,01     |
|             | $\sigma$    | 0,08             | 0,09     |
|             | Erro padrão | 0,04             | 0,05     |
|             | Teste T     | 5,06             |          |

Fonte: Autor.

Observa-se pelos resultados obtidos para o valor de t de Student para todas as biomassas que o valor t foi superior ao valor contido na Tabela T de student no Anexo B para uma significância de 5% e 6 graus de liberdade. Isto indica que a hipótese nula que considera que as médias não variam do briquete *in natura* para o briquete não pode ser aceita, ou seja, admite-se então a hipótese alternativa onde existem indícios de que pelo menos uma das médias difere das outras. Em outras palavras, existem indícios estatísticos de que o processo de briquetagem altera o PCS para todas as biomassas analisadas.

A mesma afirmação de hipótese alternativa pode ser feita em relação aos dados obtidos para o PCI (Tabela 23), pois os valores obtidos para o t de Student para todas as biomassas é superior aos indicados na Tabela t de Student (Anexo B) para uma significância de 5%.

Tabela 23 – Resultados Análise Estatística PCI *in natura* e briquetes.

| Biomassa | Resultado   | PCI (MJ/kg)      |          |
|----------|-------------|------------------|----------|
|          |             | <i>in natura</i> | Briquete |
| Palha    | Média       | 16,44            | 16,69    |
|          | Variância   | 0,004            | 0,002    |
|          | $\sigma$    | 0,07             | 0,05     |
|          | Erro padrão | 0,03             | 0,02     |
|          | Teste T     | 6,0502           |          |
| Talo     | Média       | 16,21            | 16,37    |
|          | Variância   | 0,003            | 0,001    |
|          | $\sigma$    | 0,052            | 0,024    |
|          | Erro padrão | 0,03             | 0,01     |
|          | Teste T     | 5,36             |          |
| Blenda   | Média       | 16,18            | 16,49    |
|          | Variância   | 0,006            | 0,008    |
|          | $\sigma$    | 0,080            | 0,092    |
|          | Erro padrão | 0,04             | 0,05     |
|          | Teste T     | 5,06             |          |

Fonte: Autor.

Observa-se pelos resultados obtidos para o valor de t de Student para todas as biomassas que o valor t foi superior ao valor contido na Tabela T de student no Anexo B para uma significância de 5% e 6 graus de liberdade.

Isto indica que a hipótese nula que considera que as médias não variam do *in natura* para o briquete não pode ser aceita, ou seja, admite-se então a hipótese alternativa onde existem indícios de que pelo menos uma das médias difere das outras. Em outras palavras, existem indícios estatísticos de que o processo de briquetagem altera o PCI para todas as biomassas analisadas.

## 6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada a caracterização dos resíduos da carnaúba na forma *in natura* e na forma de briquetes. De maneira geral, as propriedades analisadas apresentaram resultados semelhantes aos estudos desenvolvidos por outros pesquisadores do tema.

A carnaúba tem um grande potencial energético, apresentando elevado poder calorífico, além de baixo teor de umidade, características de um bom material combustível. A palha *in natura* apresentou um PCS de 17,51 MJ/kg enquanto o talo e a blenda *in natura* apresentaram um PCS de 17,29 MJ/kg e 17,26 MJ/kg, respectivamente.

O processo de densificação melhorou significativamente as propriedades da biomassa estudada. Após o processo de densificação do material, o teor de umidade da palha diminuiu de 11,76 % para 9,34 %. O teor de umidade do talo diminuiu de 12,97 % para 7,49 %, enquanto que para o briquete de blenda a redução foi de 11,32 % para 8,56 %. O PCS aumentou de 17,51 MJ/kg para 17,76 MJ/kg para a palha, enquanto que para o talo aumentou de 17,29 MJ/kg para 17,44 MJ/kg. O PCS do briquete de blenda de carnaúba também aumentou de 17,26 MJ/kg para 17,6 MJ/kg.

