



INFLUÊNCIA DA TORREFAÇÃO NAS PROPRIEDADES DOS BRIQUETES PRODUZIDOS COM MADEIRA DE *Eucalyptus sp.*

Emylle Veloso Santos COSTA¹, Maria Fernanda Vieira ROCHA¹, Angélica de Cássia Oliveira CARNEIRO², Carlos Miguel Simões da SILVA², Bárbara Luísa Corradi PEREIRA³, Matheus Perdigão de Castro Freitas PEREIRA², Déborah Nava SORATTO², Juliana Jerásio BIACHE²

1 – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Brasil

2 – Departamento de Eng. Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil

3 – Departamento de Eng. Florestal, Universidade Federal do Mato Grosso, Mato Grosso, Brasil

Resumo: A torrefação e a briquetagem são dois mecanismos de aproveitamento dos resíduos, melhoram a qualidade da biomassa e facilitam seu uso direto como combustível. O objetivo do trabalho foi avaliar o efeito da temperatura de torrefação nas propriedades físicas, químicas e energéticas dos briquetes de madeira de *Eucalyptus sp.* Após o preparo das amostras e caracterização da biomassa “*in natura*”, produziram-se briquetes com madeira de eucalipto na temperatura de 120°C e pressão de 1500 PSI. Posteriormente, realizou-se a torrefação dos briquetes nas temperaturas de 180, 220 e 260°C por um período de quinze minutos. Os resultados demonstram que, a medida em que aumentou a temperatura de torrefação, houve diminuição no percentual de materiais voláteis e da umidade de equilíbrio higroscópico, enquanto aumentou o teor de carbono fixo, o teor de cinzas e o poder calorífico dos briquetes produzidos com madeira de eucalipto. A briquetagem, aliada à torrefação, permitiu produzir briquetes menos densos, na temperatura de 260°C. Observa-se que o resíduo de madeira de eucalipto pode ser usado na produção de briquetes, sendo um potencial combustível para geração de energia. O processo de torrefação e briquetagem melhora as propriedades da biomassa “*in natura*”. A temperatura de torrefação de 260°C confere melhor qualidade energética aos briquetes, em relação as demais temperaturas.

Palavras-chave: biomassa; resíduo; tratamento térmico; briquetagem; qualidade energética.

Abstract: The torrefaction and briquetting are two waste recovery mechanisms, improve the quality of biomass and facilitate direct use as fuel. The objective was to evaluate the effect of torrefaction temperature in the physical, chemical and energetic properties of *Eucalyptus sp.* wood briquettes. After preparation and characterization of samples of biomass “*in natura*” briquettes were produced with eucalyptus wood, at a temperature of 120 ° C and pressure of 1500 PSI. Subsequently, there was the torrefaction of briquettes at temperatures of 180, 220 and 260 °, for a period of fifteen minutes. The results demonstrate that the extent to which increased the torrefaction temperature, a reduction in the percentage of volatile materials and hygroscopic equilibrium moisture, while increasing the fixed carbon content, ash content and calorific value of the briquettes made from wood *Eucalyptus*. The briquetting combined with torrefaction allowed produced less dense briquettes. It is observed that the *Eucalyptus* wood waste can be used in the production of briquettes, being a potential fuel for power generation. The process of torrefaction and briquetting improve the properties of biomass “*in natura*”. The torrefaction temperature of 260 ° C gives better energy quality to the briquettes, compared with other temperatures.

Keywords: biomass; residue; heat treatment; briquetting; energy quality.



1. INTRODUÇÃO

Cada vez mais, novas pesquisas são realizadas a fim de aperfeiçoar processos que visam a geração e o consumo energético. Um dos motivos seria a maior preocupação em produzir diversas fontes alternativas de energia com o intuito de minimizar as mudanças climáticas causadas pelo aquecimento global e também para diminuir a dependência de apenas uma matriz energética. É importante que a fonte energética seja economicamente viável, ambientalmente renovável e socialmente correta.

