

Artigo

Caracterização Físico-Química da Biomassa de *Leucaena leucocephala* para Produção de Combustível Sólido

Hansted, A. L. S.;* Nakashima, G. T.; Martins, M. P.; Yamaji, F. M.

Rev. Virtual Quim., 2016, XX (XX), no prelo. Data de publicação na Web: 9 de julho de 2016

<http://rvq.sbq.org.br>**Physico-Chemical Characterization of *Leucaena leucocephala* Biomass for Solid-Fuel Production**

Abstract: The use of biomass as raw material in renewable energy production has been studied as alternative source to fossil fuels. The aim of the current study is to physicochemically feature the biomass of *Leucaena leucocephala* (leucaena) tree species in order to produce briquettes. Leucaena wood treated with three moisture levels - T1 (10%), T2 (12%) and T3 (15%) – was used to produce briquettes. The study was divided in the following stages: analyzing the grinding material and the lignin and cellulose particle size distribution, chemical analysis, calorific value determination, briquetting and mechanical testing. The results were statistically analyzed through ANOVA and Tukey tests. The species showed satisfactory performance in the following assessed aspects: lignin content (22.61%), ash content (2.15%), and calorific value (4442.29 kcal.kg⁻¹). As for the influence of the moisture content, the best results were found in treatment T2 (12%), wherein the mean maximum force was 51.22 kgf, the maximum strain was 0.41 MPa, and friability was 4.07%. It was shown that the moisture content changes briquettes' stability and strength. The species showed satisfactory features regarding the purpose suggested for all treatments, as well as potential to be used in bioenergy production.

Keywords: Briquette; moisture; mechanical strength; bioenergy.

Resumo

A biomassa, material utilizado como matéria-prima para energia renovável, é estudada como fonte alternativa ao uso de combustíveis fósseis. Este trabalho teve como objetivo a caracterização físico-química da biomassa da espécie arbórea *Leucaena leucocephala* (leucena) a fim de produzir briquetes. Para a produção dos briquetes foi utilizada a madeira de leucena tratada com três teores de umidade: T1 (10%), T2 (12%) e T3 (15%). As etapas do trabalho consistiram na moagem do material e distribuição granulométrica, análise do teor de lignina e celulose, análise química imediata, determinação do poder calorífico, briquetagem e ensaio mecânico. Os resultados foram analisados estatisticamente com a análise de variância e teste de Tukey. A espécie apresentou um desempenho satisfatório nos aspectos avaliados: teor de lignina (22,61%), teor de cinzas (2,15%), poder calorífico (4442,29 kcal.kg⁻¹). Quanto à influência do teor de umidade, os melhores resultados foram respectivos ao tratamento T2 (12%), com força máxima média de 51,22 kgf, tensão máxima de 0,41 MPa e friabilidade de 4,07%. Comprovou-se que o teor de umidade altera a estabilidade e a resistência mecânica dos briquetes. A espécie apresentou características satisfatórias para a finalidade proposta em todos os tratamentos, evidenciando seu potencial para a utilização em bioenergia.

Palavras-chave: Briquete; teor de umidade; resistência mecânica; bioenergia.

* Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Ciências Ambientais, Rodovia João Leme dos Santos, Km 110 - SP-264, Bairro do Itinga, Sorocaba-SP, Brasil.

✉ ana_hansted@hotmail.com

DOI:

Caracterização Físico-Química da Biomassa de *Leucaena leucocephala* para Produção de Combustível Sólido

Ana Larissa S. Hansted,* Gabriela T. Nakashima, Mariana P. Martins,
Fábio M. Yamaji

Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Ciências Ambientais, Rodovia João Leme dos Santos, Km 110 - SP-264, Bairro do Itinga, Sorocaba-SP, Brasil.