A densidade energética do briquete de palha aumentou de 2,98 para 12,78 kJ/cm<sup>3</sup> e o briquete apresentou uma resistência mecânica de 0,1 MPa; o talo variou de 2,89 para 11,33 kJ/cm<sup>3</sup>, com uma resistência mecânica de 0,3 MPa; a blenda variou de 2,79 para 11,98 kJ/cm<sup>3</sup>, com uma resistência de 0,2 MPa.

Pode-se destacar o potencial da utilização da blenda de carnaúba como uma possível fonte de energia térmica de acordo com as propriedades identificadas por este trabalho.

Estudos com diferentes granulometrias e teores de umidade podem auxiliar na busca pela melhor composição dos briquetes de palha, melhorando características não favoráveis observadas no presente trabalho, como a baixa resistência ao ensaio de tração e a baixa friabilidade.

## **7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- ✓ Estudar a aplicação de aglutinantes que possam alterar a friabilidade e a resistência mecânica dos briquetes de palha de carnaúba;
- ✓ Estudar a utilização de blendas de palha e talo de carnaúba com outras porcentagens e também associar outros tipos de biomassa na fabricação de briquetes;
- ✓ Avaliar a expansão longitudinal dos briquetes de carnaúba logo após a sua fabricação e acompanhar sua expansão ao longo do tempo, em decorrência da absorção de umidade.



## REFERÊNCIAS

AGUIAR S. B. **Projeto e construção de um friabilômetro de bancada para ensaios com briquetes**. Monografia – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará. 2017.

ALBUQUERQUE, F. M. F.; CESTARO, L. A. **Estudo comparativo das áreas de carnaubais no Baixo-Açu nos anos de 1966 a 1988, 1992**. In: ARANHA, T. de Q. (Org). Sesquicentenário da cidade do Assu: 1845-1995. Natal: Departamento Estadual de Imprensa, 1995. p. 205-212.

ALMEIDA, G., BRITO, J.O., PERRÉ, P. **Alterations in energy properties of eucalyptus wood and bark subjected to torrefaction: The potential of mass loss as a synthetic indicator**. Bioresource Technology. V. 101, Issue 24, 2010, p. 9778–9784.

ALVES, M. O. ; COELHO, J. D. **Extratativismo da carnaúba: relações de produção, tecnologia e mercados**. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, 2008.

ANDRADE, C.R. **Uso da espectroscopia no infravermelho próximo para avaliar propriedades da madeira e do carvão vegetal de eucalyptus**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Lavras, 2009.

AÇMA, H. H. Combustion characteristics of different biomass materials. **Energy Conversion e Management**. Istanbul: pergamon, v. 44, p. 155-162, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR. 13999**: Papel, cartão, pastas celulósicas e madeira - Determinação do resíduo (cinzas) após a incineração a 52 °C. Rio de Janeiro: Abnt, 2003b. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR.14929**: Madeira - Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa. Rio de Janeiro: Abnt, 2003a. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR. 3852**: Minérios de ferro como insumo para alto-forno e redução direta – determinação da densidade a granel, Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR. 8633**: carvão vegetal – determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR. 7222**: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndrico. Rio de Janeiro: Abnt, 2011. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR. 8112**: Carvão vegetal – Análise imediata. Rio de Janeiro: Abnt, 1986. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR. 2420**: Couro – Ensaio físicos e mecânicos – determinação da densidade aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 3 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM. D3176**: Standard Practice for Ultimate Analysis of Coal and Coke, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM. D5468-02**: Standard test method for gross calorific and ash value of waste materials. West Conshohocken, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM. E711- 87**: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Refuse-Derived Fuel by the Bomb Calorimeter, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM. E1131-08**: Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry, 2008.

BATAUS, Y. S. de L.; PASTORE JUNIOR. F.; OKINO, E. Y. A.; PASTORE T. C. M. **Carbonização integral de frutos de palmáceas**. Brasília: IBAMA, LPF, 1989.

BIZERRA, D.U.B. **Avaliação da Palha de Carnaúba *in natura* e Carbonizada para a produção de combustíveis sólidos: Análise Imediata, Poder Calorífico Superior e Densificação da Biomassa**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2017.

BORGES, A. C. P. **Caracterização Energética do Cavaco de *Eucalyptus grandis* "in natura" e torrefeito**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2015.

