



INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO DE COMPACTAÇÃO NA RESISTÊNCIA DE BIOCOMBUSTÍVEIS SÓLIDOS PRODUZIDOS A PARTIR DE SERRAGEM DE PINUS

Walbert Chrisostomo¹, Fábio Minoru Yamaji², Alessandra Luzia Da Roz³, Antonio José Felix de Carvalho⁴

¹Doutorando em Ciência e Engenharia de Materiais w.chrisostomo@usp.br, ²Doutor em Engenharia Florestal fmyamaji@ufscar.br, ³Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais alroz_pessoal@yahoo.com.br, ⁴Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais toni@usp.sc.br
Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Materiais, São Carlos/SP, Brasil. <http://cem.iqsc.usp.br/> (16) 33738679
Universidade Federal de São Carlos, PPGCM, Campus Sorocaba, Sorocaba/SP, Brasil. <http://www.ppgcm.ufscar.br/> (15) 32295941

RESUMO

São muitos os esforços para explicar a adesão entre as fibras da biomassa lignocelulósica compactadas. Essas explicações englobam uma série de mecanismos que incluem entrelaçamento mecânico, ligações covalentes, interações do tipo ligações de hidrogênio, interações de Van Der Waals e ação de compostos ligantes presentes no material. As propriedades do material compactado dependem da força física que ligam as fibras entre si. O presente trabalho tem por objetivo avaliar a influência do teor de umidade e da temperatura do processo de compactação da serragem de *Pinus* nas propriedades do material densificado. As amostras foram produzidas através da compactação do material com diferentes teores de umidade, em um molde de aço inoxidável com o auxílio de uma prensa hidráulica. O processo de compactação foi realizado em temperatura ambiente e com aquecimento do molde. A formação do material densificado foi avaliada por meio de ensaio mecânico das amostras produzidas por diferentes tratamentos. Os resultados mostraram que tanto o teor de umidade do material como também o aquecimento na compactação influenciaram na adesão entre as fibras, resultando em um material de maior resistência.

Palavras Chave: Biomassa Lignocelulósica, Compactação, Adesão.

ABSTRACT

INFLUENCE OF VARIABLE IN THE PROCESS OF COMPRESSION STRENGTH OF SOLID BIOFUELS PRODUCED FROM PINUS SAWDUST

There are many efforts to explain the adhesion between the fibers of lignocellulosic biomass compacted. These explanations include a number of mechanisms that include mechanical interlocking, covalent interactions, like hydrogen bonding, Van Der Waals interactions and binding action of compounds present in the material. The properties of compacted material depends on the physical force that bind the fibers together. This study aims to assess the influence of moisture content and temperature of the compression process of sawing pine in the properties of densified material. The samples were produced by compacting the material with different moisture contents in a stainless steel mold with the aid of a hydraulic press. The compaction process was carried out at room temperature and heating the mold. The formation of the densified material was assessed by means of mechanical test of the samples produced by different treatments. The results showed that both the moisture content of the material as well as the heating in compression influence the adhesion between fibers, resulting in a material of higher strength.

Keywords: Lignocellulosic biomass, Compression, Adhesion.

INTRODUÇÃO

O aproveitamento térmico de resíduos lignocelulósicos é uma forma relativamente barata e tecnologicamente viável de produzir energia, principalmente no que se relaciona à utilização de resíduos gerados a partir de processos agroindustriais. A compactação é uma boa alternativa para a utilização desses resíduos como combustível sólido, na forma de biocombustíveis sólidos. O processo de compactação consiste na aplicação de pressão em uma massa de partículas dispersas com objetivo de torná-las um sólido compacto de alta densidade. Essa operação pode ocorrer com ou sem a presença de um aglutinante. A compactação de resíduos lignocelulósicos melhora, de forma significativa, a qualidade energética da matéria-prima. Esse tipo de processo é muito utilizado nos países industrializados, onde as matérias-primas se constituem principalmente de sobras de madeira (WAMUKONYA; JENKINS, 1995). Na compactação de materiais lignocelulósicos podem-se obter dois produtos finais: o *pellet* e o briquete. O *pellet* é o resultado de um processo de compactação classificado



como peletização, onde o produto final são pequenos cilindros de 6 a 10 mm de diâmetro, com 20 a 30 mm de comprimento. O briquete é o resultado de um processo de compactação de biomassa classificado como briquetagem, onde o produto final são cilindros e outras formas bem maiores que a do *pellet* (OBERNBERGER; THEK, 2004).

A técnica de compactação de materiais lignocelulósicos é uma transformação física que não afeta a composição química da matéria-prima (TABARÉS *et al.*, 2000). Em princípio, todos os tipos de partículas e fibras de materiais lignocelulósicos são compactáveis desde que se encontrem nas condições apropriadas de umidade e tamanho de partícula em que o processo de compactação utilizado exige (ERIKSSON; PRIOR, 1990). Certo número de variáveis pode influenciar as propriedades do produto compactado. Além da pressão de compactação, da velocidade de aplicação de carga, da temperatura utilizada no processo, a matéria-prima também exerce influência significativa na qualidade do material compactado (LI; LIU, 2000).