* ana_hansted@hotmail.com

Recebido em 17 de dezembro de 2015. Aceito para publicação em 9 de julho de 2016

1. Introdução
2. Materiais e Métodos
 - 2.1. Materiais
 - 2.2. Moagem e distribuição granulométrica
 - 2.3. Análise dos componentes lignina e celulose
 - 2.4. Análise química imediata
 - 2.5. Determinação do poder calorífico superior
 - 2.6. Descrição dos tratamentos
 - 2.7. Produção de briquetes
 - 2.8. Ensaio mecânico
 - 2.9. Análise estatística
3. Resultados e Discussão
4. Conclusão

1. Introdução

A energia originada de biomassa conta com grande variedade de matéria-prima. Obtém-se a biomassa a partir de plantios com finalidade energética, resíduos de colheita, ou resíduos orgânicos.¹ Essa disponibilidade de recursos resulta em maior segurança e previsibilidade de mercado. A produção da biomassa pode ser controlada, e o aumento em sua produtividade possibilita a redução nos custos de transporte e da

energia gerada.²⁻³ Neste contexto, a biomassa passa a ser valorizada como fonte alternativa ao uso de combustíveis fósseis.

Para a produção de combustível sólido, a biomassa pode ser proveniente de resíduos sólidos urbanos, florestais ou agrícolas a fim de gerar calor, vapor e eletricidade.⁴ As indústrias, principalmente do setor alimentício e do setor madeireiro, utilizam as caldeiras de biomassa. A indústria cerâmica também utiliza a biomassa como combustível para os fornos. As vantagens da disponibilidade de recursos, menor custo e a

não emissão de dióxido de enxofre durante sua combustão são fatores atrativos quando em comparação aos combustíveis fósseis.⁵⁻⁶

A biomassa de origem florestal para a geração de energia pode aumentar a produtividade industrial de um país. O mercado é determinado pela presença da matéria-prima na proximidade em que deve ser utilizada, fator de vantagem para o Brasil, que conta com aproximadamente 7 milhões de hectares de florestas plantadas.⁷⁻⁸ A geração de resíduos destes plantios, originados na colheita ou em indústrias de processamento da madeira, supera os 40 milhões de toneladas/ano.⁷

Além dos plantios comerciais, no Brasil

existem espécies com potencial energético pouco explorado. Como é o caso da *Leucaena leucocephala* (leucena), espécie introduzida em regiões com deficiências de nutrientes, com a finalidade de ciclagem ou fixação do nitrogênio no solo.⁹ Nativa da América Central, caracteriza-se por seu rápido crescimento e fácil adaptação, sendo até mesmo classificada como espécie invasora.¹⁰⁻¹² Assim, a utilização da sua biomassa para geração de energia pode ser uma alternativa econômica e ambientalmente viável.

Uma maneira de se aproveitar a biomassa de forma eficiente é através da formação de briquetes, Figura 1.



Figura 1. Biomassa compactada formando o combustível sólido: briquete

Briquetes são combustíveis sólidos obtidos por meio da compactação da biomassa, ou seja, a aplicação de pressão sobre as partículas. Apresentam diversas vantagens, como o aumento da densidade da biomassa, aumento da capacidade energética relativa e melhoria no manuseio da biomassa, em função do formato regular e compactado.¹³⁻¹⁵

Existem alguns parâmetros já estabelecidos para que se potencialize a qualidade do briquete, como o teor de umidade, composição e granulometria. O teor de umidade é apontado como um dos fatores de maior influência, pois tem impacto significativo e direto na geração de calor.^{7,16}

O objetivo deste trabalho foi caracterizar a biomassa da espécie *Leucaena*

leucocephala (leucena) para uso como combustível sólido, avaliar a influência de diferentes ajustes no teor de umidade da biomassa (10, 12 e 15%) para a produção de briquetes e verificar a qualidade/resistência do combustível sólido produzido.

2. Materiais e Métodos

2.1. Material

O material utilizado foi a madeira de leucena, coletado na cidade de Sorocaba, cujo bioma que prevalece é Mata Atlântica.¹⁷ A coleta foi feita em campo em janeiro de 2014. Para os ensaios, utilizou-se a biomassa

originada do fuste da árvore, ou seja, madeira com casca sem raiz ou copa.

