

Uso de serragem de diferentes espécies florestais no processo de compactação

Eduardo Schneid^{1*}

¹Universidade Federal do Mato Grosso, Av. Alexandre Ferronato, 1200 - Res. Cidade Jardim, CEP: 78550-728, Sinop, MT, Brasil

Original Article

*Corresponding author:
eduardoschneid87@gmail.com

Keywords:

Biomass

Energy source

Briquettes

Pellets

Palavras-chave:

Biomassa

Fontes energéticas

Briquetes

Pellets

Received in

2020/07/14

Accepted on

2020/09/16

Published in

2021/01/12



DOI: <http://dx.doi.org/10.34062/afs.v7i4.10808>



RESUMO: A serragem, resíduo advindo do desdobro de toras, torna-se uma alternativa viável para a geração de energia renovável. O objetivo da pesquisa é mensurar as propriedades tecnológicas da serragem compactada, avaliando o efeito da mistura de serragens oriunda de diferentes espécies na qualidade final do produto compactado para uso como combustível. Para isso, foi utilizada serragem de quatro espécies florestais para confecção de 30 corpos de prova compactados para cada tratamento. Os tratamentos T1, T2, T3 e T4 são compostos por serragem de cada espécie e o T5 é composto a partir da mistura das serragens. Foram realizados testes para mensurar as propriedades físicas, mecânicas, químicas e energéticas. Os dados foram submetidos a ANOVA e à análise de correlação de Pearson entre algumas propriedades. Para as propriedades físicas, os valores médios de Da (densidade aparente) dos corpos de prova compactados para cada tratamento apresentaram diferenças estatísticas significativas, exceto entre os tratamentos T1 e T5, sendo que o tratamento T5 apresentou maior valor. Nas propriedades mecânicas, todos os tratamentos podem ser classificados como muito pouco friável. Quanto as propriedades energéticas, a média da DE (densidade energética) entre os tratamentos foi de 3,90 Gcal.m⁻³. As correlações estatisticamente significativas foram entre Dg (densidade a granel) e PCS (poder calorífico superior) e entre RTCD (resistência a tração) e dureza Rockwell. A partir dos resultados, conclui-se que a mistura da serragem de diferentes espécies (T5) apresentou qualidade final satisfatória, sendo viável a utilização da mistura para produção de combustível sólido compactado.

Use of sawdust from different forest species in the compaction process

ABSTRACT: Sawdust, waste from log splitting, becomes a viable alternative for the generation of renewable energy. The objective of the research is measure of the technological properties of compacted sawdust, evaluating the effect of the mixture of sawdust from different species on the final quality of the compacted product for use as fuel. For this purpose, sawdust from four forest species was used to make 30 compacted specimens for each treatment. The T1, T2, T3 and T4 treatments are composed of sawdust of each species and T5 is composed from the mixture of sawdust. Tests were carried out to measure physical, mechanical, chemical and energetic properties. The data were submitted to ANOVA and Pearson's correlation analysis between some properties. For physical properties, the average values of Da (apparent density) of the compacted specimens for each treatment showed statistically significant differences, except between treatments T1 and T5, and treatment T5 showed greater value. In terms of mechanical properties, all treatments can be classified as very friable. As for energy properties, the average DE (energy density) between treatments was 3.90 Gcal.m⁻³. The statistically significant correlations were between Dg (bulk density) and PCS (superior heat content) and between RTCD (tensile strength) and Rockwell hardness. From the results, it is concluded that the mixture of sawdust of different species (T5) presented satisfactory final, being viable the use of the mixture for the production of compacted solid fuel.

Introdução

As buscas por fontes energéticas alternativas e sustentáveis tornou-se uma questão mundial, fazendo com que muitos países começassem uma corrida frenética por essas fontes. As políticas públicas visando a diminuição do uso de combustíveis fósseis e a discussão sobre o aquecimento global, tem levado países a adotarem meios para substituí-los por fontes energéticas renováveis, como a energia eólica, energia solar, hidrelétricas e biomassa florestal (Abramowski, Posorski, 2000; Martins et al., 2008; Brasil, 2010, Nascimento et al., 2012).

Entre as possíveis biomassas florestais, a serragem advinda do desdobro de toras nas indústrias madeireiras, torna-se uma alternativa para a geração de energia de forma sustentável e renovável (Teixeira, 2009; Brasil, 2015). Porém, a utilização correta desse resíduo nem sempre acontece, devido a fatores como dificuldade de fiscalização da destinação dos resíduos produzidos, falta de conhecimento do setor em formas alternativas para a reutilização, logística e até mesmo por falta de competitividade de mercado (Bonissoni, 2017). A destinação errônea da serragem causa impactos sobre o meio físico, biológico e socioeconômico (Preilipper et al., 2016).