BRASIL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Brasília, 2002. 153 p.

BRASIL. **Balanco Energético Nacional 2017: ano base 2016**. Rio de Janeiro, EPE, 2017.

BRASIL. **Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social – BNDES**. 2011. Disponível em: <<http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes.pt>>. Acessado em 20 dez.2017.

BRAND, M. A. Energia de biomassa florestal. Rio de Janeiro: **Interciência**, 2010. 131 p.

BRITO, J. O., BARRICHELO, L. E., MURAMOTO, M. C., COUTO, H. D. **Estimativa da densidade a granel do carvão vegetal partir de sua densidade aparente**. Circular Técnica IPEF, Piracicaba, n. 150,1982. 6 p.

BRITO, J.O., BARRICHELO, L.E.G; ESALQ-USP; **Aspectos Técnicos da utilização da madeira e carvão vegetal como combustíveis**; In: 2º Seminário de Abastecimento Energético Industrial com Recursos Florestais; p.101-137; São Paulo; 1982

BROWN, M.E. **Introduction to thermal analysis**. London. Chapman and Hall, 1988. 207 p.

BUCKERIDGE, M. S, SANTOS W.D, SOUZA, A.P. **As Rotas para o Etanol Celulósico no Brasil**. Departamento de Botânica – IBUSP, Cidade Universitária - Butantã, São Paulo,2007.

BUCKERIDGE, M.S., SILVA, G.B.; CAVALARI, A. A. **Parede Celular**. In: Kerbauy, G.B. (ed). 2ed. Fisiologia Vegetal, Guanabara Koogan: Rio de Janeiro. 2008

CIDADE NOVA. "**PI é o principal produtor de carnaúba do país e receita chega a R\$ 102 milhões por ano**". Disponível em :<<https://cidadeverde.com/economiaenegocios/87022/pi-e-o-principal-produtor-de-carnauba-do-pais-e-receita-chega-a-r-102-milhoes-por-ano/>> Acesso em : 15 de dezembro de 2017.

CÂMARA SETORIAL DA CARNAÚBA. **A Carnaúba – preservação e sustentabilidade** – Fortaleza-CE: Câmara setorial da carnaúba, 2009.

CARVALHO, F.P.A.D.; GOMES, J.M.A. **Eco-eficiência na produção de cera de carnaúba no município de Campo Maior**, Piauí, 2004. Revista de Economia e Sociologia Rural, v. 46, n. 2, p. 421, 2008.

CARVALHO, F. P. A. **Eco-eficiência na Produção de Pó e Cera de Carnaúba no Município de Campo Maior (PI) Teresina**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) –Universidade Federal do Piauí, 2005.

CASTRO, A. F. N. M. **Efeito da idade e de materiais genéticos de Eucalyptussp.na madeira e carvão vegetal**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

CHAVES, A. M. B.; VALE, A. T.; MELIDO, R. C. N; ZOCH, V. P. Característica energética da madeira e carvão vegetal de clones de Eucalyptus spp. **Enciclopédia Biosfera**, v.9, n.17; p.533-542. 2013.

CHEN, W. H; KUO, P. C. **A study on torrefaction of various biomass materials and its impact on lignocellulosic structure simulated by a thermogravimetry**. *Energy*, n.35, 2010.

CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.E.S.; GÓMEZ, E.O. **Biomassa para energia**. 3. ed. Campinas: Editora da UNICAMP, 2008.

DANTAS, A.P. SANTOS, R. R.S., SOUZA, S. C. S. **O briquete como combustível alternativo para a produção de energia**. In: III Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental Goiânia/GO – IBEAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia. PFRH. 2012.

DCTECH. **Friabilometro: teste de friabilidade de comprimidos na indústria farmacêutica**. Disponível em<<https://www.dctech.com.br/friabilometro-teste-de-friabilidade-de-comprimidos-na-industria-farmacautica/>> Acesso em: 12 abril. 2018.

DENARI, G. B. **Princípios e aplicações de análise térmica**. São Carlos: Iqsc, 2012. 40 p. Disponível em: <[www.teses.usp.br](http://www.teses.usp.br)>. Acesso em: 12 abr. 2018.

