

DENSIFICAÇÃO DA SERRAGEM DE *Eucalyptus* sp. EM DIFERENTES TEMPERATURAS

Walbert CHRISOSTOMO¹, Fabio YAMAJI², Hiroyuki YAMAMOTO³

- 1 Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil.
- 2 Centro de Ciências e Tecnologias para a Sustentabilidade, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, Brasil.
- 3 Nagoya University, Graduate School of Bioagricultural Sciences, Nagoya, Japão.

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência da temperatura do processo de compactação de serragem de *Eucalyptus* sp. nas propriedades físicas dos briquetes. A serragem foi densificada em diferentes temperaturas, de 20°C a 180°C em intervalos de 10°C. As amostras produzidas foram caracterizadas por microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura (MEV), ensaio mecânico de compressão e análise térmica dinâmico-mecânica (DMTA). Os resultados mostraram que a resistência mecânica e a densidade da serragem densificada foram maiores nas amostras produzidas em temperaturas mais elevadas. As imagens de MEV mostraram que houve mudanças na superfície das amostras com o aumento da temperatura e que a ligação entre as partículas foram principalmente por meio de pontes sólidas. Os resultados obtidos por DMTA confirmaram que a ativação (amolecimento) da hemicelulose e da lignina presente no material ocorreu em diferentes temperaturas (diferentes faixas de transição vítrea), contribuindo com a resistência mecânica do material densificado. Em conclusão, a temperatura do processo de compactação da serragem influenciou significativa sobre os mecanismos de ligação entre as partículas do material, melhorando as propriedades físicas dos briquetes em temperaturas superiores à 140°C.

Palavras-chave: compactação, briquetes, resíduos de madeira.

Abstract

SAWDUST Eucalyptus sp. DENSIFICATION AT DIFFERENT TEMPERATURES

This study aims to evaluate the influence of temperature of the sawdust compression process of *Eucalyptus* sp. the physical properties of the densified material. The sawdust was densified at different temperatures of 20°C to 180°C in 10 ° C increments. The produced samples were characterized by optical microscopy, scanning electron microscopy, mechanical compression test and dynamic mechanical analysis. The results showed that the mechanical strength and the density of the densified sawdust were higher in the samples produced at higher temperatures. The SEM images showed that there were changes in the surface of the samples with increasing temperature and that the bonding between the particles were mainly by solid bridges formed by natural binders, such as lignin and hemicellulose. The results confirmed that by dynamic mechanical analysis activation (softening) hemicellulose and lignin present in the material occurred at different temperatures (different glass transition ranges), contributing to the mechanical strength of the densified material. In conclusion, the temperature of compaction process sawdust significant influence on the binding mechanisms between the particles of the material, improving the physical properties of the densified product.

Keywords: compaction, briquettes, wood residues.



1. Introdução

Atualmente, há um grande interesse na utilização da biomassa lignocelulósica e seus resíduos para a produção de biocombustíveis. Além de inúmeras vantagens, o uso da biomassa no lugar de combustíveis fósseis resulta em baixas emissões de gases poluentes, contribuindo com o meio ambiente. Uma das principais limitações para a utilização da biomassa no seu estado original é o seu alto teor de umidade, formato e tamanho irregular e baixa densidade, resultando em altos custos de processamento, transporte e armazenamento (KALIYAN & MOREY, 2009).

Uma possível solução para estes problemas seria a densificação da biomassa, na forma de briquetes e *pellets*, pelo processo de compactação mecânica (MANI et al., 2006). O processo de compactação mecânica da biomassa consiste na aplicação de pressão em uma massa de partículas dispersas com objetivo de torná-las um sólido compacto, aumentando sua densidade em até dez vezes (TUMULURU et al., 2010).

Os processos convencionais de compactação da biomassa, como a extrusão, briquetagem e peletização são amplamente conhecidos, porém, ainda não existe um consenso sobre os mecanismos de ligação que permitem a formação, resistência e durabilidade dos produtos densificados. São poucos os estudos sobre as forças fundamentais que mantêm a boa formação e resistência mecânica de briquetes e *pellets*. No entanto, diferentes mecanismos de ligação são sugeridos na literatura e outras informações podem ser obtidas a partir de áreas relacionadas, como a tecnologia da madeira e a ciência dos materiais (STELTE et al., 2011). Assim, compreender os mecanismos de ligação entre as partículas da biomassa densificada é importante para determinar os parâmetros do processo de compactação e os ensaios que devem ser realizados para medir a resistência e durabilidade desses produtos (KALIYAN e MOREY, 2009).

