

Investigação do potencial do talo e da palha da carnaúba para utilização como biocombustível

Investigation of the potential of the carnauba stalk and of the carnauba's straw to use as biofuel

Rafael Nogueira Lima¹, Raul Lima Paixão¹,
Rosali Barbosa Marques², Jackson Queiroz Malveira²,
Josy Anteveli Osajima Furtini³, Maria Alexsandra de Sousa Rios⁴

¹ Universidade Federal do Ceará – PPGEM – Campus do Pici, Bloco 714, CEP: 60.455-900, Fortaleza, Ceará, Brasil

² Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará – Larbio/NUTEC, Pici, CEP: 60.440-552, Fortaleza, Ceará, Brasil

³ Universidade Federal do Piauí – LIMAV/UFPI, Campus Ministro Petrônio Portela, CEP: 64049-550, Teresina, Piauí, Brasil

⁴ Universidade Federal do Ceará – GRINTEQUI/DEM/CT – Campus do Pici, Bloco 714, CEP: 60455-760, Fortaleza, Ceará, Brasil

e-mail: alexsandrarios@ufc.br, rafaellima@alu.ufc.br, raulpaixao@gmail.com, rosaliarquess@gmail.com, jackson.malveira@nutec.ce.gov.br, josyfurtini@gmail.com

RESUMO

A carnaúba (*Copernicia prunifera*) é uma espécie vegetal comum no Nordeste do Brasil e possui grande importância comercial no que se refere a exploração/exportação da cera extraída de suas folhas. Assim, visando o pleno aproveitamento dos resíduos gerados na cadeia produtiva da carnaúba, neste trabalho é apresentada a caracterização da palha e do talo “*in natura*”, bem como pós densificação (produção de briquetes), com o objetivo de investigar a possível aplicação como biocombustíveis. A metodologia experimental envolveu a determinação dos teores de umidade, cinzas, voláteis, carbono fixo, poder calorífico superior, ensaios de resistência ao impacto, compressão diametral e termogravimetria. A análise elementar (CHNS/O) também foi realizada. Com 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% e 80,41%, para os briquetes de palha e talo. Para carbono fixo obteve-se 19,98% e 16,08 % para a palha e o talo *in natura* e 20,9% e 16,8%, para os briquetes de palha e talo, respectivamente. Quanto ao conteúdo energético, a palha *in natura* obteve poder calorífico superior da ordem de 17,51 MJ/kg e o talo *in natura* 17,29 MJ/kg. No que se refere a densidade energética, a produção dos briquetes proporcional aumentos da ordem de 328,9% (2,98 para 12,78 kJ/cm³) para a palha e de 292% (2,89 para 11,33 kJ/cm³) para o talo. Quanto ao ensaio de resistência mecânica, o briquete de palha apresentou uma resistência de 0,1 MPa e o briquete de talo de 0,3 MPa. Diante do exposto, pode-se inferir que a palha e o talo de carnaúba possuem potencial para utilização como biocombustíveis.

Palavras-chave: Carnaúba; Caracterização; Briquete; Poder Calorífico Superior.

ABSTRACT

The carnauba (*Copernicia prunifera*) is a common plant species in Northeast Brazil and has a great commercial importance due to exploration/exportation of the wax extracted from its leaves. Therefore, aiming the use of the residues derived from carnauba's production chain, this work shows the characterization of the stalk and straw “*in natura*”, and after densification (briquettes production), with the aim to investigate the possible application as biofuels. The analyses involved the determination of moisture, ash, volatile matter, fixed carbon, gross calorific value, impact resistance, diametrical compression, and thermogravimetry. Elemental analysis (CHNS/O) was also performed. In relation to the volatile matter the carnauba's straw and stalk “*in natura*” obtained 70.89% and 81.12% while carnauba briquettes of straw and stalk showed 70.02% and 80.41%, respectively. For the fixed carbon - a calculated value - the results were 19.98% for the straw and 16.08% for the stalk. After briquettes production were obtained 20.9% and 16.8% for the straw and the stalk, respectively. In relation to the gross calorific value, the carnauba's straw and stalk “*in natura*” obtained

Autor Responsável: Maria Alexsandra de Sousa Rios

Data de envio: 21/06/2018

Data de aceite: 19/10/2018

17.51 MJ/kg and 17.29 MJ/kg. For the energetic density, briquettes' production provided an increase of 328.9% (2.98 to 12.78 kJ/cm³) for the straw and 292% (2.89 to 11.33 kJ/cm³) for the stalk. The mechanical resistance test for the carnauba's straw briquette showed 0.1 MPa and the carnauba's stalk briquette showed 0.3 MPa. According to the results, it can be inferred that the carnauba's straw and stalk have the potential for use as biofuels.

Keywords: Carnauba; Characterization; Briquette; Gross Calorific Value.

1. INTRODUÇÃO

A matriz energética utilizada no mundo globalizado depende, em grande parte, de fontes de energia de origem fóssil, o que pode ocasionar contaminação do ambiente e geração de gases de efeito estufa (GEE) [1]. A crise relacionada a produção de petróleo que ocorreu na década de 70, motivou alguns países que possuíam forte dependência de combustíveis fósseis a aumentar o interesse por fontes renováveis, diversificando os meios de obtenção de energia para transformação, distribuição e consumo em processos produtivos [2]. O Brasil é um dos países que apresenta condição bastante favorável, em relação ao resto do mundo, no que diz respeito ao potencial de geração de energia renovável [1].

Em se tratando de fontes renováveis, uma das formas de energia que pode ser vastamente utilizada no Brasil é a oriunda da biomassa. A biomassa pode ser definida como todo tipo de matéria de origem orgânica, oriunda de plantas como árvores, algas e restos de culturas agrícolas [3].