Existem vários mecanismos que permitem a ligação entre as fibras de materiais lignocelulósicos compactados, e geralmente todos eles colaboram para obter a resistência e a coesão final do material densificado. Os compostos ligantes que já estão presentes na matéria-prima podem ser ativados pelas elevadas pressões e temperaturas alcançadas no processo de compactação. Pode ser o caso da lignina, e de extrativos orgânicos presentes nas células dos lignocelulósicos, que amolece entre 100 e 190 °C, agindo como uma cola entre as partículas e fibras. O emaranhamento (entrelaçamento) entre as partículas e fibras e as interações de forças de Van der Waals ativadas pela forte aproximação e deformação provocada pelas pressões de compactação também podem colaborar (GROVER; MISHRA, 1996). A água desempenha um papel vital nas interações entre partículas e fibras de materiais lignocelulósicos, tendo grande contribuição nas propriedades desses materiais. A resistência e a durabilidade dos materiais compactados dependem da força física que ligam as partículas entre si (DELGADO-FORNUÉ *et al.*, 2011). Compreender os mecanismos de ligação das partículas e fibras é importante a fim de determinar os ensaios que devem ser realizados para medir a resistência e a durabilidade dos materiais compactados.

O objetivo do trabalho foi avaliar a influência do teor de umidade e da temperatura do processo de compactação da serragem de *Pinus* nas propriedades do material densificado.

MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado no desenvolvimento deste trabalho foi a serragem de *Pinus*. A serragem foi obtida em uma empresa produtora de embalagens de madeira no interior do estado de São Paulo.

Processamento e Caracterização do material

O material foi picado em um micro moinho de facas tipo Wiley e separado em peneiras com abertura de malha progressiva, obtendo assim partículas menores e uniformes. Foi selecionado para a compactação a fração do material que ficou retida na peneira de 40 mesh (0,42 mm). O material selecionado foi seco em estufa (105 ± 2)°C até massa constante. Após a secagem parte do material foi armazenado em saco plástico e a outra parte ajustado o teor de umidade para 12 %. O ajuste para 12% foi feito a partir do material seco (aproximadamente 0% de umidade) calculando a quantidade de água necessária para atingir 12% de umidade (base seca). Após a adição de água os materiais foram acondicionados em sacos plástico. Para confirmar o teor de umidade dos materiais antes da compactação, os mesmos foram analisados em uma balança determinadora de umidade, da marca A&D Company, modelo MX – 50.

Determinação do teor de extrativos orgânicos do *Pinus*

O teor de extrativos solúveis em água da serragem do *Pinus* foi determinado pela norma TAPPI T212 om-98. O teor de extrativos solúveis em solventes orgânicos (cicloexano/etanol) da serragem do *Pinus* foi determinado de acordo com a norma TAPPI T207 om-93.

Determinação do teor de lignina Klason insolúvel do *Pinus*

O teor de lignina Klason insolúvel da serragem de *Pinus* foi determinado pelo método TAPPI T222 om-98.

Compactação do material

Foram realizados 4 tratamentos: I – material com 0% de umidade e temperatura do molde de 21°C (temperatura ambiente); II - material com 0% de umidade e temperatura do molde de 120°C; III - material com 12% de umidade e temperatura do molde de 21°C (temperatura ambiente); IV - material com 12% de umidade e temperatura do molde de 120°C.



A compactação do material foi realizada em uma prensa hidráulica, com capacidade de 15 toneladas (Figura 1 (a)). As amostras foram produzidas em um molde cilíndrico de aço inoxidável, com diâmetro interno de 35 mm (Figura 1 (b)). Foram utilizados 10 gramas de serragem na produção de cada amostra. A pressão utilizada no processo de compactação do material foi de 1250 kgf.cm^{-2} . O tempo de aplicação da pressão máxima utilizada foi de 15 segundos. Para avaliar a influência da temperatura na formação do material compactado com diferentes teores de umidade, o processo de compactação foi realizado sem aquecimento e com o aquecimento do molde (120°C).



(a)



(b)

Figura 1. (a) molde de aço inoxidável e (b) prensa hidráulica.

Figure 1. (a) stainless steel mold and (b) hydraulic press.

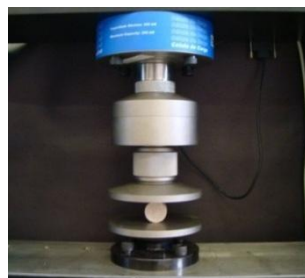
Caracterização do material densificado

Expansão longitudinal do material compactado

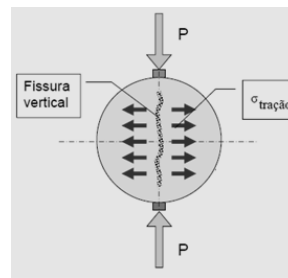
A expansão longitudinal do material compactado foi analisada medindo o comprimento (sentido de compactação) das amostras com o auxílio de um paquímetro digital, em intervalos de tempo determinados, durante um período de 48 horas após a compactação. As amostras produzidas a partir da compactação do *Pinus* por diferentes tratamentos foram mantidas em dessecador com sílica gel durante o período de medição, para que a variação da umidade do ar não influenciasse na expansão.