2.2. Moagem e distribuição granulométrica

Todo o material coletado foi picado em um moinho de facas tipo willey, Marca MARCONI, modelo MA 340. Em seguida, a análise granulométrica foi realizada em um separador de partículas Marconi modelo MA 750, com batidas intermitentes. O tempo de agitação foi 3 minutos utilizando as peneiras de 10, 20, 40, 60, 100 mesh, e fundo, conforme norma NBR NM 248/2003.¹⁸ Foi feita a pesagem dos materiais retidos em cada peneira para a análise granulométrica.

2.3. Análise dos componentes lignina e celulose

O teor de lignina foi calculado conforme TAPPI T 222 om-02.¹⁹ Foi coletado 1 g da biomassa, livre de extrativos, e submetido à hidrólise com 15 mL de solução de H₂SO₄ 72%. No momento da adição do ácido, a temperatura foi mantida a 0 °C. Nas 2 horas seguintes o sistema foi mantido entre 20 e 22 °C. A solução foi transferida para um balão de fundo redondo com aproximadamente 300 mL de água destilada. A solução foi diluída a 3%, e permaneceu em refluxo por 4 horas. Após esse procedimento, a solução foi filtrada em um funil de Büchner. A lignina retida no funil foi seca em estufa a 100 °C durante 4 horas e, em seguida, foi feita a pesagem do material.

Para o teor de holocelulose foram utilizados 3 g da amostra seca e sem extrativos, e 120 mL de água destilada, em um erlenmeyer de 500 mL. O erlenmeyer

com o material foi colocado em banho-maria, a uma temperatura constante de 70 °C. Foram acrescentados à solução, 2,5 g de NaClO₂ e 1 mL de ácido acético glacial a cada hora, por 2 horas. O sistema foi mantido tampado com bécher de 80 mL e em agitação. O aquecimento foi mantido por 3 horas. O conteúdo foi então transferido para um funil Büchner. O material foi lavado com 20 mL de acetona e, posteriormente, com água destilada. O procedimento foi executado na capela de exaustão. Após esse procedimento, o material foi seco em estufa à 100 °C e depois pesado.

O teor de α-celulose foi calculado utilizando a norma TAPPI 203 cm-99.²⁰ Foi coletado 1 g de holocelulose da biomassa, e adicionado 15 mL de solução de NaOH diluída à 17,5% m/v. Após 2 minutos em descanso, o material foi macerado por 8 minutos com o auxílio de um pistilo. Foi adicionado 40 mL de água destilada ao almofariz e o material foi transferido para o funil de Büchner. O material retido no papel de filtro foi pesado após a secagem em estufa à 100 °C.

O teor de hemicelulose foi calculado a partir da diferença entre os teores de α-celulose e holocelulose obtidos.

2.4. Análise química imediata

Na análise química imediata, foi determinado o teor de cinzas, conforme a norma ASTM D1102-84.²¹ Foi pesado 1 g do material seco em estufa a 100 °C, e inserido no cadinho previamente calcinado. O cadinho e o material foram inseridos na mufla a 600 °C por 6 horas. Após a queima, o material (cinzas) foi pesado. O procedimento foi realizado em triplicata. O teor de cinzas foi calculado pela Equação (1).

$$TC = \frac{mf}{mi} * 100 \quad (1)$$

Sendo: TC = teor de cinzas (%); mi = massa inicial (g); e mf = massa final (g).

O teor de voláteis foi calculado conforme a norma ABNT NBR 8112/86.²² Foi pesado 1 g do material seco em estufa a 100 °C, e inserido no cadinho previamente calcinado.

$$TV = \left(\frac{mi - mf}{mi} \right) * 100 \quad (2)$$

Sendo: TV = teor voláteis (%); mi = massa inicial (g); e mf = massa final (g).

O cadinho tampado, com o material, foi inserido na mufla a 900 °C por 7 minutos. O material restante no cadinho foi pesado. O procedimento foi realizado em triplicata. O teor de voláteis foi dado pela Equação (2):

O teor de carbono fixo foi calculado segundo a Equação (3):

$$TCF = 100 - (TC + TV) \quad (3)$$

Sendo: TCF = teor de carbono fixo (%); TC = teor de cinzas (%); e TV = teor de voláteis (%).