O Brasil produz uma enorme variedade de resíduos florestais e agrícolas através das indústrias de cada setor. Resíduo é qualquer material que sobra de um processo de produção, exploração ou transformação e que pode ter um valor econômico agregado, pois possibilita seu reaproveitamento. O resíduo de eucalipto é um exemplo, visto que é um material que ocupa grandes volumes nos pátios, principalmente das serrarias, representando um problema, sendo descartado no ambiente já que não há destinação correta. O descarte pode representar um desperdício de biomassa e esse resíduo é uma ótima opção para otimizar a matriz energética mundial.

Uma das formas de aproveitamento é gerar energia por meio da produção de briquetes. Nesse processo, a biomassa adquire maior densidade energética e agrega-se maior valor econômico. Entretanto, algumas limitações da biomassa podem restringir seu uso direto como combustível, como, por exemplo, baixa densidade, baixo poder calorífico, além da baixa homogeneidade. A briquetagem é uma técnica que permite amenizar esses problemas, uma vez que consiste em compactar determinada massa de partículas, sob determinadas pressões, com ou sem aglutinantes, tendo como produto final o briquete com forma definida, tamanho reduzido e de alta densidade (QUIRINO & BRITO, 1991). A qualidade do briquete produzido poderá ser influenciada tanto pelas propriedades da matéria-prima quanto por fatores que afetam o processo de briquetagem, o que torna essencial a escolha da biomassa.

Outra técnica que pode melhorar as características da biomassa é a torrefação. Esse processo compreende em um tratamento térmico no qual o material é submetido a temperaturas que variam de 200 a 300°C, em ambientes com concentrações mínimas ou até mesmo ausentes de oxigênio. A biomassa torrificada é um material intermediário entre o material “*in natura*” e o carvão vegetal (SANTOS, 2012). O emprego da torrefação origina uma biomassa com melhores características energéticas, como a diminuição da higroscopicidade, maior estabilidade dimensional, maior resistência à degradação e maior poder calorífico (DUTTA e LEON, 2012; LORA et al., 2013). Portanto, aliar a técnica da briquetagem com a torrefação seria ideal para produzir uma biomassa de melhor qualidade, tornando-a mais competitiva perante as outras fontes renováveis e não renováveis.

Diante dessas informações, o objetivo do trabalho foi avaliar o efeito da torrefação nas propriedades dos briquetes de madeira de *Eucalyptus sp.* e comparar com as propriedades da biomassa “*in natura*” não briquetada.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Aquisição e preparo da biomassa

Os cavacos de *Eucalyptus sp.*, com 5,5 anos de idade, são resíduos resultantes do processo industrial da empresa Suzano Energias Renováveis, localizados no Estado do Maranhão.

O trabalho foi realizado na Universidade Federal de Viçosa (UFV), no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), em Viçosa, Minas Gerais.



Os cavacos de eucalipto foram processados em um moinho de martelo com malha de 2 mm. Após essa etapa, classificou-se as partículas de *Eucalyptus sp.* em peneira com malha de 2 mm, recolhendo-se a fração passante a fim de diminuir a presença de finos que poderiam comprometer análises posteriores. Dessa forma, gerou-se as partículas para produção de briquetes.

As partículas ainda passaram por uma adequação da umidade, em estufa com circulação de ar e com temperatura à 100°C, até chegar a uma umidade desejada para formar os briquetes, em torno de 12%.

2.2 Produção dos briquetes

A massa de partículas utilizada para produzir os briquetes foi determinada de acordo com testes preliminares, sendo definida a massa que proporcionasse uma melhor compactação. Para tanto, utilizou-se uma massa de 16g de partículas por briquete.