Dentro desse cenário tem-se a carnaúba (*Copernicia prunifera*), a qual é um tipo de palmeira que existe em abundância em grande parte do nordeste do Brasil, inclusive no estado do Ceará, que é um dos estados que mais produz cera de carnaúba em todo o país. Esta árvore é utilizada, principalmente, para a extração da cera – seu produto mais nobre –, mas também é utilizada no artesanato, construção civil e outras aplicações comerciais. Após a retirada da cera, o material restante é denominado de palha de carnaúba ou bagana [4].

Assim, diante do crescente interesse pela obtenção de energia a partir da biomassa e, de potenciais resíduos agroindustriais que ainda são subaproveitados, tem-se a realização da caracterização da biomassa como uma das principais etapas para a investigação do potencial energético. A obtenção de informações sobre as propriedades físicas, análise imediata (teor de umidade, matéria volátil, cinzas e carbono fixo), análise elementar, a qual determina os elementos químicos presentes, e poder calorífico são imprescindíveis para indicação de um material como combustível [5,6].

A utilização da biomassa como fonte de energia pode ser melhor aproveitada por meio da utilização do processo de produção de briquetes. O processo briquetagem teve seu início na China e na Inglaterra, no qual se aglomerava de forma manual as partículas, com o uso de substâncias aglomerantes. Entretanto, foi na França por volta de 1842, que se começou a comercializar os briquetes. Atualmente, a produção de briquetes é realizada em grande escala, em vários países, com destaque para os Estados Unidos, Europa e Sudeste Asiático [7].

Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o potencial energético do talo e da palha de carnaúba (pós extração da cera), por meio da caracterização dessas biomassas, utilizando as técnicas de análise elementar, análise imediata, análise termogravimétrica, determinação do poder calorífico superior, ensaios mecânicos de compressão diametral e resistência ao impacto, a fim de avaliar sua resistência mecânica para transporte e armazenamento, além da avaliação da viabilidade técnica da transformação em briquetes.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Amostras

As análises foram realizadas no Laboratório de Referência em Biocombustíveis Professor Expedito Parente (LARPIO), pertencente a Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará (NUTEC), localizado em Fortaleza-CE. As amostras de palha e o talo de carnaúba (Figura 1) foram coletadas na cidade de Morrinhos-CE, em outubro de 2016. Após coletadas, as amostras foram acondicionadas em um *container*, localizado no NUTEC, sob temperatura ambiente e proteção contra radiação solar direta e/ou chuva. Para realização das análises os materiais – palha e talo – foram triturados e peneirados (peneira Granutest de 4 mm) e posteriormente, mantidos em sacos plásticos lacrados.



Figura 1: Amostras de talo e palha de carnaúba.

2.2 Briquetagem

Os briquetes foram produzidos com o auxílio de uma prensa hidráulica Marcon MPH-15 (Figura 2A) e um molde cilíndrico em aço inox, aplicando-se uma força de 7,5 toneladas, adquirindo-se uma pressão de 37,5 MPa, com um tempo de repouso de aproximadamente 10 minutos. O molde cilíndrico possui 5 cm de diâmetro interno e é composto por um cilindro de compressão, um tubo para acomodação da biomassa e uma base de fixação (Figura 2B). Foram produzidos briquetes de palha, talo e de uma mistura constituída de 50% de palha e 50% de talo. Os experimentos foram realizados em quadruplicata.

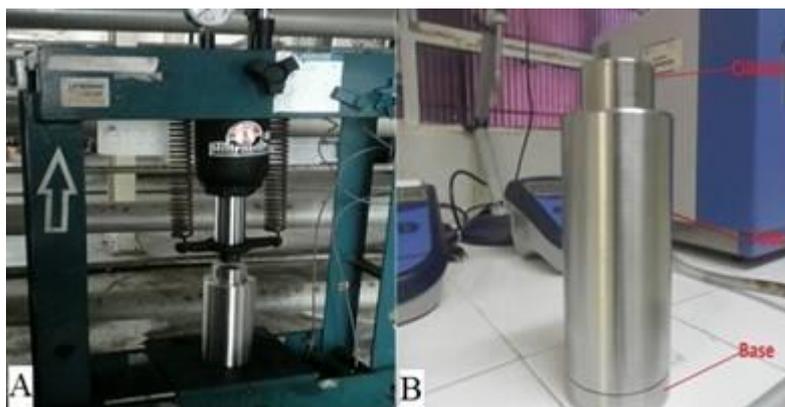


Figura 2: Prensa hidráulica (Figura 2A) e molde cilíndrico em aço inox (Figura 2B) utilizados para a produção dos briquetes.

2.3 Análise elementar

Com a análise elementar obteve os teores de carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N), enxofre (S) e oxigênio (O), utilizou-se o procedimento previsto na norma ASTM D3176-15 [8] e o equipamento Perkin Elmer modelo 2400 Series II CHNS/O Elemental Analyzer, operando na configuração de CHNS [9]. A análise foi realizada no Laboratório de Biomassa da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), unidade de Fortaleza.

2.3 Análise imediata

Foram utilizados os procedimentos descritos na norma NBR 8112 [10] para o teor de umidade, voláteis e carbono fixo e o procedimento descrito na norma NBR 13999 [11], para a obtenção do teor de cinzas. As análises foram realizadas em quadruplicata.

2.4 Poder calorífico

Verificou-se o Poder Calorífico Superior (PCS) de cada material de acordo com a NBR 8633 [12], utilizando-se um calorímetro IKA C1. As análises foram realizadas em quadruplicata. Para obtenção do poder calorífico inferior (PCI) foi utilizada a equação descrita por BRITO [13], a qual considera a quantidade percentual de hidrogênio presente na amostra. O PCI foi calculado de acordo com a Equação 1.

$$PCI = PCS - \left(\frac{600 \cdot 9H}{100} \right) \quad (1)$$

Na qual: PCI = Poder Calorífico Inferior (MJ/kg); PCS = Poder Calorífico Superior (MJ/kg) e H = teor de hidrogênio da amostra.