No entanto, utilizar esse resíduo para a fabricação de briquetes e pellets é uma das várias alternativas de destinação correta sob os pontos de vista ambiental e econômico, por gerar energia a partir de insumos produzidos pela natureza ou decorrente de processos que utilizam recursos naturais renováveis (Preto e Mortoza, 2010). Esses dois produtos são oriundos do processo de compactação mecânica, que podem ser classificados como briquetagem e pelletização. A principal diferença entre briquetes e pellets é a dimensão, ou seja, os pellets possuem de 6 a 16 mm de diâmetro e comprimento de 25 a 30 mm enquanto que os briquetes têm entre 50 e 100 mm de diâmetro e comprimento entre 250 e 400 mm (Dias et al., 2012).

A compactação mecânica da serragem reduz o volume do material, implicando em armazenar mais energia em um menor espaço, sendo que a redução do volume é em média de 4 e 6 vezes (Dias et al., 2012). Os fatores que influenciam na qualidade final da biomassa compactada são devido ao processo (tempo, temperatura e pressão) e a matéria prima (teor de umidade, tamanho da partícula e composição química) (Shaw, 2008).

A qualidade dos produtos de biomassa compactada (briquetes e pellets) pode ser avaliada a partir das propriedades tecnológicas, sendo que as principais são: densidade aparente, resistência mecânica, poder calorífico e densidade energética. Portanto, o objetivo da pesquisa é mensurar as propriedades tecnológicas da serragem compactada, avaliando o efeito da mistura de serragem oriunda de

diferentes espécies na qualidade final do produto compactado para uso como combustível.

Material e Métodos

Material e caracterização da serragem

O material utilizado foi serragem gerada pelo desdobro de toras de quatro espécies: cedrinho (*Erisma uncinatum*), cupiúba (*Goupia glabra*), cambará (*Qualea* sp), itaúba (*Mezilaurus itauba*). A coleta do material foi realizada em quatro serrarias de pequeno e médio porte, localizadas no setor industrial Sul no município de Sinop/MT.

A serragem de cada espécie foi coletada após o desdobro das toras nas serrarias, colocada em um saco plástico e levado para o laboratório. A serragem foi classificada por meio de peneira de 8 mesh (2,36mm) sendo que o material retido foi descartado e o material que passou pela abertura da peneira foi utilizada na confecção dos corpos de prova.

Após o peneiramento inicial foram realizados os seguintes procedimentos com a serragem: determinação do teor de umidade inicial, secagem e classificação quanto a granulometria.

Para determinar o teor de umidade inicial, foi pesado em uma balança analítica 15 g de serragem, obtendo-se a massa úmida. Logo após a serragem foi colocada em um saco de papel e mantida em estufa a uma temperatura de 103 ± 2 °C. Com intervalo de 2 horas a serragem foi pesada em balança analítica até que a massa permanecesse constante e o teor de umidade das amostras fora determinado utilizando-se a Equação 1.

$$TU_i = \frac{M_1 - M_2}{M_2} * 100 \quad (1)$$

sendo: TU_i = teor de umidade (%); M_1 = massa inicial da amostra úmida (g); M_2 = massa final da amostra seca (g).

Após a determinação do teor de umidade inicial, a serragem foi seca em estufa até o teor de umidade final de 10% para fabricação dos corpos de prova. Para isso, a serragem foi colocada em estufa elétrica a 70 °C e o tempo de permanência na estufa foi determinado a partir do controle da umidade corrente calculada por meio das Equações 2 e 3.

$$m_{sc} = \frac{mc}{\frac{TU_{i+1}}{100}} \quad (2)$$

$$U_c = \frac{m_{sc} - m_s}{m_s}, \quad (3)$$

sendo: m_{sc} = massa seca corrente da amostra (g); mc = massa corrente (g); TU_i = teor de umidade inicial da amostra (%); U_c = umidade corrente da amostra (%); m_s = massa seca da amostra (g).

A granulometria da serragem foi realizada a partir da classificação por peneiras de 8 mesh (2,36 mm), 16 mesh (1,18 mm), 40 mesh (425 μ m), 60 mesh (250 μ m), 100 mesh (150 μ m), 200 mesh (75 μ m) e também considerado o fundo, ou seja, os finos que passaram pela peneira de 200 mesh. Após 1 minuto de peneiramento, foi pesado em uma balança de precisão o material que ficou retido em cada peneira e o material que passou pela peneira de 200 mesh.

Tratamentos e amostragem

Tabela 1. Delineamento experimental.

Tratamento	Espécie	Nome popular	Nº de cps
T1	<i>Mezilaurus itauba</i>	Itaúba	30
T2	<i>Goupia glabra</i>	Cupiúba	30
T3	<i>Erisma uncinatum</i>	Cedrinho	30
T4	<i>Qualea sp</i>	Cambará	30
T5	Mix de espécies	Todas espécies	30

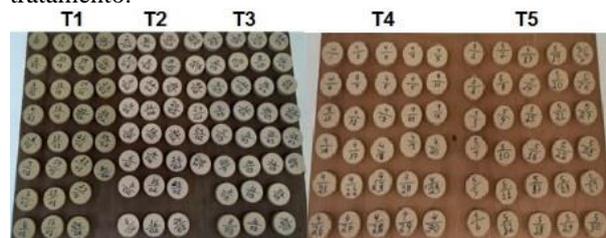
Tabela 2. Testes realizados e amostragem.