Os briquetes foram produzidos em briquetadeira de laboratório. Realizou-se a compactação das partículas à temperatura de 120°C, a pressão de 1500 PSI, com tempo de prensagem e de resfriamento de 8 minutos, totalizando 16 minutos para cada briquete. Ressalta-se que a pressão, a temperatura e os tempos de prensagem e resfriamento foram determinados de acordo com testes preliminares, sendo a escolha da temperatura determinada em função da plasticização da lignina, que contribui para a aglomeração das partículas e consequentemente proporciona o aumento da resistência. As condições ideais foram definidas a partir do momento em que se obtiveram briquetes sem rachaduras ou fissuras.

2.3 Torrefação dos briquetes

Antes de iniciar a torrefação propriamente dita, os briquetes foram secos até a umidade de 0%, base seca, em estufa com circulação de ar e temperatura à 100°C.

A torrefação ocorreu em mufla de laboratório. Dentro da mesma, instalou-se um container de aço inox com a finalidade de limitar a entrada de oxigênio, uma vez que a torrefação se baseia no princípio de uma atmosfera desprovida de oxigênio. Dentro desse container, inseriu-se um recipiente de alumínio, onde foram colocados os briquetes para serem torrificados.

As temperaturas (tratamentos) utilizadas para torrificar os briquetes foram de 180, 220 e 260°C. A temperatura era verificada por meio de termopares tipo k, acoplada ao equipamento de aquisição de dados, Datalog, instalado no interior no container de aço inox, a fim de monitorar a temperatura neste local, onde estavam os briquetes. O tempo de torrefação foi de 15 minutos, contados após atingir a temperatura final estabelecida.

A fim de comparar os briquetes torrificados com a testemunha, todas as análises foram feitas nos briquetes que passaram pelos três tratamentos térmicos e para aqueles que não receberam o tratamento.

2.4 Caracterização da biomassa e dos briquetes torrificados

2.4.1 Umidade da biomassa

A umidade, base seca, foi determinada em uma balança determinadora de umidade. O equipamento opera segundo o princípio termogravimétrico para secar as amostras que são colocadas no seu interior. Logo, determina-se a umidade da amostra pela mensuração da sua massa e secagem até massa constante.



A umidade da biomassa *Eucalyptus sp.* foi definida a fim de obter a umidade de trabalho para produção dos briquetes. A umidade determinada foi de 13%. Segundo Quirino (1991), a umidade ideal da matéria-prima deverá estar entre 8 e 15% para obter sucesso na aglomeração das partículas, pois facilita a plastilização da lignina e evita possíveis fraturas nos briquetes produzidos.

2.4.2 Análise química imediata e poder calorífico superior

A determinação dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo seguiu os procedimentos descritos na norma ABNT NBR 8112 (1986).

O Poder Calorífico Superior (PCS) foi determinado seguindo a norma ABNT NBR 8633 (1984), utilizando-se uma bomba calorimétrica adiabática.

2.4.3 Densidade aparente e densidade a granel

Os briquetes foram imersos em mercúrio e o volume deslocado foi obtido pela variação do peso ocasionado pela submersão. A densidade aparente foi determinada dividindo-se o peso do briquete pelo seu volume e depois multiplicado pela densidade do mercúrio, no caso, 13,456 kg/m³.

A densidade a granel foi realizada utilizando uma caixa de madeira com dimensões 1 x 1 x 1 (volume de 1 m³). A relação peso/volume da amostra forneceu a densidade. Empregou-se a metodologia adaptada descrita por DIN EN 15103 (2010).

2.4.4 Umidade de equilíbrio higroscópico

A umidade de equilíbrio higroscópico (UEH) foi determinada após as partículas das biomassas e os briquetes terem sido acondicionados em câmara climática, com temperatura de 23°C e umidade relativa do ar de 65% até atingirem massa constante. A umidade foi calculada de acordo com a norma ABNT NBR 9484 (1986).

2.5 Delineamento experimental

O experimento foi realizado segundo um delineamento inteiramente casualizado com 4 temperaturas de torrefação (Testemunha, 180°C, 220°C e 260°C), com 7 repetições para cada temperatura, totalizando 28 briquetes produzidos e torreficados.