2.5 Densidades a granel e aparente

Para determinação da densidade a granel utilizou-se a NBR 3852 [14], com adaptações. Após compactação, determinou-se a densidade aparente de acordo com a NBR 2420 [15].

2.6 Compressão diametral

Os ensaios mecânicos dos briquetes produzidos foram realizados no equipamento EMIC de modelo DL 30000N. Foi realizada a avaliação da resistência à tração por compressão diametral, utilizando-se uma célula de carga com capacidade de 500 kgf e velocidade de ensaio de 0,3 mm/s, conforme a norma NBR 7222 [16].

2.7 Resistência ao impacto

Com o objetivo de avaliar a resistência dos briquetes de palha, talo e da mistura ao impacto, foi realizado um ensaio baseado no experimento desenvolvido por Távora e Aguiar [17, 18]. As amostras foram pesadas antes e após o experimento. O aglomerado compactado de maior massa foi considerado o que restou do briquete após o teste. Foi utilizada a Equação 2 para calcular a perda de massa percentual [17].

$$\%Perda = \left(\frac{m_{final}}{m_{inicial}} \right) \cdot 100 \quad (2)$$

Na qual: %Perda = Percentual de perda de massa; m_{final} = massa final (g) e $m_{inicial}$ = massa inicial (g).

2.8 Análise termogravimétrica

A análise termogravimétrica (TG) foi realizada no Laboratório do Núcleo Interdisciplinar de Materiais Avançados (LIMAV), da Universidade Federal do Piauí, localizado em Teresina-PI. Foi utilizado o analisador termogravimétrico modelo SDT Q600. Os experimentos foram realizados de acordo com os seguintes parâmetros: massa de amostra de 5 a 6 mg; faixa de temperatura entre 30 e 1000 °C; fluxo de argônio com vazão de 50 mL/min e taxa de aquecimento de 10 °C/min.

2.9 Análise estatística

Todas as análises foram realizadas em quadruplicata e tiveram como medida de dispersão estatística o desvio padrão (σ). As médias obtidas foram submetidas ao teste t de Student com significância de 95 %. O teste consiste em calcular os valores de t a partir da combinação dos valores de uma mesma propriedade, antes e após o processo de briquetagem. O valor de t pode ser calculado por meio do erro padrão de diferenças de média e da diferença das médias em si. O erro padrão da diferença de médias pode ser calculado pela Equação 3 e, com isso, o valor de t para as diferenças entre as duas distribuições é calculado pela Equação 4.

$$s_D = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x}_A)^2 + \sum(x_i - \bar{x}_B)^2}{N_A + N_B - 2} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_B} \right)} \quad (3)$$

$$t = \frac{\bar{x}_A - \bar{x}_B}{s_D} \quad (4)$$

Na qual: s_D = erro padrão de médias; x = variável medida; \bar{x} = média da variável medida; N_A = número de medidas do primeiro conjunto de dados; N_B = número de medidas do segundo conjunto de dados.

Compara-se então o valor de t calculado com o valor da tabela t de Student, determinado pelo valor da significância, que é 95 %, e pelo número de graus de liberdade (GL) calculado pela Equação (5). Caso o valor de t calculado pelas distribuições de média seja maior que o determinado pela tabela através dos parâmetros utilizados, então há diferenças entre as médias, caso seja menor, então não há diferenças entre as médias.

$$GL = N_A + N_B - 2 \quad (5)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise elementar

Na Tabela 1 estão apresentados os resultados da análise elementar do talo e da palha de carnaúba na forma *in natura*.

Tabela 1: Resultados da análise elementar para o talo e a palha de carnaúba na forma *in natura*.

Biomassa	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)
Palha	39,40	4,76	2,66	2,34	47,61
Talo	44,03	5,14	1,35	1,87	50,84

De acordo com os resultados, pode-se inferir que a palha de carnaúba apresenta um menor percentual de carbono, hidrogênio e oxigênio em relação ao talo. No estudo de Tavares e Santos [20] a palha de carnaúba apresentou um percentual 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 o talo de carnaúba.

3.2 Análise imediata

Na Tabela 2 estão expostos os resultados para as amostras de palha, talo e da mistura composta de 50% de palha e 50% de talo, na forma *in natura* e de briquetes (Figura 3).

Tabela 2: Análise imediata para a palha, talo e mistura nas formas *in natura* e de briquetes.

Análise Imediata	Biomassa					
	Palha		Talo		*Mistura	
	<i>in natura</i>	briquete	<i>in natura</i>	briquete	<i>in natura</i>	briquete
Teor de Umidade (%)	11,76 ± 0,5	9,34 ± 0,7	11,60 ± 0,5	9,96 ± 0,5	11,45 ± 0,2	9,3 ± 0,9
Teor de Cinzas (%)	9,13 ± 0,7	8,99 ± 0,5	2,8 ± 0,2	2,75 ± 0,3	7,3 ± 0,5	7,17 ± 0,2
Teor de Voláteis (%)	70,9 ± 0,8	70,0 ± 1,1	81,12 ± 1,1	80,41 ± 1,1	73,7 ± 0,7	74,5 ± 1,7
Carbono Fixo (%)	19,98 ± 0,9	20,9 ± 1,0	16,1 ± 1,0	16,8 ± 1,0	19,04 ± 1,1	18,4 ± 1,8

*Composta de 50% de palha e 50% de talo.