Teste	Material	Amostra
Densidade a granel	Serragem	1
Densidade aparente	Corpos de prova compactados	30
Expansão volumétrica	Corpos de prova compactados	30
Resistência a tração por compressão diametral	Corpos de prova compactados	5
Dureza Rockwell	Corpos de prova compactados	5
Friabilidade	Corpos de prova compactados	10
Propriedades químicas	Serragem	2

Compactação mecânica da serragem

O processo de compactação da serragem foi realizado em um molde cilíndrico de aço inoxidável, com diâmetro interno de 35 mm e comprimento de 200 mm, com auxílio de um pistão acionado manualmente por meio de prensa hidráulica de capacidade máxima de 15 toneladas. A extração dos corpos de prova após a compactação é realizada por meio de fundo móvel no molde. O resultado da compactação são corpos de prova com dimensões aproximadas de 35 mm de diâmetro e 10 mm espessura (Figura 1).

Figura 1. Corpos de prova compactados para cada tratamento.



Cada corpo de prova foi confeccionado com 10 g de serragem e o processo de compactação foi realizado sem aquecimento e uso de aglutinante A

A partir da serragem coletada foram definidos 5 tratamentos para confecção dos corpos de prova compactados. Os tratamentos T1, T2, T3 e T4 são compostos por serragem de espécies diferentes e o tratamento T5 é composto a partir da mistura, em partes iguais, da serragem das 4 espécies utilizadas nos demais tratamentos. A amostra para cada tratamento é composta por 30 corpos de prova, conforme Tabela 1. O tamanho da amostra utilizado em cada teste realizado é apresentado na Tabela 2.

pressão utilizada no processo foi de 92 MPa e com tempo de aplicação de 60 segundos.

Logo após as confecções dos corpos de prova para cada tratamento, estes foram acondicionados em uma câmara climática, para avaliar a influência das condições climáticas durante o armazenamento. Os corpos de prova foram submetidos a um único acondicionamento em câmara climatizada com uma temperatura variando entre 20 °C a 30 °C e uma umidade relativa variando em torno de 50 a 65 %, onde foram avaliadas a cada 24 horas e por um período de 72 horas.

Propriedades físicas

Os testes realizados para a caracterização das propriedades físicas foram: densidade a granel da serragem, densidade aparente, razão de compactação e expansão volumétrica dos corpos de prova.

A densidade a granel (D_g) foi determinada a partir das recomendações da norma ABNT NBR 6922 (ABNT, 1981) modificada, pois foi utilizado uma caixa com dimensões 100×100×100 mm. A densidade a granel foi calculada de acordo com a Equação 4.

$$D_g = \frac{Ma}{Vol} \quad (4)$$

sendo: D_g = densidade a granel da serragem (g.cm-3); Ma = massa da serragem (g); Vol = volume interno da caixa (cm³).

A densidade aparente (Da) dos corpos de prova foi determinada pelo método estereométrico após a compactação e acondicionamento de 72 horas. Para determinar a massa foi utilizada uma balança de precisão e um paquímetro digital para determinar as dimensões. A densidade aparente foi calculada por meio da Equação 5.

$$Da = \frac{Ma}{Vol} \quad (5)$$

sendo: Da = densidade aparente (g.cm-3); Ma = massa do corpo de prova (g); Vol = volume do corpo de prova (cm³).

De posse dos resultados anteriores, a razão de compactação (RC) foi determinada a partir da razão entre a média da densidade aparente (Da) e a densidade a granel da serragem (Dg).

A expansão volumétrica foi determinada após a compactação da serragem, utilizando-se a diferença entre as dimensões de cada corpo de prova antes e após o acondicionamento de 24, 48 e 72 horas, de acordo com a Equação 6.

$$Exp_{vol} = \frac{(V_2 - V_1)}{V_1} \times 100 \quad (6)$$

sendo: Exp_{vol} = expansão volumétrica da amostra compactada (%); V_1 = volume do corpo de prova após a compactação (mm³); V_2 = volume do corpo de prova após o acondicionamento (mm³).

Propriedades mecânicas

Os testes realizados para a caracterização das propriedades mecânicas foram: resistência à tração por compressão diametral, dureza Rockwell e friabilidade.

A resistência à tração por compressão diametral foi realizada após o acondicionamento de 72 horas, em uma máquina universal de ensaios com capacidade máxima de 30.000 kgf e baseados nos procedimentos da norma ABNT NBR 7222 (ABNT, 1994). A carga foi aplicada no sentido transversal dos corpos de prova e perpendicular a pressão de compactação com velocidade de aplicação de 3 mm/min. Após os testes, os valores de resistência foram calculados por meio da Equação 7.

$$RTCD = \frac{2 \times F \times 100}{\pi \times D \times e} \times 100 \quad (7)$$

sendo: $RTCD$ = resistência à tração por compressão diametral (MPa); F = força (N); D = diâmetro do corpo de prova (mm); e = espessura do corpo de prova (mm).