As variáveis do processo de compactação como temperatura e pressão, desempenham um papel importante na qualidade da biomassa densificada. A densidade e a durabilidade da biomassa densificada são significativamente influenciadas pela temperatura (TUMULURU et al., 2010). Mani et al. (2006) observaram em seu estudo que em temperaturas mais elevadas, o grau de compactação do material aumentou, resultando em uma melhor qualidade dos *pellets* produzidos.

De acordo com os autores Tabil e Sokhansanj (1996) dois aspectos importantes devem ser considerados durante a compactação da biomassa: (1) a capacidade das partículas em formar produtos densificados com boa resistência mecânica e (2) a capacidade do processo em aumentar a densidade do material. O primeiro aspecto é uma questão fundamental do tipo de mecanismo de ligação que ocorre entre as partículas, influenciando assim na resistência mecânica do produto densificado.

Rumpf (1962) foi o pioneiro no estudo de mecanismos de ligação entre partículas de aglomerados de biomassa. Ele sugeriu diferentes mecanismos de ligação, tais como ligações covalentes entre partículas adjacentes devido a reações químicas; forças atrativas, como forças de Van Der Waals; ligações de hidrogênio e mecanismos de entrelaçamento entre as partículas do material.

Kaliyan e Morey (2010) avaliaram os mecanismos de ligação de briquetes feitos de capim e palha de milho, produzidos em prensas de rolos, através de microscopia eletrônica de varredura. Após análises, concluíram que a ligação entre as partículas é principalmente devido à formação de pontes sólidas por ligantes naturais, tais como a lignina da biomassa, que sofre transição vítrea durante o processo de compactação, melhorando a adesão entre as partículas. Em temperaturas elevadas, ocorre o fluxo de polímeros amorfo de uma partícula de biomassa para outras partículas adjacentes, resultando em mecanismos de adesão por pontes sólidas.



Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da temperatura do processo de compactação da serragem de *Eucalyptus sp.* nas propriedades físicas dos briquetes e a sua contribuição para a resistência mecânica do produto densificado.

2. Materiais e métodos

O material utilizado neste trabalho foi a serragem de *Eucalyptus sp.* O material em forma de cavacos foi obtido em uma madeireira no município de Sorocaba/SP.

2.1 Preparação da serragem para a compactação

A serragem foi triturada em um micro moinho de facas tipo Willy e classificada em peneiras granulométricas. Para o processo de compactação, utilizou-se a fração que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retida na peneira de 60 mesh. O material selecionado foi seco em estufa (105 ± 2)°C até massa constante. A partir do material seco a sua umidade foi ajustada para 10% base seca. O ajuste foi feito adicionando a quantidade de água necessária para atingir o teor de umidade desejado. Após a adição da água, o material foi acondicionado em saco plástico durante 24 horas. Para confirmar o teor de umidade do material antes da compactação, o mesmo foi analisado em uma balança determinadora de umidade, da marca A&D Company, modelo MX – 50.

2.2 Compactação da serragem

O processo de compactação da biomassa foi realizado em uma prensa hidráulica, com capacidade de 15 toneladas. As amostras foram produzidas em um molde cilíndrico de aço inoxidável, com diâmetro interno de 35 mm (Figura 1).