No estudo de Tavares & Santos [20] a palha de carnaúba apresentou um teor de voláteis (TV) de 89,42 %, já para Bizerra [21] este teor foi de 75,77 %, entretanto, neste estudo o teor apresentou uma média de 70,89 %, valor próximo ao mencionado por Bizerra. Para as amostras talo e mistura (50% de palha e 50% de talo), os valores encontrados para o teor de voláteis foram 81,12 e 73,7 %, respectivamente. No entanto, comparando com outras biomassas, como por exemplo o bagaço de cana-de-açúcar, segundo Ponte [22] o TV foi de 69%. No caso da casca de Licuri, estudada por Scalet [19] o TV foi 75,73%. Isto mostra que os valores obtidos para a palha, o talo e a mistura corroboram com outras biomassas que foram estudadas como possíveis fontes de energia térmica.

Para Tavares & Santos [20], a palha contém 9,74 % de teor de cinzas (TC), neste estudo, o valor médio foi de 9,13 %, com variação entre 8,34 e 9,93%. Ferreira et al.[23] encontraram um teor médio de cinzas de 5,2%. Para as amostras talo e mistura os valores encontrados para o teor de cinzas foram 2,8 e 7,3%, respectivamente. Com relação a outras biomassas, segundo Ponte [22] o bagaço de cana possui um teor de cinzas de 15,4 % e de acordo com Nogueira [24], a casca de arroz possui um TC de 20,6 %. Os teores de cinzas obtidos neste trabalho apresentaram-se com valores reduzidos, o que significa resultados promissores para possíveis combustíveis, pois quanto menor o TC, menor o dano que pode ser causado em dutos e componen-

tes do sistema [25].

No que se refere ao teor de umidade, Quirino [26] recomenda que para materiais que serão utilizados como combustível este parâmetro deva variar entre 8 e 12%, o que é observado nas biomassas analisadas, tornando-os atrativos para queima. O teor de umidade médio encontrado na palha foi de 11,76 %, Tavares & Santos [20] encontraram 9,98 %. Segundo Marques [27] o teor de umidade da palha foi de 7,83 %.

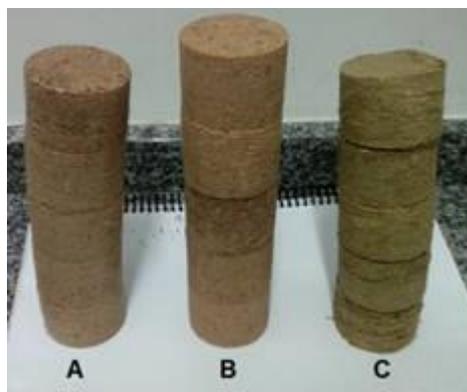


Figura 3: Briquetes da mistura (A), talo (B) e palha de carnaúba (C)

O briquete de palha de carnaúba apresentou um teor médio de voláteis (TV) de 70,0 %. Para os briquetes de talo e mistura (50% de palha e 50% de talo) os valores encontrados para TV foram 80,41 e 74,5 %, respectivamente. O teor de cinzas para o briquete de palha foi de 8,99 %. Para as amostras de talo e mistura os teores de cinzas foram 2,75 % e 7,17 %, respectivamente. O teor de Carbono Fixo presente no briquete de palha teve uma média de 20,9 %. O talo e a mistura apresentaram valores de carbono fixo de 16,8 e 18,4 %, respectivamente.

3.3 Análise energética

A densidade do briquete de palha de carnaúba foi de $0,72 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$, resultado próximo ao observado para o briquete de talo ($0,65 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$). Em comparação com outra biomassa, Scalet [19] reportou a densidade da casca de Licuri de $0,387 \text{ g/cm}^3$, assim, as densidades da palha e talo são consideravelmente superiores. Com relação ao potencial energético, a multiplicação da densidade pelo poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) proporciona a obtenção da densidade energética (DE), parâmetro importante na indicação de potenciais combustíveis. Na Tabela 3 estão apresentados os dados da análise energética para a palha, talo e mistura.

Tabela 3: Análise energética da palha, talo e mistura nas formas *in natura* e de briquetes.

Parâmetros	Biomassa					
	Palha		Talo		Mistura	
	<i>in natura</i>	briquete	<i>in natura</i>	briquete	<i>in natura</i>	briquete
Densidade (g/cm^3)	$0,17 \pm 0,02$	$0,72 \pm 0,01$	$0,17 \pm 0,02$	$0,65 \pm 0,02$	$0,16 \pm 0,01$	$0,68 \pm 0,01$
PCS (MJ/kg)	$17,51 \pm 0,1$	$17,76 \pm 0,1$	$17,29 \pm 0,1$	$17,44 \pm 0,1$	$17,26 \pm 0,1$	$17,6 \pm 0,1$
PCI (MJ/kg)	$16,44 \pm 0,1$	$16,69 \pm 0,1$	$16,21 \pm 0,1$	$16,38 \pm 0,1$	$16,18 \pm 0,1$	$16,49 \pm 0,1$
*DE (PCS) (kJ/cm^3)	$2,98 \pm 0,01$	$12,78 \pm 0,01$	$2,89 \pm 0,01$	$11,33 \pm 0,01$	$2,79 \pm 0,01$	$11,98 \pm 0,01$
**DE (PCI) (kJ/cm^3)	$2,79 \pm 0,01$	$12,02 \pm 0,01$	$2,76 \pm 0,01$	$10,65 \pm 0,01$	$2,59 \pm 0,02$	$11,21 \pm 0,02$