IBGE. **Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Agropecuária, Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura**, 2016.

IONASHIRO, M. G. **Fundamentos da Termogravimetria e Análise Térmica Diferencial/Calorimetria Exploratória Diferencial**. Giz Editorial, 2005. 89 p.

FERREIRA, J. C.; FURTADO, T. S.; VALIN, M.; BRAND, M. A. & MUÑIZ, G. I. B. Potencialidade do uso de resíduos vegetais para a geração de energia através da técnica de briquetagem. **BioMassa&BioEnergia**, edição 01, vol. 02, p. 18-25, 2012.

FLORES, W. P.; YAMAJI, F. M. **Caracterização de briquetes através da determinação do teor de cinzas**. In: JORNADA CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DA UFSCar, 8.; CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 17., 2009, São Carlos. Anais. Disponível em: <[http://media.wix.com/ugd/306968\\_b7fa17fb845f9af85eac8bd2cb94cdaa.pdf](http://media.wix.com/ugd/306968_b7fa17fb845f9af85eac8bd2cb94cdaa.pdf)>. Acesso em: 17 mai. 2018.

FRIEDL, A.; PADOUVAS, E.; ROTTER, H.; VARMUZA, K. Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition. **Analytica Chemical Acta**, v. 544, n. 1-2, p. 191–198, 2005.

FURTADO, T. SCHMIDT et al. **Variáveis do processo de briquetagem e qualidade de briquetes de biomassa florestal**. *Pesq. Flor. Bras.*, [s.l.], v. 30, n. 62, p.101-106, 28 out. 2010. Embrapa Florestas.

GENTIL, L.V.B. **Tecnologia e Economia do Briquete de Madeira**. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília. Brasília, 2008.

GOMES, J.A.F.; LEITE, E.R.; CAVALCANTE, A.C.R.; CÂNDIDO, M.J.D.; LEMPP, B.; BOMFIM, M.A.D.; ROGÉRIO, M.C.P. **Resíduo agroindustrial da carnaúba como fonte de volumoso para a terminação de ovinos**. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 44, n. 1, p. 58, 2009.

GONÇALVES, J. E. **Avaliação energética e ambiental de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis***. Tese (Doutorado) - Curso de Agronomia, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Unesp, Botucatu, 2010.

GONÇALVES, B. F.; YAMAJI, F. M.; FERNANDEZ, B. O.; DA ROZ, A. L.; FLORIANO, F. S. Caracterização e comparação entre diferentes granulometrias de serragem de *Eucalyptus grandis* para a confecção de briquetes. **Revista Instituto Florestal**, São Paulo, v. 25, n. 2, p. 205-213, 2012. Disponível em: <[http://iflorestal.sp.gov.br/files/2014/05/RIF25-2\\_205-213.pdf](http://iflorestal.sp.gov.br/files/2014/05/RIF25-2_205-213.pdf)>. Acesso em: 18 mar. 2018.

HOFFMAN, B.S. **O Ciclo Combinado com Gaseificação Integrada e a Captura de CO<sub>2</sub>: Uma Solução para mitigar as emissões de CO<sub>2</sub> em Termelétricas a carvão em larga escala no curto prazo**, Dissertação de M.Sc., UFRJ/RJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.

HUGOT, E. **Handbook of Cane Sugar Engineering**. 3 ed. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., 1986. 1186p.

KLAUTAU, J. V. P. **Análise Experimental de uma Forno a lenha de Fluxo Cocorrente Para Secagem de Grãos**. Dissertação (mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) PPGERHA, UFPR. Curitiba: 2008.