2.5. Determinação do poder calorífico superior

O poder calorífico superior (PCS) foi obtido com a bomba calorimétrica IKA C200, com base nos padrões da norma ASTM D5865-98.²³ Foi utilizado o método isoperibólico. Para a análise, o material foi seco em estufa à 100 °C até atingir peso constante.

2.6. Descrição dos tratamentos

O material foi submetido a três tratamentos, com diferentes teores de umidade, resultando em T1 (10% de umidade), T2 (12% de umidade) e T3 (15% de umidade). Os ajustes foram feitos com o auxílio de um borrifador e balança determinadora de umidade marca Marte modelo ID200.

2.7. Produção de briquetes

A formação dos briquetes foi realizada com o auxílio de uma prensa hidráulica Marcon com capacidade de 15 toneladas e moldes cilíndricos de 3,5 cm de diâmetro e 16 cm de altura, sendo aplicada a pressão de 1247,25 kgf.cm⁻² durante 30 segundos. Para a formação de cada briquete, foram utilizados 20 g da biomassa. Foram confeccionados 15 briquetes para cada tratamento descrito no item 2.6, totalizando 45.

Após a briquetagem, foram medidas as alturas e diâmetros de cada briquete com um paquímetro digital com precisão de 0,01 mm. As medidas foram realizadas em intervalos determinados de 1, 2, 4, 6, 12, 24, 48 h após a prensagem, e no momento do ensaio mecânico (após 168 h) para verificar a variação dimensional de cada briquete.

2.8. Ensaio mecânico

O ensaio mecânico foi realizado em duas etapas. O primeiro ensaio foi o de tração por compressão diametral realizado na máquina universal de ensaios EMIC DL30000 com capacidade máxima de 300 kN. Foi utilizada a célula de carga de 5000 N a uma velocidade de 3 mm.min⁻¹. Foram utilizados 10 briquetes

de cada tratamento para este ensaio.

O segundo ensaio mecânico foi o de friabilidade. Foram utilizados 5 corpos de prova de cada tratamento, e foi calculado o índice de friabilidade pela resistência ao tamboramento. O ensaio foi realizado com o auxílio de um friabilômetro com 30 rotações

por minuto (rpm) durante 10 minutos. O material foi inserido dentro do equipamento, e o cálculo de perda foi feito a partir da diferença da massa inicial, com a massa retida na peneira de 5 mesh.

O índice de friabilidade foi calculado segundo a Equação (4):

$$IF = 100 - \left(\frac{mf}{mi} * 100\right) \quad (4)$$

Sendo: IF = índice de friabilidade (%); mi = massa inicial (g); e mf = massa final (g).

2.9. Análise estatística

A análise estatística foi feita com o auxílio do software R versão 2.11.1. Os resultados foram submetidos à análise de variância a fim de comparar os tratamentos. As médias foram então comparadas duas a duas por meio do teste Tukey.

3. Resultados e Discussão

O tamanho da partícula que se usa para produção de combustíveis sólidos pode influenciar diretamente na resistência mecânica do briquete produzido. Desta maneira, torna-se essencial a classificação granulométrica da biomassa utilizada.²⁴ O tamanho reduzido das partículas aumenta a superfície de contato entre as mesmas, proporcionando uma maior aglomeração nos briquetes, e isso resulta em maior estabilidade dimensional e resistência mecânica.²⁵ Foi possível verificar na caracterização granulométrica do material (Figura 2) que 94% da biomassa analisada possui granulometria entre 20 e 100 mesh. As análises e produção de briquetes foram realizadas com todos os extratos granulométricos.

Os teores de lignina, α celulose, hemiceluloses e holocelulose estão apresentados na Tabela 1.