*DE (PCS) = densidade energética a partir do poder calorífico superior

**DE (PCI) = densidade energética a partir do poder calorífico inferior

De acordo com os resultados, a palha de carnaúba após compactação – produção do briquete – apresentou um aumento de $2,98 \text{ kJ/cm}^3$ para $12,78 \text{ kJ/cm}^3$, representando uma variação de 328,86 %, enquanto o talo obteve um aumento de $2,89 \text{ kJ/cm}^3$ para $11,33 \text{ kJ/cm}^3$ (variação de 292,04%). A mistura composta de 50% de palha e 50% de talo também apresentou um aumento expressivo em sua densidade energética, da ordem de $2,79 \text{ kJ/cm}^3$ para $11,98 \text{ kJ/cm}^3$ (variação de 329,39%). Em comparação com outra biomassa, o briquete de bagaço de cana-de-açúcar apresentou densidade energética de $13,22 \text{ kJ/cm}^3$ [22], a qual representa

um aumento de 95% em relação ao bagaço de cana *in natura*. Assim, pode-se inferir que o processo de briquetagem aumenta a densidade energética de uma biomassa, em decorrência da compactação do material e consequente redução do volume ocupado [19, 26, 27]. Na Figura 4 estão apresentados os dados de PCI e PCS para a palha, talo e blenda (= mistura) nas formas *in natura* e de briquetes.

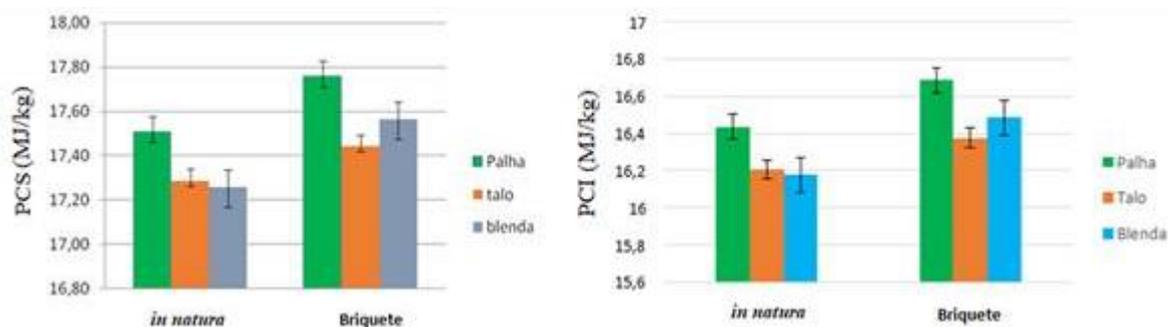


Figura 4: PCS e PCI para a palha, talo e blenda (= mistura) nas formas *in natura* e de briquetes.

3.4 Análise Mecânica

Na Tabela 4 estão representados os resultados da análise mecânica para os briquetes de palha, talo e mistura (50% de palha e 50% de talo).

Tabela 4: Resultados da análise mecânica para os briquetes de palha, talo e mistura.

Biomassa	Força de ruptura (N)	Tensão de Ruptura (MPa)	*Nemp	**Hemp (m)	***(%) Perda
Palha	147,3 ± 69,4	0,1 ± 0,03	904 ± 60	46,3 ± 3,1	50,5 ± 3,5
Talo	907,2 ± 138,7	0,3 ± 0,05	1011 ± 16	51,6 ± 0,6	1,9 ± 0,6
Mistura	510,1 ± 103,5	0,2 ± 0,03	958 ± 30	49,0 ± 1,6	39,9 ± 1,5

* Nemp = Número de briquetes empilhados obtidos a partir da avaliação da resistência mecânica dos briquetes.

** Hemp = altura de empilhamento obtida a partir da avaliação do Nemp.

*** (%) Perda = perda de massa pós ensaio de resistência ao impacto.

Na Figura 4 está apresentado o briquete de palha de carnaúba antes (A) e após (B) o ensaio de compressão diametral.

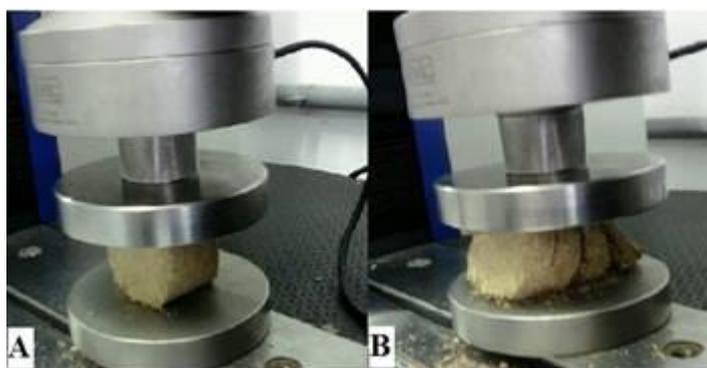


Figura 5: Briquete de palha de carnaúba antes (A) e após (B) o ensaio de compressão diametral.

A palha de carnaúba apresentou a menor resistência mecânica (0,1 MPa) e uma altura de empilhamento (Hemp) de 46,3 m. O talo apresentou a maior resistência mecânica (0,3 MPa) e altura máxima de empilhamento de 51,6 m. Já a mistura, apresentou resistência mecânica de 0,2 MPa e altura máxima de empilhamento de 49,0 m. Na Figura 5 estão apresentados os briquetes da mistura (A), do talo (B) e da palha (C) pós ensaio de compressão diametral.

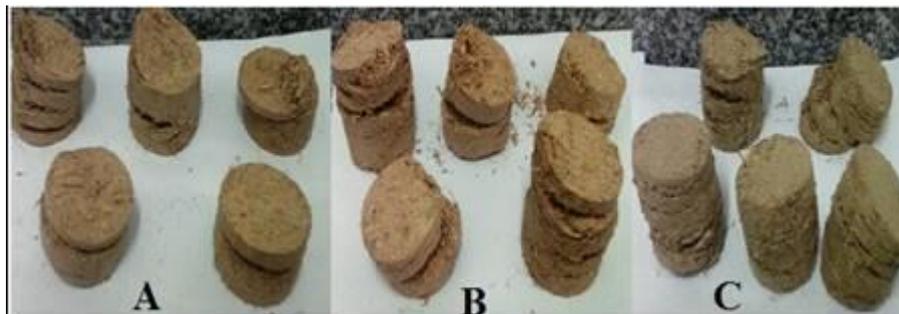


Figura 6: Briquetes da mistura (A), do talo (B) e da palha (C) pós ensaio de compressão diametral.