- LIZCANO, J.V. **Poder calorífico, energia e cinzas da biomassa de cana-de-açúcar irrigada por gotejamento, para diferentes variedades, lâminas e processos de maturação.** Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2015. 92 p.
- MARQUES, J. S. **Uso do pó da palha de carnaúba em compósitos de quitosana.** Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Ciências Exatas e da Terra. Programa de Pós-Graduação em Química. 2012.
- MATTOS, P. P.; BORTOLI, C.; MARCHESAN, R.; ROSOT, N. C. **Caracterização física, química e anatômica da madeira de *Araucaria angus tifolia* (Bert.) O. Kuntze.** EMBRAPA Florestas, 2006. (Comunicado Técnico, n. 160).
- MCT. **Ministério da Ciência e Tecnologia.** SP, 2005.
- MCKENDRY, P. ENERGY PRODUCTION FROM BIOMASS (PART 1): overview of biomass. **Bioresource Technol**, v. 83, p. 37-46, 2002.
- MELO, V. P. S. **Produção de Briquetes de Carvão Vegetal com Alcatrão de Madeira.** 1999. 53 f. Tese (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2000.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. **Resenha Energética Brasileira (REB)**, 2017.
- MORTARI, D. A et al. Study of thermal decomposition and ignition temperature of bagasse, coal and their blends. **Thermal Engineering**, v. 9, p. 81–88, dez. 2010.
- MOTHÉ, C.G.; AZEVEDO, A.D.D. **Análise Térmica de Materiais.** São Paulo: Artiber, 2009. 324 p.
- NETO, O. A. R. **Carnaubeira.** Disponível em:  
<<http://www.floresta.ufpr.br/~paisagem/plantas/carnaubeira.htm>> Acesso em: 29 mai. 2018.
- NEVES, T.A. **Qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de Eucalyptus cultivados no sul de Minas Gerais.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Lavras. Minas Gerais, 2012.
- NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. Dendroenergia: fundamentos e aplicações. 2. ed. Rio de Janeiro: **Interciência**, 2003.
- NOGUEIRA, M. F. M. **Biomassa Energética:** Caracterização da Biomassa. Palestra Proferida na I Escola de Combustão, Florianópolis – SC 2007.
- NOGUEIRA, M. F. M.; RENDEIRO, G. 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.
- OLIVEIRA, A. F. S. **Avaliação energética da biomassa do bagaço de cana-de-açúcar em diferentes indústrias sucroenergéticas.** Dissertação de Mestrado Profissional em Produção – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2014.

PADILLA, E. R. D, et al. Produção e caracterização físico-mecânica de briquetes de fibra de coco e palha de cana-de-açúcar. **Revista Virtual de Química**, Niterói, volume 8, número 5. 2016.

PEREIRA, C. A.; SCHNITZLER, E.; CARVALHO F., SILVA, M. A. Estudo termoanalítico (tg, dtg e dsc) dos cafés in natura e processados. **Publication Uepg: Ciências Exatas e da Terra, Ciências Agrárias e Engenharias**, Ponta Grossa, Pr, v. 11, n. 1, p.61-66, 28 mar. 2005. Disponível em: <<http://www.revistas2.uepg.br>>. Acesso em: 30 jan. 2015.

PINCELLI, A.L.P.S.; BRITO, J.O.; CORRENTE, J.E. Avaliação da termorretificação sobre colagem na madeira de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribaeavar hondurensis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 61, p. 122-132, jun. 2002.

PONTE, M. R. **Blendas de bagaço de cana-de-açúcar: Caracterização das Propriedades e Investigação da Viabilidade Técnica**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-brasileira. Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável (UNILAB). Acarape, Ceará.2017.

PROTÁSIO, T.P. **Biomassa residual do coco babaçu: potencial de uso bioenergético nas regiões norte e nordeste do Brasil**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Tecnologia da Madeira, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Mg, 2014.

QUIRINO, W. F. **Utilização energética de resíduos vegetais**. Laboratório de produtos florestais LPF/IBAMA. Módulo do curso “Capacitação de agentes multiplicadores em valorização da madeira e dos resíduos vegetais”, p.4-32, 2000.

QUIRINO, W. F. Utilização energética de resíduos vegetais. Brasília: IBAMA, 2002. P.25. Disponível em: <<http://www.mundoflorestal.com.br/arquivos/aproveitamento.pdf>>. Acesso em: 22 abr. 2018.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A.P.A.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. S. Poder calorífico da madeira e de resíduos Lignocelulósicos. **Biomassa & Energia**, Brasília, v. 1, n. 2, p. 173-182, 2004.