Os testes de dureza Rockwell foram realizados em uma máquina modelo CAUTION,

adaptada para os testes em madeiras e seus derivados. Em cada corpo de prova foram realizadas 5 leituras em diferentes pontos, sendo descartado o maior e o menor valor da leitura em cada corpo de prova. Em cada ponto foi determinado um tempo de leitura de 3 segundos.

A friabilidade foi determinada a partir do teste de tamboramento, responsável por determinar o esfarelamento por meio de atritos e choques mecânicos. Esse teste foi realizado baseado na norma ABNT NBR 8740 (ABNT, 1985) utilizada no carvão vegetal para determinação do índice de quebra e abrasão. A realização do teste foi uma adaptação da norma, onde 5 (cinco) corpos de prova de cada tratamento foram depositadas em uma caixa com dimensões internas de 100×100×100 mm e a rotação do equipamento foi de aproximadamente 35 rotações por minutos (rpm) durante 5 minutos. O teste foi realizado em duplicata para cada tratamento após as 72 horas de acondicionamento das amostras.

Os corpos de prova foram pesados anteriormente e posteriormente ao teste para determinar a taxa de perda da massa fragmentada pelo efeito de tamboramento. A friabilidade foi determinada conforme a Equação 8.

$$Friabilidade (\%) = \frac{(P_2 - P_1)}{P_1} \times 100 \quad (8)$$

sendo: P_1 = média do peso inicial (g); P_2 = média do peso final (g).

Propriedades químicas e energéticas

As propriedades químicas avaliadas foram: teor de cinzas, teor de extrativos e teor de lignina e determinados de acordo com os procedimentos descritos nas normas ABNT NBR 1399 (ABNT, 2003), ABNT NBR 14853 (ABNT, 2002) e ABNT NBR 7989 (ABNT, 2003), respectivamente, sendo realizados em duplicata em cada tratamento.

As propriedades energéticas das amostras foram determinadas por meio de equações da literatura e utilizando-se os valores das propriedades químicas determinadas para cada tratamento. O poder calorífico superior (PCS) foi estimado a partir da Equação 9 proposta por Telmo e Louzada (2011).

$$PCS = 14,3377 + (0,1228 \times Lig) + (0,1353 \times Ext) \quad (9)$$

sendo: PCS = poder calorífico superior (Kcal.kg-1), Lig é o teor de lignina (%), Ext é o teor de extrativos (%).

A partir do PCS foram calculados o poder calorífico inferior (PCI), poder calorífico útil (PCU) e a densidade energética (DE), conforme Equação 10, 11 e 12, respectivamente.

$$PCI = PCS - 324 \quad (10)$$

$$PCU = PCI \times [(1 - (0,01 * U))] - (6 \times U) \quad (11)$$

$$DE = PCU \times D_a \quad (12)$$

sendo: PCI = poder calorífico inferior (Kcal.kg⁻¹); PCS = poder calorífico útil (Kcal.kg⁻¹) U é o teor de umidade na base úmida (%), DE = densidade energética (Kcal.m⁻³) Da = densidade aparente (kg.m⁻³).

Análises estatísticas

Os dados foram submetidos a análises de variância (ANOVA) afim de verificar diferenças entre as médias dos resultados dos tratamentos para cada propriedade. Para isso, foi definido que a variável dependente é a propriedade e a independente é o tratamento. Antecedendo a aplicação da ANOVA foram realizados os testes de independência, normalidade e homogeneidade de variância. No caso de rejeição da hipótese nula (H0), aplicou-se o teste de Tukey com nível de 5% de significância. As análises estatísticas foram

realizados com auxílio do software estatístico Sisvar 5.6.

Foi realizada a análise de correlação de Pearson utilizando-se os valores de TUF, Da, Dg, Friabilidade, RTCD, RDR e PCS.

Resultados e discussão

Propriedades físicas

A serragem utilizada na confecção dos corpos de prova foi seca em estufa antes da compactação para atingir o teor de umidade recomendado para fabricação de briquetes ou pellets, variando entre 8 e 12% (Gonçalves, 2010). O teor de umidade final (TUF) da serragem de cada tratamento foi de 9,34% para o T1, 9,58 para o T2, 9,89% para o T3, 9,47% para o T4 e 9,57% para o T5.

As propriedades físicas da serragem (Dg) e dos corpos de prova compactados (Da e RC) são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Propriedades físicas da serragem e dos corpos de prova.

Tratamento	D _g (kg.m ⁻³)	D _a (kg.m ⁻³)	RC
T1	179,22	924,60 a (6,15)	5,16 a (0,04)
T2	189,11	914,75 b (9,58)	4,84 b (0,05)
T3	221,01	887,85 c (5,82)	4,02 c (0,03)
T4	237,66	895,16 d (9,33)	3,78 d (0,04)
T5	231,46	927,85 a (9,19)	4,01 c (0,04)

Letras diferentes entre linhas na mesma coluna representam diferença estatística com nível de 5% de significância.