Para o uso em energia, é essencial o conhecimento da composição da biomassa utilizada. Os componentes podem influenciar diretamente, causando variações significativas no poder calorífico do material. Há uma conhecida relação direta entre o teor de lignina e o potencial energético,²⁶ que pode ser explicada pela sua composição de carbono hidrogênio e oxigênio, componentes fundamentais para a queima.²⁷

O *Eucalyptus* sp., por exemplo, pode apresentar valores de 21 a 29% de lignina,²⁸ enquanto a leucena, investigada neste trabalho, contém um pouco mais de 22% deste componente. Os valores de referência para espécies folhosas, como a *Leucaena leucocephala*, são aproximadamente 45% para holocelulose, 30% para hemicelulose e 20% para lignina.²⁹ Esses resultados mostram que a leucena, mesmo sendo uma espécie pouco exigente quanto às condições nutricionais, apresenta uma composição próxima de outras folhosas, confirmando o potencial para produção de biomassa.

Os teores de cinzas, voláteis, carbono fixo e o poder calorífico superior foram determinados conforme descrito nos itens 2.4 e 2.5, e os valores encontram-se na Tabela 2.

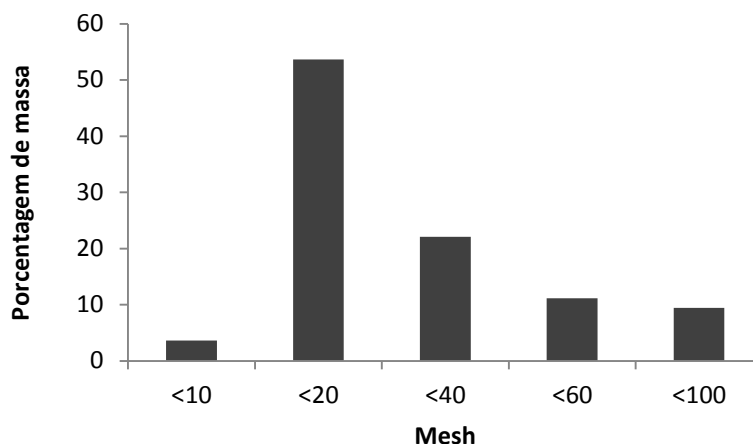


Figura 2. Classificação granulométrica das partículas de leucena, conforme as peneiras de *mesh* especificadas

Tabela 1. Teores encontrados para análise dos componentes indicados para a leucena

Componentes	Lignina	Holocelulose	α Celulose	Hemicelulose
Teores (%)	22,61	58,19	28,27	30,91

Tabela 2. Teores encontrados para análise química imediata da leucena, e poder calorífico superior

Componentes	Cinzas (%)	Voláteis (%)	Carbono fixo (%)	PCS (kcal.kg^{-1})
Teores	2,15	75,33	19,68	4442

O valor do teor de cinzas da espécie encontra-se ligeiramente acima do esperado para espécies com potencial conhecido para utilização na bioenergia. O *Eucalyptus* sp., por exemplo, apresenta valores que variam de 0,38% a 0,93%.³⁰⁻³¹ Vale ressaltar que a determinação teor de cinzas é importante porque o poder calorífico da biomassa comporta-se de maneira inversamente proporcional ao percentual deste resíduo, ou seja, quanto menor o teor de cinzas, maior o poder calorífico. Isso ocorre em função das cinzas serem constituídas por materiais minerais, que não fazem parte do processo de combustão.^{32,33}

O teor de cinzas não altera somente o potencial energético, mas também influencia nos custos do processo. Altos teores de cinzas podem diminuir a vida útil dos

equipamentos, provocando corrosões, o que aumenta a demanda de manutenções.³⁴

Ao contrário do teor de cinzas, existe uma relação direta entre o teor de voláteis e o poder calorífico. Quanto maior o teor de voláteis, maior o potencial para produção de energia, apresentando, inclusive, maior facilidade na ignição.³⁵ O mesmo ocorre com o teor de carbono fixo, cuja faixa ideal é de 15% a 25%, conforme o descrito na literatura para biomassa com finalidade energética.³⁵⁻³⁶ Como mostra a Tabela 2, a leucena apresentou um teor de voláteis e carbono fixo satisfatórios.