Os dados foram interpretados com o auxílio da análise de variância (ANOVA). Quando observado diferenças significativas entre os tratamentos, as médias foram comparadas pelo teste Tukey, 5% de significância e 95% de probabilidade. As análises foram feitas no *software Statistica 7.0*.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Características da biomassa “in natura” de *Eucalyptus sp.*

Na Tabela 1 estão os valores médios das propriedades da madeira de eucalipto antes do processo de briquetagem e torrefação.



Tabela 1. Valores médios das propriedades químicas, energéticas e físicas da madeira de *Eucalyptus sp*

Propriedade	Madeira <i>Eucalyptus sp.</i>
Materiais voláteis (%)	86,50
Carbono fixo (%)	13,39
Cinzas (%)	0,12
Poder calorífico Superior (kcal kg ⁻¹)	4.659
Densidade a granel (kg.m ⁻³)	233,3
Umidade de equilíbrio higroscópico (%)	10,09

Os materiais voláteis possuem a característica de se volatilizarem rapidamente e com isso contribuem de forma positiva para as propriedades energéticas do material. Nos combustíveis sólidos como a madeira, a quantidade de material volátil varia entre 76 e 86%, sendo responsável pela grande parte do calor gerado na combustão (MORAIS et al., 2004). Segundo Werther et al., (2000) porcentagens acima de 80% facilitam a ignição do material e também sua queima. Paula et al., (2011) estudando a caracterização de resíduos de biomassa vegetal para utilização energética, encontrou valores de materiais voláteis para madeira de eucalipto de 78,89%, valor inferior ao encontrado nesse trabalho.

O carbono fixo é referente à fração do material que se queima em estado sólido, e, quando isso ocorre, a energia é liberada lentamente, sendo uma maior quantidade de carbono fixo desejável para melhorar energeticamente a biomassa.

As cinzas são originadas dos componentes minerais da madeira e da casca, sendo um parâmetro importante para a madeira e seus derivados, pois seu teor afeta negativamente o poder calorífico dos materiais lignocelulósicos e ainda pode aumentar a frequência de limpeza dos cinzeiros, local onde são depositadas. Segundo Obernberger e Thek (2010), teores de cinza maiores que 3% para madeira e que 10% para outras biomassas são prejudiciais em combustíveis lignocelulósicos. Paula et al., (2011) encontrou valores de cinzas de 0,17% para madeira de eucalipto, valor próximo ao citado na tabela 1.

Em relação a umidade de equilíbrio higroscópico, quanto menor a do material no ambiente em que será utilizado, menos energia será consumida para evaporar a água e maior será a eficiência dos equipamentos utilizados para gerar energia a partir da biomassa. Ao mesmo tempo, o material pode ser armazenado por longos períodos sem prejudicar suas qualidades energéticas.

A densidade a granel interfere no espaço necessário para armazenar e/ou transportar a biomassa. Ou seja, quanto maior a densidade a granel, menos espaço será ocupado para uma mesma quantidade de material.

O poder calorífico superior (PCS) é um parâmetro muitas vezes determinante para qualificar o material como combustível, pois representa a quantidade de energia liberada por unidade de massa seca. Logo, quanto maior o poder calorífico, melhor o material em termos energéticos. Paula et al. (2011) constatou valores inferiores de PCS ao desse trabalho, sendo 4435kcal kg⁻¹ para madeira de eucalipto.

3.2 Propriedades dos briquetes torreficados

Na Tabela 2 estão indicados os valores médios das propriedades da madeira de eucalipto após o processo de briquetagem e torrefação.