No que se refere ao ensaio de resistência ao impacto, o briquete de palha de carnaúba apresentou perda de 50,5%, a qual foi inferior ao resultado observado por Padilla et al. [28] para a palha de cana-de-açúcar (89,9%). Tal diferença pode ser justificada pela diferença granulométrica das partículas utilizadas na produção dos briquetes, bem como nas características químicas de cada biomassa. Os briquetes de talo foram os que apresentaram menor perda de massa dentre os três materiais avaliados (1,9 %). O fator de maior influência para esse comportamento foi, provavelmente, o perfil alongado da matéria-prima, que proporciona maior entrelaçamento das fibras.

Comparando os resultados com os de outras biomassas, os briquetes de casca de Licuri obtiveram perda de 68,3% [16] e os briquetes de serragem de eucalipto perdas variando entre 8 e 32%, de acordo com o estudo de Gonçalves et al. [29]. Constata-se assim, que os briquetes de palha e talo de carnaúba apresentam uma boa resistência ao impacto, com destaque para o talo que obteve uma perda menor que 2%, Figura 6.

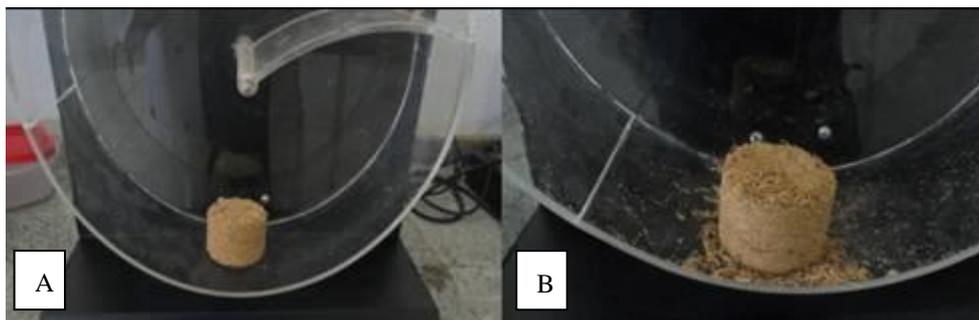


Figura 7: Briquete de talo de carnaúba antes (A) e após (B) o ensaio de resistência ao impacto.

3.5 Análise termogravimétrica

Na Figura 7 estão apresentadas as curvas da análise termogravimétrica (TG) e a derivada (DTG) para a palha e talo de carnaúba *in natura*.

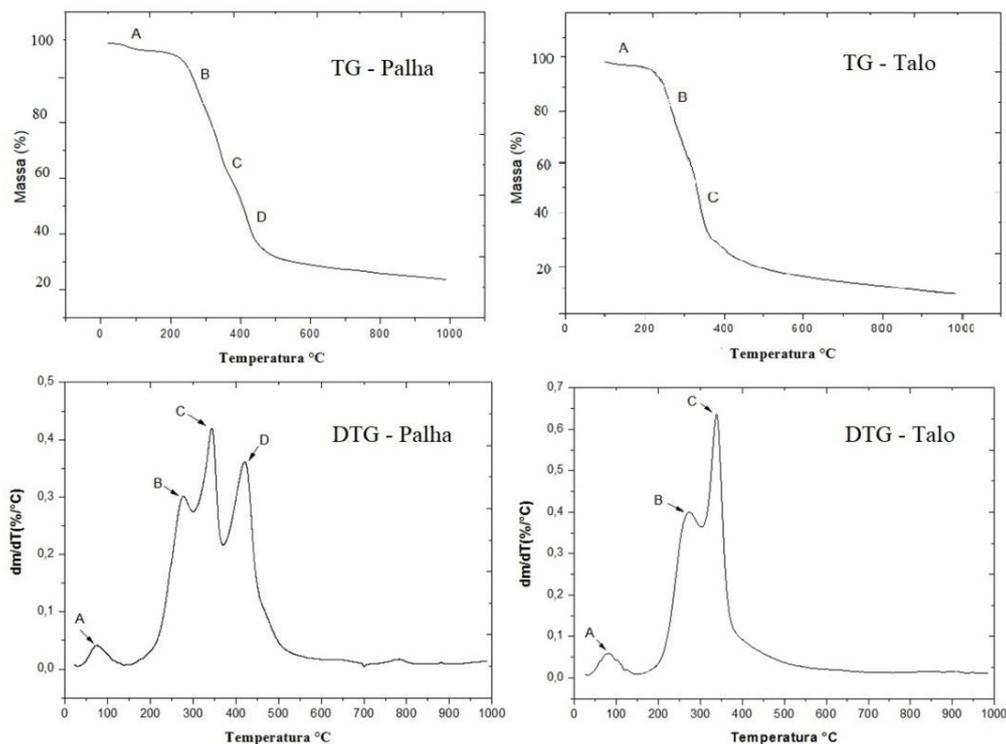


Figura 8: Curvas TG-DTG para a palha e o talo de carnaúba *in natura*.

Na curva TG para a palha de carnaúba estão representados 4 eventos. Para o primeiro evento (A), a perda de massa ocorre entre as temperaturas 50 e 140 °C, associado a perda de umidade. Entre as temperaturas de 200 e 600 °C ocorrem os eventos B, C e D, para os quais tem-se uma perda de massa acentuada, a qual está associada aos materiais voláteis presentes na amostra e a degradação térmica da celulose, hemicelulose e lignina, os quais se degradam quando submetidas a temperaturas superiores a 220 °C [9]. Na análise da derivada primeira (DTG) obteve-se as temperaturas de pico para cada evento: 74 °C (A), 275 °C (B), 351 °C (C) e 419 °C (B). Na Tabela 5 estão os resultados da análise termogravimétrica para a palha e talo de carnaúba *in natura*.