As madeiras utilizadas nos tratamentos T1 (itaúba) e T2 (cupiúba) são consideradas pesadas e dos tratamentos T3 (cedrinho) e T4 (cambará) são moderadamente pesadas, segundo a classificação do INDEA (2011) apresentados por Moraes (2018). Esses resultados indicam que o processamento de madeira classificada como pesada produziu serragem com maior porcentagem de partículas de maior granulometria, pois quanto maior as partículas, mais espaço vazio entre elas e conseqüentemente menor a densidade a granel (Dg). Tais resultados são confirmados ao observar a Figura 2, onde os tratamentos T1 e T2 apresentam aproximadamente 80% e 70% das partículas da serragem, respectivamente, são maiores que 40 mesh (425 µm).

Os valores médios da densidade aparente (Da) dos corpos de prova compactados para cada tratamento apresentaram diferenças estatísticas significativas, exceto entre os tratamentos T1 e T5. O tratamento T5 apresentou maior Da, porém os valores para todos os tratamentos foram inferiores a 1000 kg.m⁻³. Na literatura a Da para briquetes apresentam valores entre 500 e 1200 kg.m⁻³ (Protásio et al., 2011; Paula et al., 2011; Quirino et al., 2012; Dias et al., 2012; Souza e Vale, 2016). Já a Da para pellets, Dias et al. (2012) menciona que os valores variam entre 500 e 750 kg.m⁻³. Para

combustíveis sólidos, deseja-se maior densidade aparente, pois apresenta relação diretamente proporcional a densidade energética (Souza e Vale, 2016). Analisando-se os resultados dos tratamentos T1 a T4, observa-se que a Dg e Da são inversamente proporcionais, assim como a Dg e RC. Isso demonstra que quanto menor a densidade a granel da serragem, maior a compactação e conseqüentemente maior a massa do corpo de prova, logo pode se afirmar que nos corpos de prova mais compactados tem-se maior porcentagem de partículas finas. Souza e Vale (2016) e Kaliyan e Morey (2009), observaram a partir da fabricação de briquetes que quanto menor o tamanho da partícula melhor a compactação destes. Isso pode ser explicado, pois partículas menores favorecem melhores interações devido a sua área de superfície (Kaliyan e Morey, 2009). Na Figura 3 apresentam-se os valores médios, desvio padrão e a comparação das médias para a expansão volumétrica dos corpos de prova após 24, 48 e 72 horas de acondicionamento.

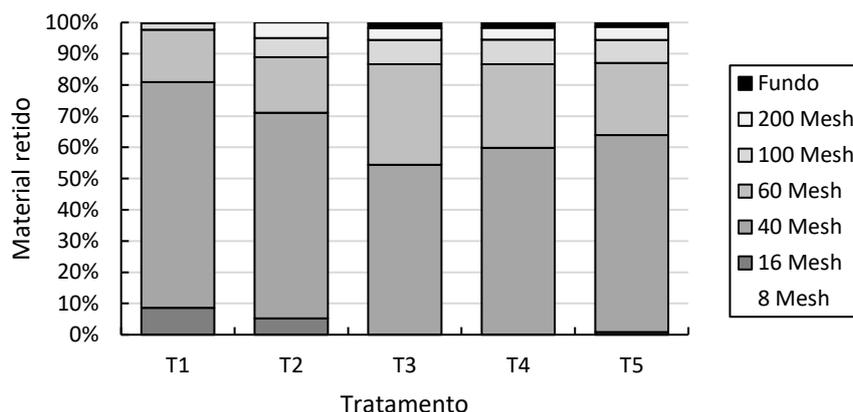


Figura 2. Granulometria da serragem.

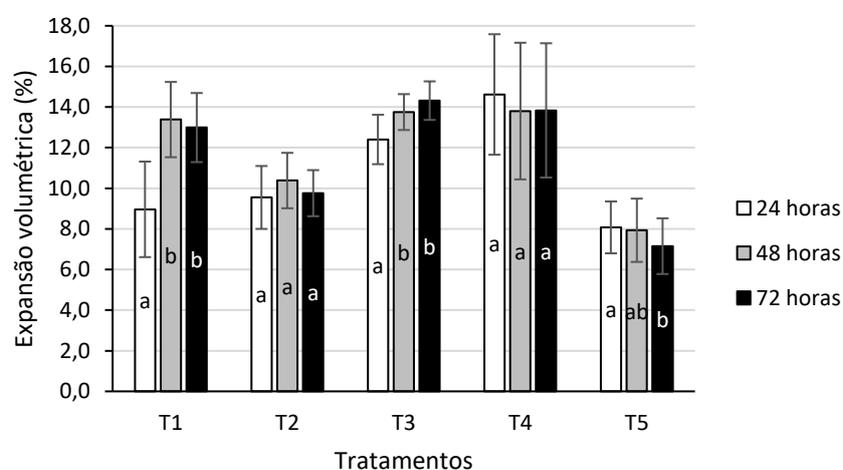


Figura 3. Expansão volumétrica dos corpos de prova após acondicionamento. Em que: letras diferentes entre colunas no mesmo tratamento representam diferença estatística com nível de 5% de significância.