Tabela 2. Valores médios das propriedades químicas, energéticas e físicas dos briquetes torreficados de *Eucalyptus sp.* em função da temperatura de torrefação

Temperatura (°C)	Materiais voláteis (%)	Carbono fixo (%)	Cinzas	Poder calorífico superior (kcal kg ⁻¹)	Umidade de equilíbrio higroscópico (%)	Densidade aparente (g.cm ³)
Testemunha	85,41 a	13,29 b	1,30 b	4802 b	8,16 a	1,05 a
180	85,43 a	13,27 b	1,30 b	4715 b	8,11 a	1,04 a
220	84,95 a	13,74 b	1,31 b	4865 ab	7,42 b	1,00 b
260	80,02 b	18,44 a	1,54 a	5003 a	4,27 c	0,93 c

Médias nas colunas seguidas de mesma letra não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

No geral, com o aumento da temperatura, o percentual de materiais voláteis foi reduzido, apesar da diferença significativa ter ocorrido apenas para a temperatura de 260°C, apresentando o melhor resultado, visto que os materiais voláteis auxiliam na volatilização mais rápida da matéria-prima, além de favorecerem uma queima heterogênea e diminuição do tempo de permanência do material nos equipamentos de combustão. Nota-se que os materiais voláteis diminuíram em relação à biomassa “*in natura*”, o que demonstra a contribuição positiva da torrefação. No caso do uso residencial do briquete, isso seria uma vantagem, pois uma menor quantidade de fumaça seria liberada no ambiente.

Houve um aumento do teor de carbono fixo em razão do aumento da temperatura de torrefação, principalmente em 260°C, devido a maior degradação das hemiceluloses nessa faixa de temperatura. As hemiceluloses são mais suscetíveis às reações químicas de degradação e menos tolerantes à ação do calor, por causa da presença de hidroxilas expostas conectadas à sua cadeia principal, devido à condição amorfa. O grupo das hemiceluloses são os primeiros constituintes químicos a serem degradados, entre 200 e 260°C. Em seguida, degrada-se a celulose (240°C – 350°C) e, por último, o componente mais resistente à decomposição térmica, a lignina (150°C – 500°C). Apesar de iniciar em menores temperaturas, a decomposição térmica da lignina é a mais lenta e difícil, caracterizada pela baixa perda de massa em função do aumento da temperatura e pela alta porcentagem de massa residual.

Comparando com o teor de carbono fixo da biomassa “*in natura*”, o emprego da torrefação permitiu melhorar esses valores, principalmente em 260°C, produzindo briquete de maior carbono fixo e conseqüentemente de maior poder calorífico superior.

Observa-se que o maior teor de cinza foi encontrado na temperatura de 260°C, embora nas demais temperaturas não houve variação. Provavelmente, isso ocorreu devido a maior degradação da matéria orgânica, restando a fração inorgânica do material, as cinzas. E também em virtude da maior perda de massa à 260°C, fazendo com que a quantidade de cinzas passasse a ser mais representativa em relação a massa total. Devido a isso, observa-se o aumento dos teores de cinza sob torrefação em relação ao teor de cinza da biomassa “*in natura*”. Altos teores de cinzas são indesejáveis energeticamente, pois reduzem o poder calorífico da biomassa. Entretanto, tal fato não ocorreu, provavelmente porque o valor de cinza (1,54%) não foi suficiente para reduzir de forma significativa o poder calorífico do briquete torreficado.

O poder calorífico dos briquetes torreficados à temperatura de 260°C foi superior as demais temperaturas. Isso comprova o efeito da temperatura sobre o aumento do teor de carbono fixo, influenciando no aumento do poder calorífico, pois são parâmetros diretamente



proporcionais. Nota-se ainda que a torrefação contribuiu para elevar o PCS comparativamente a biomassa “*in natura*”, pois a medida em que o material foi submetido a diferentes temperaturas, maior quantidade de energia foi liberada.

De modo geral, a umidade de equilíbrio higroscópico reduziu com o aumento da temperatura, sendo os menores valores encontrados em 260°C, visto que o processo de torrefação reduz a higroscopicidade da biomassa, pois, a medida em que se aumenta a temperatura de torrefação, há redução da relação constituintes hidrofílicos e hidrofóbicos, ou seja, aumenta o percentual de lignina e diminui o de holoceluloses.