Quanto ao poder calorífico superior, espera-se que o material composto pela madeira da leucena apresente valores de 4.200 a 4.600 kcal.kg^{-1} .¹⁰ O valor encontrado neste trabalho está de acordo com o indicado

para esta espécie (Tabela 2). A leucena pode ser comparada às espécies tradicionalmente utilizadas para geração de energia, como as de eucalipto, que apresentam valores médios de $4.600 \text{ kcal.kg}^{-1}$.³⁷

O teor baixo de umidade (ajustes do teor de umidade $\leq 15\%$), associado a um baixo teor de cinzas (2,15%) e elevado poder calorífico ($4.442 \text{ kcal.kg}^{-1}$), tornam os briquetes obtidos de leucena viáveis para uso em bioenergia.

A expansão dos briquetes em função do tempo ocorreu conforme Figura 3. A

expansão pode ser considerada dentro da normalidade quando apresenta valores de até 20%.³⁸ Os tratamentos T1 e T2 apresentaram percentual menor que 15%. O tratamento T3 apresentou expansão de 21%. Essa expansão pode ser considerada como aspecto negativo, pois afeta a resistência mecânica dos briquetes (Figura 4). A 95% de significância, foi realizado o teste Tukey. As médias de expansão dos tratamentos foram avaliadas aos pares, e foi constatado que T1 e T2 não diferiram entre si, mas diferiram significativamente de T3.

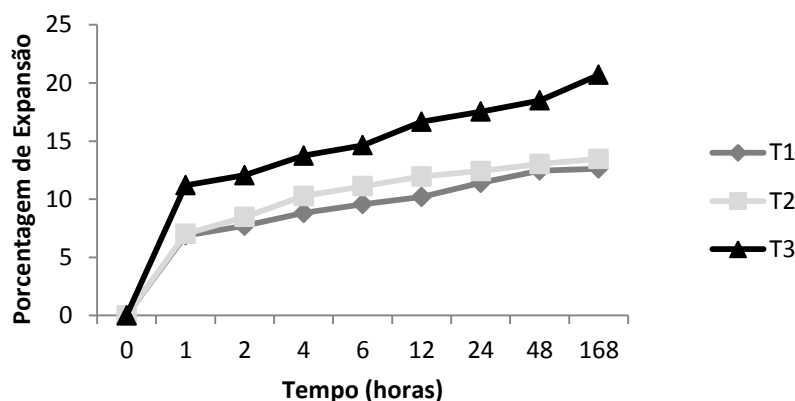


Figura 3. Porcentagem de expansão dos briquetes nas primeiras 48 horas, e no momento do teste mecânico (168 horas após a produção dos briquetes)

O ensaio mecânico de tração por compressão diametral evidenciou o comportamento distinto entre os tratamentos estudados, ou seja, todos os

tratamentos apresentaram diferenças significativas, analisando as médias, aos pares, conforme teste Tukey (Figura 4).

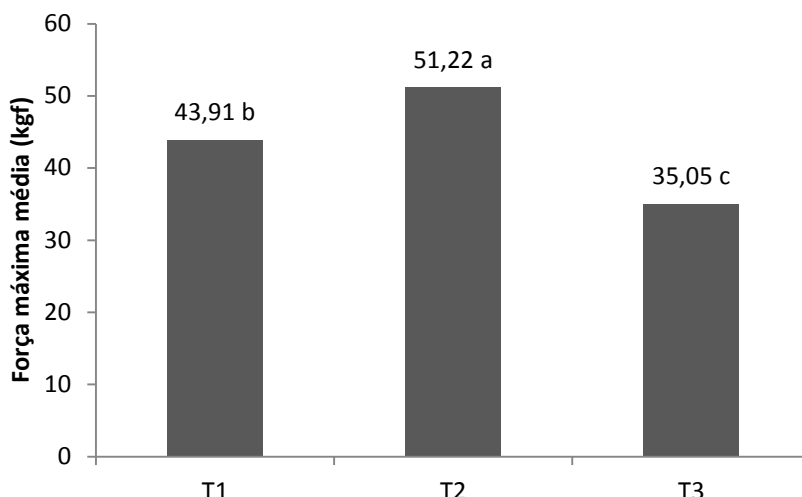


Figura 4. Força máxima média referente ao ensaio mecânico em cada tratamento. Médias seguidas de letras distintas (T1=b, T2= a, T3 = c) se diferem significativamente, ao nível de 5% de erro no teste Tukey