Os tratamentos T1 e T3 apresentaram estabilização do volume após 48 horas de acondicionamento, sendo comprovado pelo teste de média que demonstra que os valores médios apresentaram diferença estatisticamente significativa entre 24 e 48 horas. Já os tratamentos T2 e T4, a estabilização do volume foi após 24 horas, pois os valores médios entre nos diferentes tempos não apresentaram diferença significativa. No tratamento T5 observa-se que os valores médios de expansão volumétrica para 24 e 72 horas apresentaram diferença significativa, ou seja, a estabilização ocorreu somente após 72 horas.

As espécies com massa específica moderadamente pesada (T3 e T4) foram os corpos de prova onde ocorreram expansão volumétrica levemente superior a espécies com massa específica considera pesada (T1 e T2). No tratamento T5, onde foram misturadas proporções iguais de serragem para cada espécie, a expansão volumétrica apresentou melhores resultados, demonstrando que esse tratamento é mais estável em relação aos

demais. É importante ressaltar que a expansão volumétrica após a compactação, pode influenciar negativamente na densidade aparente e resistência mecânica do produto compactado (Chrisostomo, 2015).

Propriedades mecânicas

Na Tabela 4 são apresentados os resultados para resistência à tração por compressão diametral (RTCD), dureza Rockwell e friabilidade para os tratamentos.

As médias dos resultados da RTCD e a dureza Rockwell apresentam pontos em comum: ambas propriedades apresentaram médias com diferenças estatísticas entre os tratamentos, exceto entre os tratamentos T3 e T4, e nas duas propriedades o valor máximo ocorreu no tratamento T2. Chrisotomo (2015) obteve resultados de resistência à tração por compressão entre 1,014 e 0,142 MPa em corpos de prova de serragem compactada de eucalipto com 10% de teor de umidade.

Tabela 4. Valores das propriedades mecânicas.

Tratamento	RTCD (Mpa)	dureza Rockwell (hrl)	Friabilidade (%)
T1	0,201 a (0,005)	44,47 a (2,66)	6,13
T2	0,501 d (0,035)	81,52 d (2,32)	5,31
T3	0,365 c (0,017)	68,40 c (2,73)	6,99
T4	0,389 c (0,022)	72,14 c (1,14)	6,59
T5	0,298 b (0,008)	61,30 b (4,72)	8,59

Letras diferentes entre linhas na mesma coluna representam diferença estatística com nível de 5% de significância.

O autor afirma que a diferença entre os resultados se deve ao ambiente que os corpos de prova foram acondicionados antes do teste de resistência, pois o maior valor (1,014 MPa) ocorreu após a compactação e o menor valor (0,142 MPa) ocorreu após 72 horas de acondicionamento em ambiente com 20 °C de temperatura e 90% de umidade relativa.

O teste de tamboramento permitiu avaliar a friabilidade dos corpos de prova e determinar a taxa de perda de massa. Pereira (2009) sugere uma classificação de friabilidade de acordo com a taxa de perda conforme Tabela 5.

Conforme a classificação realizada por Pereira (2009), todos os tratamentos (Tabela 4) foram classificados como muito pouco friável, ou seja, apresenta maior resistência ao tamboramento. Esses resultados favorecem o manuseio e o transporte do material. No entanto, esses resultados devem ser interpretados com cuidado, pois podem ser influenciadas pelo tamanho e forma dos corpos de prova e propriedades dos materiais utilizados (RAMOS, 2010).

Tabela 5. Classificação da friabilidade.

Classificação	Taxa de perda (%)
Muito friável	≥ 30
Bastante friável	25 – 29
Médio friável	15 – 24
Pouco friável	10 – 15
Muito pouco friável	< 10

Fonte: Pereira, 2009.

Propriedades químicas e energéticas

Na Tabela 6 apresentam-se os valores de propriedades químicas obtidas a partir da análise da serragem para cada tratamento. Os valores das propriedades energéticas foram estimados por meio das Equações 9, 10, 11 e 12.

De acordo com levantamento bibliográfico realizados por Quirino et. al. (2005), o poder calorífico superior (PCS) para as espécies Itaúba (*Mezilaurus itauba*) foi de 5.263 Kcal.kg⁻¹, Peroba (*Goupia glabra*) foi de 4.654 Kcal.kg⁻¹, Cedrinho (*Erisma uncinatum*) foi de 4.523 Kcal.kg⁻¹ e o Cambara (*Qualea* sp) foi de 4.639 Kcal.kg⁻¹. Comparando os resultados do presente estudo e da bibliografia citada, os resultados são próximos, exceto para a madeira de Itaúba.

A média da DE entre os tratamentos foi de 3,90 Gcal.m⁻³, variando de 3,74 Gcal.m⁻³ para o T4 no seu limite inferior a 4,15 Gcal.m⁻³ para o T1 no seu limite superior. Garcia (2010) observou a partir da caracterização de pellets produzidos e comercializados no Brasil, DE média de 2,7 Gcal.m⁻³. Spanhol et al. (2015) obtiveram valores médios de 3,10 Gcal.m⁻³ para DE de pellets produzidos no estado de SC. Souza e Vale (2016) observaram a DE para briquetes produzidos a partir de biomassa de Pinus, Tauari e Cumuru valores máximos de 4,44 Gcal.m⁻³, 4,51 Gcal.m⁻³ e 4,67 Gcal.m⁻³, respectivamente. Em todos os tratamentos, os valores de DE foram superiores aos valores para pellets produzidos em escala industrial e quando comparados aos valores de DE dos briquetes, os valores do presente estudo foram inferiores.