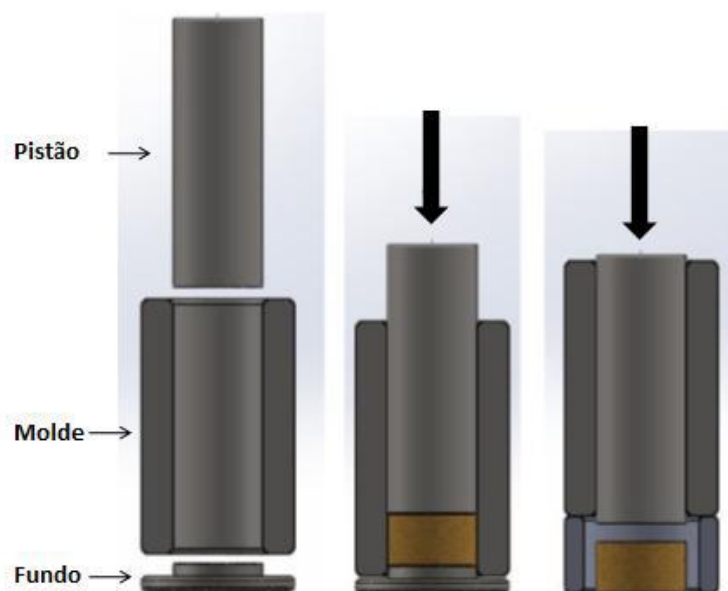


Figura 1. Representação do molde utilizado na compactação da serragem

Com o objetivo de avaliar o efeito da temperatura do processo de compactação na formação e resistência mecânica do produto densificado, o material foi compactado sob diferentes temperaturas: de 20°C à 180°C, em intervalos de 10°C. A compactação da serragem foi realizada através do pré-aquecimento do molde. Utilizou-se 10 gramas de serragem do

material na produção de cada amostra. A pressão utilizada no processo de compactação do material foi de 1500 kgf.cm^{-2} e o tempo de aplicação da pressão máxima de 1 minuto.

2.3 Caracterização da serragem densificada

2.3.1 Densidade aparente

A densidade aparente do material densificado foi determinada logo após a sua compactação através do quociente entre a massa e o volume de cada amostra. As amostras foram pesadas em uma balança analítica e medidas com auxílio de um paquímetro digital.

2.3.2 Ensaio mecânico de tração por compressão diametral

A resistência mecânica do material densificado foi determinada imediatamente após à sua compactação, através do ensaio de tração por compressão diametral das amostras. Este ensaio consiste em submeter o corpo-de-prova cilíndrico a cargas de compressão, onde a tensão de compressão produz uma tensão de tração paralela ao plano de carregamento. O ensaio foi realizado em uma máquina universal de ensaios mecânicos, EMIC, com capacidade máxima de 300 kN, com uma célula de carga de 500 N, a uma velocidade de 3 mm/min. A carga foi aplicada no sentido transversal da amostra, perpendicular à pressão de compactação (Figura 2).

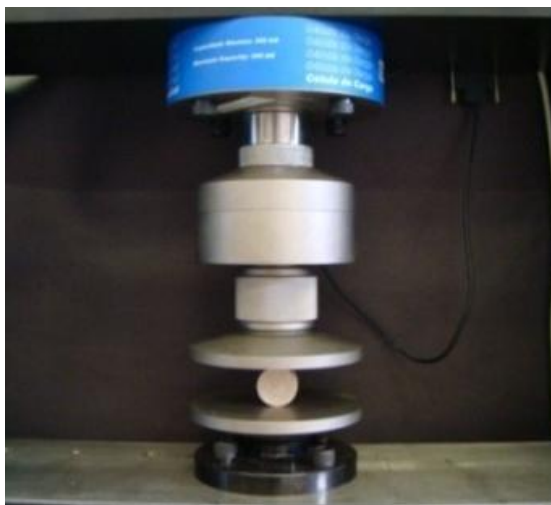


Figura 2. Representação do molde utilizado na compactação da serragem

2.3.3 Análise térmica dinâmico-mecânica (DMTA)

A temperatura de transição vítrea da serragem densificada em diferentes temperaturas foi determinada em um equipamento Perkin Elmer DMA 8000, usando o modo 'single cantilever'. A amostra foi produzida pela compactação de 2 gramas do material em um molde de aço inoxidável, com aquecimento de $180 \text{ }^\circ\text{C}$, pressão máxima de 1500 kgf.cm^{-2} , durante 3 minutos. O material compactado foi cortado em amostras retangulares ($25 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$) e condicionadas em câmara climática a 65 % UR e $20 \text{ }^\circ\text{C}$, durante 1 semana. As análises foram conduzidas com taxa de aquecimento de $5^\circ\text{C}/\text{min}$, entre $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ e $200 \text{ }^\circ\text{C}$, com uma amplitude de deformação de $15 \text{ }\mu\text{m}$ e frequência de 1 Hz.