SANTOS, M. A. S. **Parâmetros de qualidade do carvão vegetal para uso em alto-forno**. FÓRUM NACIONAL SOBRE CARVÃO VEGETAL, 1., 2008, Belo Horizonte. Anais. Belo Horizonte: UFMG, 2008.

SANTOS, F.A.; QUEIRÓZ, J.H. DE; COLODETTE, J.L.; FERNANDES, S.A.; GUIMARÃES, V.M. Potencial da palha de cana-de-aucar para produção de etanol. **Química nova**, v.35, n.5, p.1004–1010, 2012.

SCALET, V. **Caracterização e confecção de briquetes da casca de Licuri (*Syagrus coronata* (MART) BECC.) para produção de energia**. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Centro de Ciências e Tecnologia. Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2015.

SCALET, V., DA RÓZ, A., SANTOS, L.R.O., et al., “Produção de Briquetes a partir da Casca do Fruto de Licuri (*Syagrus coronata*) e Palha de Cana-de-Açúcar”. **Revista Virtual de Química**, v. 10, n. 1, no prelo, 2018.

SILVA, D. A., YAMAJI, M. F., BARROS, J. L., et al., “Caracterização de Biomassas para a Briquetagem”. **Revista Floresta**, v. 45, n. 4, pp.713-722, 9 set. 2015a.

SILVA, P. R. N.; \* GONÇALVES, G. R.; FREITAS, J. C. Preparação, Caracterização e Avaliação na Gaseificação de Celuligninas de Bagaço de Cana e Casca de Arroz: Caso de Reaproveitamento de Resíduos Lignocelulósicos. **Rev. Virtual Química**. 2016.

STRAPASSON, A. B. **A Energia Térmica e o Paradoxo da Eficiência Energética: Desafios para um Novo Modelo de Planejamento Energético**. Dissertação (Mestrado em Energia) - Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/>>. Acesso em: 02 dez. 2017.

TAVARES, S. R.L.; SANTOS, T.E. **Uso de diferentes fontes de biomassa vegetal para produção de biocombustíveis sólidos**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPSOLOS) Universidade Federal do Rio de Janeiro (Escola de Química/UFRJ), 2013.

TÁVORA, L. J. **Estudo do Parâmetro Friabilidade em Briquetes de Biomassa**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Ceará (UFC). Departamento de Engenharia Mecânica. Fortaleza, Ceará, 2017.