Tabela 6. Valores das propriedades químicas e energéticas.

	Propriedades	Tratamentos				
		T1	T2	T3	T4	T5
Químicas	Lignina (%)	32,65	31,05	31,25	30,07	31,10
	Extrativos (%)	11,25	13,54	5,23	3,31	6,49
	Cinzas (%)	0,94	0,37	1,03	1,70	1,15
Energéticas	PCS (Kcal.kg ⁻¹)	4745,73	4772,88	4510,03	4432,09	4546,61
	PCI (Kcal.kg ⁻¹)	4421,73	4448,88	4186,03	4108,09	4222,61
	PCU (Kcal.kg ⁻¹)	3992,88	4007,52	3755,47	3700,91	3801,51
	DE (Gcal.m ⁻³)	4,15	4,09	3,76	3,74	3,76

Ressalta-se que normalmente nos processos de produção de pellets e briquetes de madeira é

utilizado aquecimento e no presente estudo a compactação da serragem foi realizada em

temperatura ambiente (25 °C). Souza e Vale (2016) concluíram que a temperatura no processo de compactação melhora a qualidade dos briquetes, elevando a Da e DE. Os mesmos autores citam que a DE está relacionada a Da de modo diretamente proporcional. No presente trabalho, a DE foi obtida por meio da multiplicação do PCU e a Da, sendo a mesma metodologia sugerida por Souza e Vale

(2016), pois se aproxima de uma aplicação prática e de não superestimar o valor desta propriedade.

Correlação de Pearson entre as propriedades

Na Tabela 7 apresentam-se os coeficientes de correlação de Pearson a nível de confiança de 95%.

Tabela 7. Coeficientes de correlação de Pearson.

	Da	Dg	Friabilidade	PCS	Rockwell	RTCD	TU _f
Da	-	-0,44	0,16	0,61	-0,48	-0,42	-0,62
Dg	-0,44	-	0,69	-0,95	0,30	0,13	0,36
Friabilidade	0,16	0,69	-	-0,59	-0,27	-0,41	0,22
PCS	0,61	-0,95**	-0,59	-	-0,17	-0,01	-0,36
Rockwell	-0,48	0,30	-0,27	-0,17	-	0,98**	0,47
RTCD	-0,42	0,13	-0,41	-0,01	0,98	-	0,41
TU _f	-0,62	0,36	0,22	-0,36	0,47	0,41	-

** correlações estatisticamente significativas a nível de confiança de 95%.

As correlações estatisticamente significativas a nível de confiança de 95% foram entre Dg e PCS e entre RTCD e RDR, com coeficientes de correlação de -0,95 e 0,98, respectivamente.

A correlação entre Dg e PCS foi significativamente negativa. Como foi apresentado na Tabela 3, as espécies de maiores massas específica (T1 e T2) originaram serragem com menor densidade a granel e como a relação entre a massa específica e o PCS é diretamente proporcional, a densidade a granel pode ser parâmetro para inferir o PCS na ausência de valores de massa específica da madeira.

Outra correlação estatisticamente significativa foi entre dois testes de propriedades mecânicas, a RTCD e dureza Rockwell. O teste de dureza Rockwell mostrou-se um bom estimador para o RTCD. A resistência a dureza de um material pode ser relacionada ao módulo de elasticidade, resistência à ruptura, início da deformação plástica ou escoamento plástico (Stachurski, 2006). Dentre os testes de dureza, a Rockwell apresenta vantagens em relação aos demais, como: rápida leitura do resultado; o tamanho da impressão evita fraturas nas amostras; não exige leitura do tamanho da impressão, proporcionando maior exatidão e isenção de erros. Porém, esse teste é pouco utilizado para caracterizar a madeira (Stangerlin, 2012).

Conclusões

A partir das propriedades tecnológicas da serragem compactada, pode-se concluir:

- o tratamento T5 apresentou maior densidade aparente e menor expansão volumétrica, parâmetros esses que indicam que a mistura de

serragem foi benéfica para a qualidade do produto final;

- o tratamento T2 apresentou melhores resultados para as propriedades mecânicas, indicando que o uso da serragem de uma espécie produziu o produto compactado com maior resistência mecânica;

- o poder calorífico superior, inferior e útil foi maior para o T2, porém a DE foi superior no T1 devido a diferença da Da entre os tratamentos. Contudo, os valores de DE, a qual avalia o desempenho energético como combustível, mostrou-se satisfatória em todos os tratamentos quando comparada aos valores de literatura;

- o tratamento T5 apresentou qualidade final satisfatória, sendo viável a utilização da mistura das serragens para produção de combustível sólido compactado.