2.3.4 Microscopia ótica (MO) e Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A superfície da biomassa densificada em diferentes temperaturas foi caracterizada por microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura para avaliar possíveis mudanças na superfície do material densificado, como a ação aglutinante dos constituintes naturais.

3. Resultados e discussão

3.1 Ensaio mecânico de tração por compressão diametral

A temperatura do processo de compactação influenciou significativamente na resistência mecânica das amostras densificadas. A Figura 3 apresenta os resultados do ensaio mecânico de tração por compressão diametral das amostras densificadas em diferentes temperaturas.

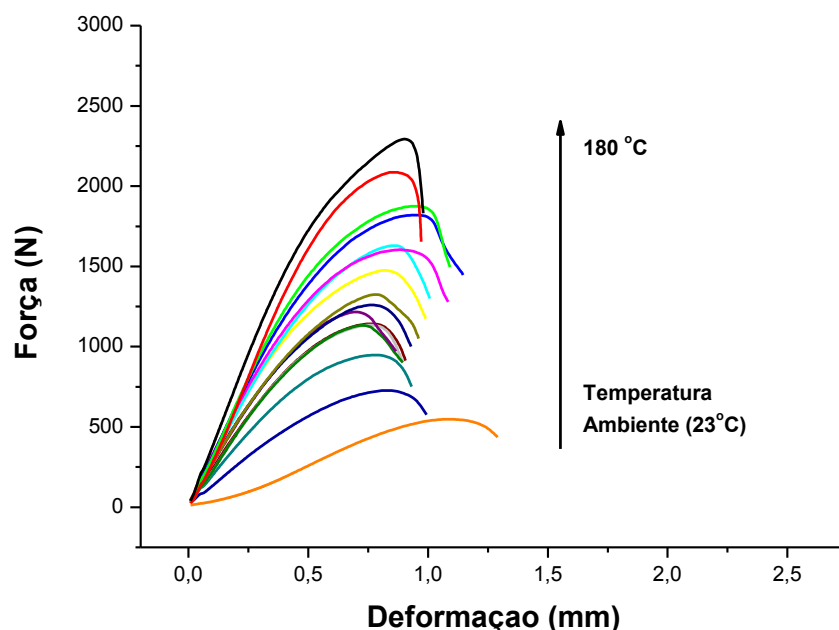


Figura 3. Curva força x deformação das amostras densificadas em diferentes temperaturas.

Os resultados indicam um aumento significativo da resistência à compressão das amostras com o aumento da temperatura. Lee et al. (2013) sugere que a maior resistência dos briquetes produzidos em temperaturas mais elevadas é devido à ação aglutinante da lignina presente na madeira. Com o aumento da temperatura a lignina amolece, agindo como um adesivo entre as partículas da madeira sob alta pressão.

A Figura 4 apresenta o gráfico da densidade média dos materiais densificados em diferentes temperaturas.

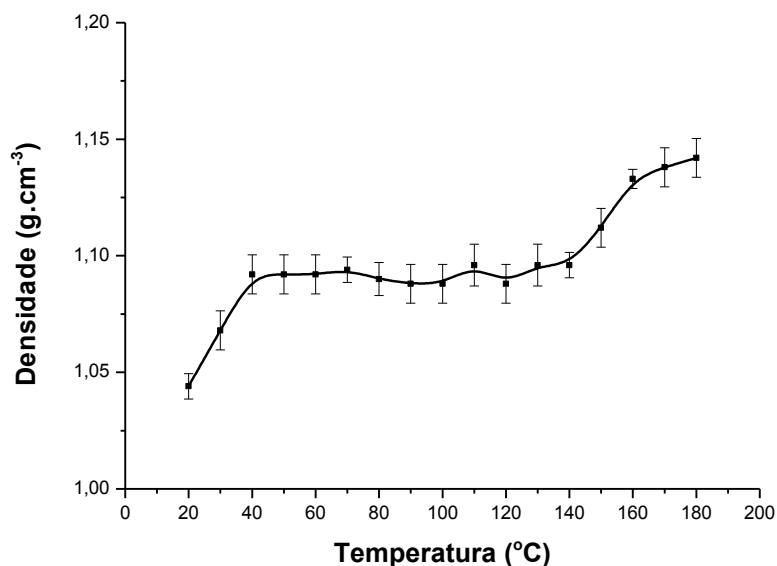


Figura 4. Densidade das amostras compactadas em diferentes temperaturas.