Tabela 5: Resultados da análise termogravimétrica para a palha e talo de carnaúba *in natura*.

Biomassa	Evento (A)		Eventos (B, C e D)		Resíduo	
	ΔT (°C)	Perda em massa (%)	ΔT (°C)	Perda em massa (%)	ΔT (°C)	Perda em massa (%)
Palha	50 - 140	5	200 - 600	65	600 - 1000	20
Talo	50 - 150	5	200 - 600	68	600 - 1000	20

De acordo com os dados apresentados na Figura 7 e Tabela 5, o primeiro evento térmico para as biomassas avaliadas ocorreu entre 50 e 150 °C, associado a perda de umidade. Entre as temperaturas de 200 e 600 °C ocorreu uma perda de massa acentuada, a qual representa a perda de materiais voláteis e a degradação térmica da celulose, hemicelulose e lignina. Para o talo de carnaúba o primeiro evento ocorreu entre 50 e 150 °C, também associado a perda de água. Entre as temperaturas de 200 e 600 °C ocorreu uma perda de massa significativa associada a perda de materiais voláteis. Os três eventos da curva DTG para o talo apresentaram temperaturas de pico de 80,5 °C (A), 271,4 °C (B) e 338,5 °C (C).

3.6 Análise estatística

Na Tabela 6 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. O valor de t máximo obtido pela tabela t de Student para que não haja diferença entre as médias foi de 2,447.

Tabela 6: Resultados da análise estatística para a análise imediata das biomassas avaliadas.

Biomassa	Resultado	TU (%)		TV (%)		TC (%)		CF (%)	
		<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
	σ	0,51	0,65	0,76	1,07	0,70	0,54	1,04	1,17
	Erro padrão	0,41		0,66		0,44		0,78	
	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	16,84
	Variância	0,21	0,28	1,26	1,30	0,03	0,08	1,16	0,94
	σ	0,46	0,53	1,12	1,14	0,17	0,28	1,08	0,97
	Erro padrão	0,35		0,80		0,16		0,73	
	Teste t	4,68		0,88		0,32		1,04	
*Mistura	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
	σ	0,21	0,90	0,69	1,69	0,55	0,16	1,14	1,81
	Erro padrão	0,46		0,91		0,29		1,07	
	Teste t	4,68		0,88		0,49		0,62	

**Composta de 50% de palha e 50% de talo.

Em relação ao teor de umidade para a palha, talo e mistura obteve-se valores de t de Student considerando uma significância de 95%. Estes resultados indicam hipótese nula, na qual considera os resultados para as médias iguais e esta deve ser descartada, ou seja, deve-se admitir hipótese alternativa, onde pelo menos uma média difere, pois, o valor de t encontrado foi maior que o limite que era de 2,447. 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 95%, com 6 graus de liberdade, portanto, os valores calculados de t para a diferença entre as médias foi menor que 2,447. Pode-se concluir assim que a hipótese nula pode ser aceita, ou seja, as médias para as amostras *in natura* e para os briquetes são iguais, ou seja, de acordo com os indícios estatísticos o processo de briquetagem não altera as referidas propriedades.

Logo, pode-se dizer que o processo de briquetagem alterou, estatisticamente, apenas a umidade em comparação à biomassa *in natura* para as três amostras (palha, talo e mistura). Constatou-se, portanto, uma diminuição dos valores de umidade após o processo de briquetagem e, para as propriedades TV, TC e CF não houve alteração.

4. CONCLUSÕES

A palha *in natura* apresentou um PCS de 17,51 MJ/kg enquanto o talo e a mistura apresentaram um PCS de 17,29 MJ/kg e 17,26 MJ/kg, respectivamente. O processo de densificação (produção de briquetes) 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 do talo diminuiu de 12,97 % para 7,49 %, enquanto que para o briquete da mistura a redução foi de 11,32 % para 8,56 %. Com relação a densidade energética do briquete de palha foi constatado um aumento de 2,98 – palha *in natura* – para 12,78 kJ/cm³, com resistência mecânica de 0,1 MPa. O talo variou de 2,89 para 11,33 kJ/cm³, com uma resistência mecânica de 0,3 MPa e a mistura variou de 2,79 para 11,98 kJ/cm³, com resistência de 0,2 MPa. De acordo com os dados estatísticos pode-se inferir que o processo de briquetagem alterou significativamente a umidade, quando comparado com a biomassa *in natura*, para as três amostras (palha, talo e mistura). Diante dos resultados obtidos no presente estudo pode-se concluir que, os resíduos obtidos do processo de produção da cera de carnaúba – palha e talo