Referências bibliográficas

Abramowski, J.; Posorski, R. (2000) Wind energy in developing countries. *DEWI Magazine*, n.16, p.46-53

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 1399: Papel, cartão, pastas celulósicas e madeira - Determinação do resíduo (cinza) após a incineração a 525 °C. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 14853: Madeira - Determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 6922: Carvão vegetal - Ensaio físicos determinação da massa específica (densidade à granel). Rio de Janeiro: ABNT, 1981. 2p.

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 7222: Argamassa e concreto: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: 1994.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 7989: Pastas celulósicas e madeira - Determinação de lignina insolúvel em ácido. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 8740: Carvão vegetal - Determinação do índice de quebra e abrasão - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1985. 4p.
- Bonissoni, R (2017) *Resíduos madeireiros em serrarias de dois municípios do médio norte de Mato Grosso*. 41f. Monografia, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Mato Grosso. 41p.
- Brasil. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Balanço Energético Nacional 2015: Ano Base 2014 – Relatório Síntese. Rio de Janeiro: EPE, 2015.
- Christostomo W (2015) *Mecanismo de ligação da serragem de madeira densificado com diferentes teores de umidade em diferentes temperaturas*. 2015. p.118. Tese, Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 118p.
- Dias, J. M. C. S; et al. (2012) *Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais (1º ed)*. Brasília: Embrapa Agroenergia. 130p.
- Garcia DP (2010) *Caracterização química, física e térmica de pellets de madeira produzidos no Brasil*. Dissertação, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista. 103p.
- Gonçalves JE (2010) *Avaliação energética e ambiental de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de Eucalyptus grandis*. 2010. 104p. Tese, Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”, Universidade de São Paulo. 104p.
- Kaliyan N, Morey RV (2009) Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and bioenergy*, v.33, n.3, p.337-359. doi: 10.1016/j.biombioe.2008.08.005
- Martins, F. R.; Guarnieri, R. A.; Pereira, E. B. (2008) O aproveitamento da energia eólica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v.30, n.1, p.1304.1-1304.13. doi: 10.1590/S1806-11172008000100005.
- Moraes LAZ (2018) *Madeiras do Estado de Mato Grosso: Identificação, comercialização e utilização*. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais, Universidade Federal de Mato Grosso.135p.
- Nascimento, T. C., Mendonça, A. T. B. B., Cunha, S. K. (2012) Inovação e sustentabilidade na produção de energia: o caso do sistema setorial de energia eólica no Brasil. *Cad. EBAPE.BR*, v.10, n.3, p.630-651. doi: 10.1590/S1679-39512012000300010
- Paula L E R *et al.* (2011) Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v.31, p.103-112. doi: 10.4336/2011.pbf.31.66.103
- Pereira FA (2009) *Efeito da granulometria e de aglutinantes nas propriedades de briquetes de finos de carvão vegetal*. Dissertação, Universidade Federal de Viçosa. 50p.
- Preilipper UEM *et al.* (2016) Aproveitamento do resíduo madeireiro na produção de energia termoelétrica no município de Marcelândia-MT. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, Paraná, v.36, p.411-428. doi: 10.5380/dma.v36i0.39802.
- Preto EV, Mortoza GL (2010) *Geração de energia elétrica utilizando biomassa*. Monografia, Universidade de Brasília. 82p.
- Protásio TP *et al.* (2011) Compactação de biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 31, n. 68, p. 273-283. doi: 10.4336/2011.pbf.31.68.273
- Quirino WF *et al.* (2005) Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. *Revista Madeira*, n.89, p.100-106.
- Quirino WF *et al.* (2012) Densitometria de raios x na análise da qualidade de briquetes de resíduos de madeira. *Scientia Forestalis*, v.40, n.96, p.525-536.
- Shaw M (2008) *Feedstock and process variables influencing*. Thesy, University of Saskatchewan Saskatoon. 159p.
- Souza F., Vale AT (2016) Densidade energética de briquetes de biomassa lignocelulósica e sua relação com os parâmetros de briquetagem. *Pesq. Flor. Bras.*,v.36, n.88, p.405-413. doi: 10.4336/2016.pbf.36.88.879
- Spanhol A *et al.* (2015) Qualidade dos pellets de biomassa florestal produzidos em Santa Catarina para a geração de energia. *Floresta*,v.45, n.4, p.833 – 844. doi: 10.5380/uf.v45i4.37950

Stachurski ZH (2006) Testing materials hardness science, technology and application. *Materials Forum*, v.30, p.118-125.

Stangerlin DM (2012) *Monitoramento de propriedades de madeiras da Amazônia submetidas ao ataque de fungos apodrecedores*. Tese, Universidade de Brasília. 259p.

Teixeira, T. V. R. (2009) *Uso da madeira e derivados para energia no Estado do Paraná*, Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) UFPR, 50p.

Telmo C, Louzada J (2011) The explained variation by lignin and extractive contents on higher heating value of wood. *Biomass and bioenergy*, n.35, p.1663-1667 doi:10.1016/j.biombioe.2010.12.038