3.2 Análise térmica dinâmico-mecânica

A Figura 5 apresenta os resultados da DMTA da serragem de *Eucalypto sp.* densificada. As transições do material podem ser observadas com maior clareza pelo gráfico do tan delta.

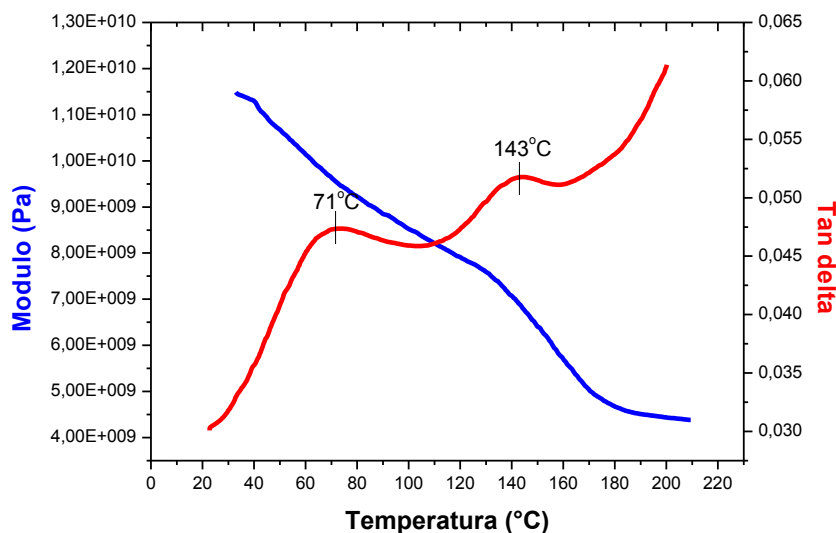
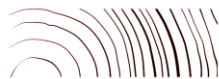


Figura 5. Análise Termo Dinâmico-Mecânica da serragem de *Eucalyptus sp.* densificada

Dois picos distintos podem ser observados no material (aproximadamente 77°C e 140°C). O pico em temperatura inferior (77°C) pode ser atribuído à transição vítrea da hemicelulose da serragem, enquanto que o pico em temperatura superior (140°C) pode ser atribuído à transição vítrea da lignina da serragem.



3.3 Microscopia ótica e eletrônica de varredura

A Figura 6 apresenta as imagens obtidas por microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura da biomassa densificada por compactação sem aquecimento (20°C) e por compactação com aquecimento (180°C).