– possuem potencial para aplicação como biocombustíveis.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (Processos 406697/2013-2 e 459355/2014-7) e a CAPES pelo apoio financeiro e ao Dr. Adriano Lincoln Albuquerque Mattos pelos ensaios mecânicos.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] GOLDEMBERG, J., LUCON, O. “Energia e meio ambiente no Brasil”, Estudos Avançados, v. 21, n. 59, pp. 7–20, 2007.
- [2] STRAPASSON, A.B., A Energia Térmica e o Paradoxo da Eficiência Energética: Desafios para um Novo Modelo de Planejamento Energético, Dissertação de M.Sc., USP/SP, Brasil, 2004.
- [3] MCKENDRY, P. “Energy production from biomass (part 1): overview of biomass”, Bioresource Technology, v. 83, n. 1, pp. 37-46, 2002.
- [4] CÂMARA SETORIAL DA CARNAÚBA. <http://www.sfiec.org.br/portaltv2/sites/sindicarnauba/>. Acesso em abril de 2018.
- [5] VIEIRA, A.C., Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas para geração de energia, Dissertação de M.Sc., UNIOESTE/PR, Cascavel, PR, Brasil, 2012.
- [6] BORGES, A.C.P., Caracterização Energética do Cavaco de Eucalyptus grandis "in natura" e torrefeito, Dissertação de M.Sc., UFBA/BA, Salvador, BA, Brasil, 2015.
- [7] MELO, V.P.S., *Produção de Briquetes de Carvão Vegetal com Alcatrão de Madeira*, Dissertação de M.Sc., UFV/MG, Viçosa, MG, Brasil, 2000.
- [8] ASTM. D3176, Standard Practice for Ultimate Analysis of Coal and Coke, 2015.
- [9] PROTÁSIO, T.P., Biomassa residual do coco babaçu: potencial de uso bioenergético nas regiões norte e nordeste do Brasil, Dissertação de M.Sc., UFLA/MG, Lavras, MG, Brasil, 2014.
- [10] ABNT. NBR 8112: Carvão vegetal – Análise imediata, Rio de Janeiro, 1986.
- [11] ABNT. NBR 13999: Papel, cartão, pastas celulósicas e madeira - Determinação do resíduo (cinzas) após a incineração a 52 °C, Rio de Janeiro, 2003b.
- [12] ABNT. NBR 8633: Carvão vegetal – determinação do poder calorífico, Rio de Janeiro, 1984.
- [13] BRITO, J.O. “Expressão da produção florestal em unidades energéticas”, In: Congresso Florestal Brasileiro, pp. 280-282, Curitiba, Sept. 1993.
- [14] ABNT. NBR 3852: Minérios de ferro como insumo para alto-forno e redução direta – determinação da densidade a granel, Rio de Janeiro, 2009.
- [15] ABNT. NBR 2420: Couro – Ensaios físicos e mecânicos – determinação da densidade aparente, Rio de Janeiro, 2015.
- [16] ABNT. NBR 7222: Argamassa e concreto: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 1994.
- [17] TÁVORA, L.E.J., *Estudo do Parâmetro Friabilidade em Briquetes de Biomassa*, Trabalho de Conclusão de Curso, UFC/CE, Brasil, Fortaleza, CE, 2017.
- [18] AGUIAR, S.B., Projeto e Construção de um Friabilômetro de Bancada para Ensaios com Briquetes de Biomassa, Trabalho de Conclusão de Curso, UFC/CE, Fortaleza, CE, Brasil, 2017.
- [19] 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.
- [20] TAVARES, S. R.L., SANTOS, T.E., “Uso de diferentes fontes de biomassa vegetal para produção de biocombustíveis sólidos”, *Holos*, v. 5, n. 29, pp. 19-27, 2013.
- [21] 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, UFC/CE, Fortaleza, CE, Brasil, 2017.
- [22] PONTE, M.R., Blendas de bagaço de cana-de-açúcar: caracterização das propriedades e investigação da viabilidade técnica, Trabalho de Conclusão de Curso, UNILAB/CE, Acarape, CE, Brasil, 2017.
- [23] FERREIRA, J.C., FURTADO, T.S., VALIN, M., *et al.*, “Potencialidade do uso de resíduos vegetais para

- a geração de energia através da técnica de briquetagem”, *Biomassa Bioenergia*, , v. 2, n. 1, pp. 18-25, 2012.
- [24] NOGUEIRA, M.F.M., “Biomassa Energética: Caracterização da Biomassa”, In: I Escola de Combustão, Florianópolis/SC, Brasil, 2007.
- [25] HOFFMAN, B.S., O ciclo Combinado com Gaseificação Integrada e a Captura de CO₂: Uma Solução para mitigar as emissões de CO₂ em Termelétricas a carvão em larga escala no curto prazo?, Dissertação de M.Sc., UFRJ/RJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.
- [26] QUIRINO, W.F., IBAMA, <http://www.mundoflorestal.com.br/arquivos/aproveitamento.pdf>. Acessado em abril de 2018.
- [27] MARQUES, J.S., *Uso do pó da palha de carnaúba em compósitos de quitosana*, Dissertação de M.Sc., UFRN/RN, Natal, RN, 2012.
- [28] PADILLA, E.R.D., PIRES, I.C.S.A., YAMAJI, F.M., *et al.*, “Produção e caracterização físico-mecânica de briquetes de fibra de coco e palha de cana-de-açúcar”, *Revista Virtual de Química*, v. 8, n. 5, pp. 1334-1346, 2016.
- [29] GONÇALVES, B.F., YAMAJI, F.M., FERNANDEZ, B.O., *et al.*, “Caracterização e comparação entre diferentes granulometrias de serragem de *Eucalyptus grandis* para a confecção de briquetes”, *Revista Instituto Florestal*, v. 25, n. 2, pp. 205-213, 2012.
- [30] SINGH, Y.D., MAHANTA, P., BORA, U. “Comprehensive characterization of lignocellulosic biomass through proximate, ultimate and compositional analysis for bioenergy production”, *Renewable Energy*, v. 103, n. Supplement C, pp. 490–500, 2017.

ORCID

Rafael Nogueira Lima	https://orcid.org/0000-0001-6373-2549
Raul Lima Paixão	https://orcid.org/0000-0002-7667-5050
Rosali Barbosa Marques	https://orcid.org/0000-0001-8109-0826
Jackson Queiroz Malveira	https://orcid.org/0000-0002-6912-7937
Josy Antevéli Osajima Furtini	https://orcid.org/0000-0001-7089-3244
Maria Alessandra de Sousa Rios	https://orcid.org/0000-0002-3145-0456