O tratamento T2 foi o que apresentou a maior resistência mecânica, indicando que 12% de umidade foi o melhor ajuste para a formação dos briquetes. Porém, foi constatado por Silva e colaboradores,³⁹ que um briquete com resistência de 35 kgf já pode ser considerado resistente o suficiente para o armazenamento. Desta forma, todos os tratamentos apresentaram desempenho satisfatório.

Quanto à tensão máxima, assim como a força máxima, o tratamento com melhor desempenho foi T2. Os tratamentos apresentaram valores de 0,34 MPa (T1), 0,40 MPa (T2) e 0,23 MPa (T3). Um experimento similar realizado por Gonçalves e colaboradores¹⁶ resultou em valores próximos de 0,54 MPa para o *Eucalyptus grandis*, a 12% de umidade, em tratamentos com diferentes tamanhos de partículas.

Chrisostomo¹³ encontrou valores de 0,45 MPa para *Eucalyptus* sp., a 10% de umidade. A tensão máxima de ruptura é uma das formas de se avaliar a resistência mecânica do briquete, pois indica a força de aderência entre as partículas do material.²⁴ Desta forma, quanto maior for o valor encontrado, mais resistente é o briquete.

O ensaio de friabilidade calcula a resistência do briquete por meio do índice de perda do material no ensaio.⁴⁰ Os briquetes de leucena resultaram em perdas de 6,36% (T1), 4,07% (T2) e 3,28% (T3), Figura 5. Não houve diferença significativa entre as médias. Os valores encontrados são considerados baixos, e de acordo com a classificação técnica,⁴¹ qualquer valor abaixo de 10% de perda, pode ser considerado na menor escala de friabilidade.

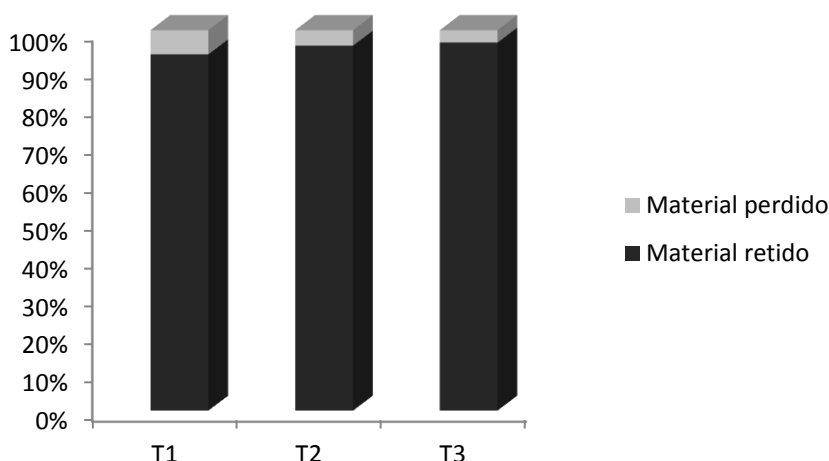


Figura 5. Índice de friabilidade média dos briquetes nos respectivos tratamentos

4. Conclusão

A produção de briquetes a partir da espécie leucena mostrou-se uma alternativa viável para a produção renovável de energia. Os teores de lignina, celulose, voláteis, cinzas e carbono fixo, bem como o poder calorífico superior, estão dentro da faixa esperada em que um combustível sólido pode ser considerado eficiente. O tratamento T2 (teor de umidade de 12%) foi o que apresentou os melhores resultados, porém, os dois outros tratamentos (10% e 15% de umidade) analisados neste trabalho também são passíveis de utilização em bioenergia.