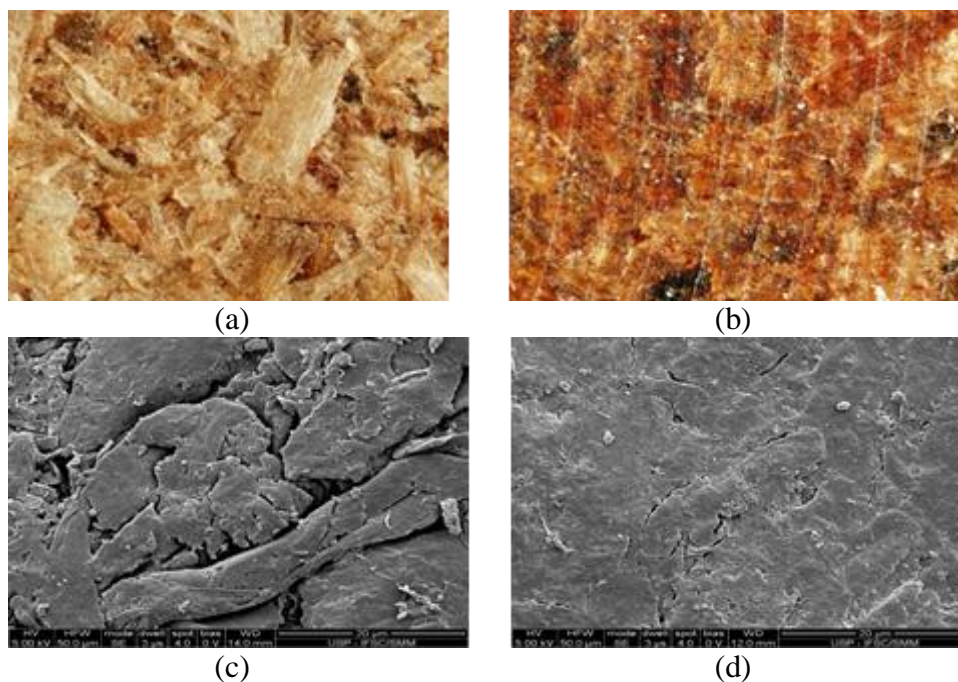


Figura 6. Microscopia Ótica (x10) da superfície da biomassa densificada a 20°C (a) e a 180°C (b). Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície da serragem densificada a 20°C (c) e a 180°C (d).

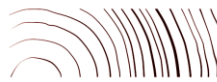
Comparando-se as superfícies da serragem densificada a 20°C (Figura 6a e 6c) e a 180°C (Figura 6b e 6d), diferenças significativas podem ser observadas. Primeiramente, os espaços vazios entre as partículas observados na serragem densificada a 20°C é uma indicação de baixa adesão entre as partículas adjacentes. Neste caso, os principais mecanismos de ligação entre as partículas são, forças de Van Der Waals e ligações de hidrogênio.

No caso da biomassa densificada a 180°C, a superfície é mais uniforme e plana, diminuindo os espaços entre as partículas. As micrografias desta amostra apresentaram sinais de formação de pontes sólidas entre as partículas do material, devido provavelmente ao amolecimento da lignina sob as condições de compactação (alta pressão e temperatura).

4. Conclusões

O processo de compactação com aquecimento e controle da temperatura foi eficiente na produção das amostras. O aquecimento no processo de compactação aumentou em 9,6% a densidade e em 318% a resistência mecânica dos briquetes, comparando as amostras produzidas com temperatura de 20°C às produzidas com 180°C. Dentro da faixa de temperatura estudada (de 20°C à 180°C), quanto maior a temperatura utilizada na compactação, maior foi a densidade e a resistência mecânica da serragem de *Eucalyptus sp.* densificada.

A serragem de *Eucalyptus sp.* apresentou transições vítreas em temperaturas distintas, (aproximadamente 75°C e 135°C), ocasionadas por seus constituintes. A densificação por



compactação com temperatura acima das transições do material resultou em produtos de maiores densidades e resistência mecânica.

Referências Bibliográficas

KALIYAN, N.; VANCE MOREY, R. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*, v. 33, n. 3, p. 337-359, 2009.

KALIYAN, Nalladurai et al. Densification characteristics of corn stover and switchgrass. *Transactions of the ASABE*, v. 52, n. 3, p. 907-920, 2009.

LEE, S. M. et al. Effects of densification variables on the durability of wood pellets fabricated with *Larix kaempferi* C. and *Liriodendron tulipifera* L. sawdust. *biomass and bioenergy*, v. 48, p. 1-9, 2013. MANI, S.; TABIL, L. G.; SOKHANSANJ, S. Evaluation of compaction equations applied to four biomass species. *Canadian Biosystems Engineering*, v. 46, n. 3, p. 3.55-3.61, 2004.

MANI, S.; TABIL, L. G.; SOKHANSANJ, S. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. *Biomass and Bioenergy*, v. 30, n. 7, p. 648-654, 2006.

RUMPF, H., 1962, "The Strength of Granules and Agglomerates," in W. A. Knepper (Ed.), *Agglomeration*, New York, USA: Interscience Publishers, 379-418, 1962.

STELTE, W. et al. A study of bonding and failure mechanisms in fuel pellets from different biomass resources. *Biomass and Bioenergy*, v. 35, n. 2, p. 910-918, 2011.

TABIL JR, L.; SOKHANSANJ, S. Process conditions affecting the physical quality of alfalfa pellets. *Applied Engineering in Agriculture*, v. 12, 1996.

TUMULURU, J. S. et al. A review on biomass densification technologies for energy application. *Idaho Natl. Lab.*, Idaho Falls, ID, 2010.