Vilas Boas (2011) obteve valores superiores aos encontrados nesse trabalho, sendo briquetes produzidos com partículas de *Eucalyptus sp.* sob diferentes tratamentos térmicos, valores de umidade de equilíbrio higroscópico de 11,74, 10,18 e 10,72% para testemunha, 180°C e 220°C, respectivamente.

A densidade aparente dos briquetes é um parâmetro de grande importância, pois define as condições de estocagem, armazenamento e transporte, e afeta diretamente a densidade energética.

Em relação à temperatura de torrefação, nota-se que, no geral, com o aumento da temperatura, houve redução da densidade aparente, sendo que a testemunha e a temperatura de 180°C não diferiram entre si. A diminuição da densidade está relacionada com a maior perda de massa dos briquetes torreficados que ocorre em maiores temperaturas, no caso, em 260°C, devido à volatilização de extrativos, evaporação de água e pela degradação parcial das hemiceluloses.

4. CONCLUSÕES

O resíduo de madeira de eucalipto possui potencial para produção de briquetes torreficados e pode ser reaproveitado para geração de energia.

O processo de torrefação contribui para melhorar as características da biomassa “*in natura*” visando a produção de briquetes, pois os briquetes torreficados tiveram diminuição do teor de materiais voláteis, diminuição da higroscopicidade e aumento no teor de carbono fixo e poder calorífico, além de produzir briquete com menor densidade.

A temperatura de 260°C promoveu melhores ganhos energéticos dos briquetes torreficados.

A técnica da briquetagem e torrefação permite obter uma biomassa de melhor qualidade energética.

AGRADECIMENTOS

Ao apoio da CAPES, do CNPq e da FAPEMIG por conceder recursos financeiros para aquisição de suplementos fundamentais para a realização desse trabalho, bem como viabilizar a participação no II CBCTEM.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 9484:** Compensado – Determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro. 1986.



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112**: Carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro, 1986. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**: Carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG – DIN **EN 15103** - Solid biofuels Determination of bulk density. Alemanha, 2010.

DUTTA, A.; LEON, M.A. **Pros and cons of torrefaction of Woody biomass**. 2012. University of Guelph.

LORA, E.E.S.; VENTURINI, O.J.; ANDRADE, R.V. **Torrefação de madeira**. In: Bioenergia & Biorrefinaria - Cana-de-açúcar & Espécies Florestais". Editores: Santos, F.; Colodette, J.; Queiroz, J.H. Pág 401 – 427. Viçosa, MG. 2013.

MORAIS, S. A. L. de, NASCIMENTO, E. A. do, MELO, D. C. de. Análise da madeira *Pinus oocarpa* parte 1 – estudo dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis. **Revista Árvore**. v. 29, n. 3, p. 461-470, 2004.

OBERNBERGER, I.; THEK, G. **The pellet handbook: The production and thermal utilisation of pellets**. London: Earthscan, 2010. 593 p.

PAULA, L. E. R.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; BIANCHI, M. L. Caracterização de resíduos de biomassa vegetal para utilização energética. **CERNE**, v.17, n.2, p.237-246, 2011.

QUIRINO, W. F. **Briquetagem de resíduos ligno-celulósico**. Circular técnica do Laboratório de Produtos Florestais – LPF, v. 1, n. 2, p. 69-80, Brasília, 1991.

QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal. Brasília, DF: IBAMA, Laboratório de Produtos Florestais, 1991. 16 p. (IBAMA-LPF. Série técnica, n. 13).

SANTOS, J. R. S. **Estudo da biomassa torrada de resíduos florestais de eucalipto e de bagaço de cana-de-açúcar para fins energéticos**. 2012. 86 f. Dissertação (Mestrado Ciências, Programa: Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

VILAS BOAS, M. A. **Efeito do tratamento térmico da madeira para produção de briquetes**. 65 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

WERTHER, J., SAENGERA M., HARTGEA E. U., OGADA T., SIAGIB Z. Combustion of agricultural residues. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 26, p. 1-27, 2000.