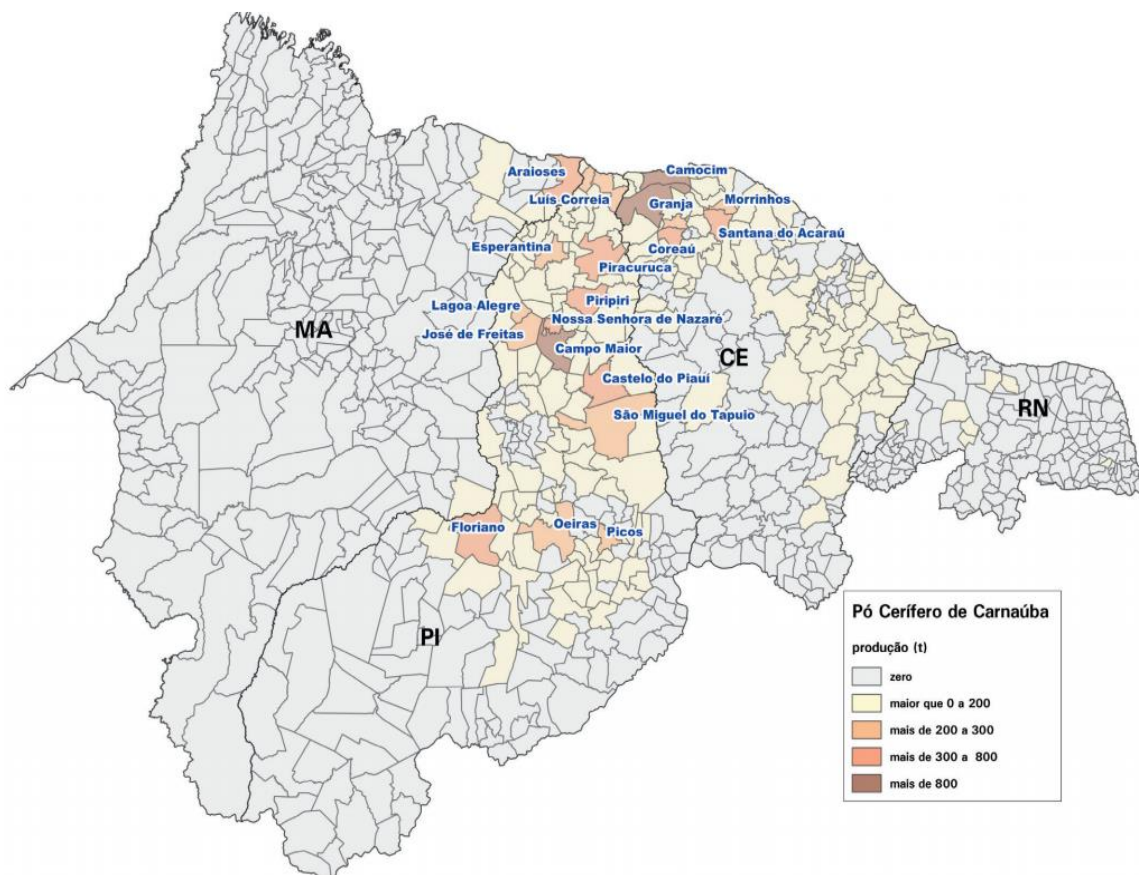
TOMELERI, J. O. P.; VALENTIM, L. B.; SILVA, J. P.; YAMAJI, F. M.; \* PÁDUA. A. **Caracterização Química e Energética de Epicarpo Residual do Pinhão Manso (*Jatropha curcas*L.) e Briquete Produzido**. Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Ciências Ambientais, Sorocaba-SP, Brasil.2017.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá (*Himeneacourbaril* L.). **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 2, n. 1/2, p. 45-53, 2001.

VALE, A. T.; DIAS, I. S.; SANTANA, M. A. E. Relação entre as propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies do cerrado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n.1, p. 137- 145, 2010.

VIEIRA, A. C. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas para geração de energia**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, UNIOESTE, 2012.

ZHOU, C. et al. Co-combustion of bituminous coal and biomass fuel blends: Thermochemical characterization, potential utilization and environmental advantage. **Bioresource Technology**, v. 218, p. 418–427, 2016

**ANEXO A – Produção de pó cerífero de carnaúba, Brasil 2016**

Fonte: IBGE, Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Agropecuária, Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura 2016.