Referências Bibliográficas

- ¹ International Energy Agency. Disponível em: <<http://www.iea.org/topics/renewables/subtopics/bioenergy/>>. Acesso em: 23 abril 2016.
- ² Lucon, O.; Goldemberg, J. Crise financeira, energia e sustentabilidade no Brasil. *Estudos Avançados* **2009**, *23*, 121. [CrossRef]
- ³ Paulo, H.; Azcuea, X.; Barbosa-Póvoa, A. P.; Relvas, S. Supply chain optimization of residual forestry biomass for bioenergy production: The case study of Portugal.

Biomass and Bioenergy **2015**, *83*, 245. [CrossRef]

⁴ Ministério do Meio Ambiente. Disponível em:

<http://www.mma.gov.br/estruturas/sedr_p/roecotur/_publicacao/140_publicacao09062009030954.pdf>. Acesso em: 14 setembro 2014. [Link]

⁵ Goldemberg, J.; Lucon, O. Energia e meio ambiente no Brasil. *Estudos Avançados* **2007**, *21*, 7. [CrossRef]

⁶ Grauer, A.; Kawano, M. Aproveitamento de resíduos para biomassa é rentável. *Revista da Madeira*, **2008**. [Link]

⁷ Simioni, F. J.; Hoeflich, V. A. Cadeia produtiva de energia de biomassa na região do Planalto Sul de Santa Catarina: uma abordagem prospectiva. *Revista Árvore* **2010**, *34*, 1091. [CrossRef]

⁸ ABRAF Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. Anuário Estatístico 2013 ano base 2012. Brasília 2013. 148 p. [Link]

⁹ Lima, J. A.; Evangelista, A. R. Leucena (*Leucaena leucocephala*). Boletim de Extensão. UFLA 2006, *1*, 1. [Link]

¹⁰ Drumond, M. A.; Ribaski, J. – Leucena (*Leucaena leucocephala*): leguminosa de uso múltiplo para o semiárido brasileiro. Disponível em: <<http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handl>

rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis*. *Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental* **2009**, *13*, 657. [[Link](#)]

³⁴ Garcia, R.; Pizarro, C.; Lavín, A. G.; Bueno, J. L. Spanish biofuels heating value estimation. Part II: Proximate analysis data. *Fel*, **2014**, *117*, 1139. [[CrossRef](#)]

³⁵ Vieira, A. C.; Souza, S. N. M.; Bariccatti, R. A.; Siqueira, J. A. C.; Nogueira, C. E. C. Caracterização da casca de arroz para geração de energia. *Varia Scientia Agrárias* **2013**, *3*, 51. [[Link](#)]

³⁶ Tavares, S. R. L.; Santos T. E. Uso de diferentes fontes de biomassa vegetal para produção de biocombustíveis sólidos. *Holos* **2013**, *5*, 19. [[Crossref](#)]

³⁷ Quirino, W. F.; Vale, A. T.; Andrade, A. P. A.; Abreu, V. L. S.; Azevedo, A. C. S. Poder

calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. *Revista da Madeira* **2005**, *89*, 100. [[Link](#)]

³⁸ Buzin, P.J.W.K. Dissertação de Mestrado. Universidade do Rio Grande do Sul, 2009. [[Link](#)]

³⁹ Silva, D. A.; Yamaji, F. M.; Barros, J. L.; Rós, A. L.; Nakashima, G. T. Caracterização de biomassas para a briquetagem. *Floresta* **2015**, *45*, 713. [[CrossRef](#)]

⁴⁰ Benicio, E. L. *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2011. [[Link](#)]

⁴¹ Oliveira, J. B.; Vivacqua Filho, a.; Gomes, P. A. Produção de carvão vegetal: aspectos técnicos. In: Penedo, W. R. Produção e utilização de carvão vegetal. Centro Tecnológico de Minas Gerais, **1982**, *1*, 59. [[Link](#)]