## ANEXO B – Tabela T de Student

| GL/P | Nível de Confiança |       |       |       |       |        |        |        |         |
|------|--------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|---------|
|      | 1%                 | 60%   | 70%   | 80%   | 90%   | 95%    | 99,8%  | 99,0%  | 99,9%   |
|      | 0,5                | 0,4   | 0,3   | 0,2   | 0,1   | 0,05   | 0,02   | 0,01   | 0,001   |
| 1    | 1                  | 1,376 | 1,963 | 3,078 | 6,314 | 12,706 | 31,821 | 63,657 | 636,619 |
| 2    | 0,816              | 1,061 | 1,386 | 1,886 | 2,92  | 4,303  | 6,965  | 9,925  | 31,598  |
| 3    | 0,765              | 0,978 | 1,25  | 1,638 | 2,353 | 3,182  | 4,541  | 5,541  | 12,924  |
| 4    | 0,741              | 0,941 | 1,19  | 1,533 | 2,132 | 2,776  | 3,747  | 4,604  | 8,61    |
| 5    | 0,727              | 0,92  | 1,156 | 1,476 | 2,015 | 2,571  | 3,365  | 4,032  | 6,869   |
| 6    | 0,718              | 0,906 | 1,134 | 1,44  | 1,943 | 2,447  | 3,143  | 3,707  | 5,959   |
| 7    | 0,711              | 0,896 | 1,119 | 1,415 | 1,895 | 2,365  | 2,365  | 3,499  | 5,408   |
| 8    | 0,706              | 0,889 | 1,108 | 1,397 | 1,86  | 2,306  | 2,896  | 3,355  | 5,041   |
| 9    | 0,703              | 0,883 | 1,1   | 1,383 | 1,833 | 2,262  | 2,821  | 3,25   | 4,781   |
| 10   | 0,7                | 0,879 | 1,093 | 1,372 | 1,812 | 2,228  | 2,764  | 3,169  | 4,587   |
| 11   | 0,697              | 0,876 | 1,088 | 1,363 | 1,796 | 2,201  | 2,718  | 3,106  | 4,437   |
| 12   | 0,695              | 0,873 | 1,083 | 1,356 | 1,782 | 2,179  | 2,681  | 3,055  | 4,318   |
| 13   | 0,694              | 0,87  | 1,079 | 1,35  | 1,771 | 2,16   | 2,65   | 3,012  | 4,221   |
| 14   | 0,692              | 0,868 | 1,076 | 1,345 | 1,761 | 2,145  | 2,624  | 2,977  | 4,14    |
| 15   | 0,691              | 0,866 | 1,074 | 1,341 | 1,753 | 2,131  | 2,602  | 2,947  | 4,073   |
| 16   | 0,69               | 0,865 | 1,071 | 1,337 | 1,746 | 2,12   | 2,583  | 2,921  | 4,015   |
| 17   | 0,689              | 0,863 | 1,069 | 1,333 | 1,74  | 2,11   | 2,567  | 2,898  | 3,965   |
| 18   | 0,688              | 0,862 | 1,067 | 1,33  | 1,734 | 2,101  | 2,552  | 2,878  | 3,922   |
| 19   | 0,688              | 0,861 | 1,066 | 1,328 | 1,729 | 2,093  | 2,539  | 2,861  | 3,883   |
| 20   | 0,687              | 0,86  | 1,064 | 1,325 | 1,725 | 2,086  | 2,528  | 2,845  | 3,85    |
| 21   | 0,686              | 0,859 | 1,063 | 1,323 | 1,721 | 2,08   | 2,518  | 2,831  | 3,819   |
| 22   | 0,686              | 0,858 | 1,061 | 1,321 | 1,717 | 2,074  | 2,508  | 2,819  | 3,792   |
| 23   | 0,685              | 0,858 | 1,06  | 1,319 | 1,714 | 2,069  | 2,5    | 2,807  | 3,767   |
| 24   | 0,685              | 0,857 | 1,059 | 1,318 | 1,711 | 2,064  | 2,492  | 2,797  | 3,745   |
| 25   | 0,684              | 0,856 | 1,058 | 1,316 | 1,708 | 2,06   | 2,485  | 2,787  | 3,726   |
| 26   | 0,684              | 0,856 | 1,058 | 1,315 | 1,706 | 2,056  | 2,479  | 2,779  | 3,707   |
| 27   | 0,684              | 0,856 | 1,057 | 1,314 | 1,703 | 2,052  | 2,473  | 2,771  | 3,69    |
| 28   | 0,683              | 0,856 | 1,056 | 1,313 | 1,701 | 2,048  | 2,467  | 2,763  | 3,674   |
| 29   | 0,683              | 0,854 | 1,055 | 1,311 | 1,699 | 2,045  | 2,462  | 2,756  | 3,659   |
| 30   | 0,683              | 0,854 | 1,055 | 1,31  | 1,697 | 2,042  | 2,457  | 2,75   | 3,646   |
| 40   | 0,681              | 0,851 | 1,05  | 1,303 | 1,684 | 2,021  | 2,423  | 2,704  | 3,551   |
| 60   | 0,679              | 0,848 | 1,046 | 1,296 | 1,671 | 2      | 2,39   | 2,66   | 3,46    |
| T    | 0,674              | 0,842 | 1,036 | 1,282 | 1,645 | 1,96   | 2,326  | 2,576  | 3,291   |

Fonte: Adaptado de Moore (2014).