Ensaio mecânico de tração por compressão diametral

O ensaio mecânico de tração por compressão diametral das amostras consiste em submeter corpos-de-prova cilíndricos a cargas de compressão, onde a tensão de compressão produz uma tensão de tração paralela ao plano de carregamento (Figura 2 (b)). O ensaio de resistência à compressão foi realizado em uma máquina de ensaios universal, modelo DL 30.000, 48 horas após a compactação da serragem. A carga foi aplicada no sentido transversal da amostra, perpendicular à pressão de compactação.



(a)



(b)

Figura 2. (a) ensaio de tração por compressão diametral e (b) representação do corpo-de-prova durante o ensaio.

Figure 2. (a) traction test by diametral compression and (b) representation of the specimen during testing.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resultados da caracterização química do material

Teor de extrativos e Teor de lignina Klason insolúvel

A Tabela 1 apresenta os resultados das análises de teor de extrativos solúveis em água (70°C), solúveis em cicloexano/etanol e lignina Klason da serragem de *Pinus*.



Tabela 1. Teor de extrativos e lignina da serragem de *Pinus* analisada.
Table 1. Extractives content and lignin of sawdust of Pine analyzed.

	<i>Solúveis em Água 70°C (%)</i>	<i>Solúveis em Cicloexano/Etanol (%)</i>	<i>Lignina Klason insolúvel (%)</i>
<i>Serragem de pinus</i>	3,62	2,85	27,65

A lignina presente no material age como aglutinante sob aquecimento, durante a compactação, sendo importante na formação e resistência do material compactado. Além do seu papel como aglutinante na formação do material compactado a lignina e os extrativos orgânicos também podem interferir nas propriedades energéticas do biocombustível sólido.

Resultados das caracterizações do material densificado

Na Figura 3 é possível observar as amostras produzidas a partir dos diferentes tratamentos logo após a compactação.



Figura 3. Amostras produzidas a partir da compactação da serragem de *Pinus* com diferentes tratamentos.
Figure 3. Samples produced from the compression of Pine sawdust with different treatments.

Expansão longitudinal

Os resultados da expansão longitudinal média das amostras com diferentes tratamentos após 48 horas de ensaio são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Expansão longitudinal das amostras após compactação.
Table 2. Longitudinal expansion of the samples after compression.

	<i>Expansão longitudinal média (%)</i>
<i>Tratamento IV</i>	4,61
<i>Tratamento III</i>	8,24
<i>Tratamento II</i>	9,25
<i>Tratamento I</i>	110,19

A maior expansão das amostras do Tratamento I, com teor de umidade de 0%, compactados sem aquecimento (21°C), indica que não ocorreu uma boa adesão entre as partículas, o que pode influenciar negativamente na resistência mecânica das amostras. Por outro lado, a menor expansão das amostras do Tratamento IV, com teor de umidade de 12%, compactados com aquecimento (120°C), aponta uma boa adesão entre as partículas do material compactado, formando um material de maior resistência mecânica em comparação as amostras dos outros Tratamentos.

A Figura 4 apresenta a expansão do material ao longo de um período de 48 horas após a compactação.

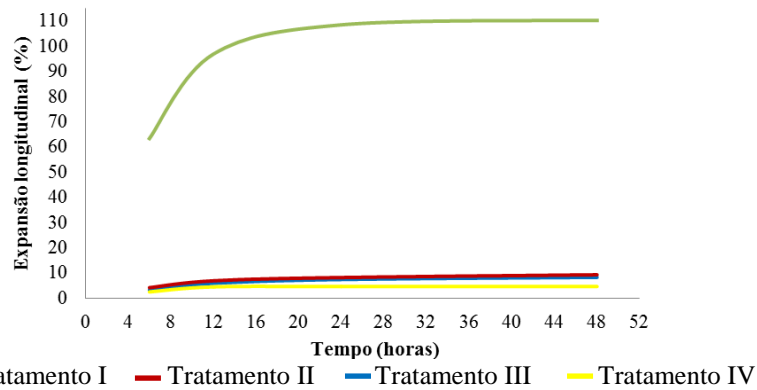


Figura 4. Gráfico de expansão longitudinal das amostras produzidas por diferentes tratamentos.
Figure 4. Graph longitudinal expansion of the samples produced by different treatments.

Analisando o gráfico da expansão média, observa-se que as amostras analisadas apresentaram maior expansão durante as primeiras 12 horas após a compactação.

Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados do ensaio de tração por compressão diametral das amostras do material compactado em diferentes condições são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Resistência das amostras no ensaio de tração por compressão diametral.
Table 3. Resistance of the traction test specimens for diametral compression.

	<i>Tensão máxima média (MPa)</i>	<i>Força máxima média (kgf)</i>
<i>Tratamento IV</i>	1,78	64,33
<i>Tratamento III</i>	0,51	22,46
<i>Tratamento II</i>	0,39	16,53
<i>Tratamento I</i>	-	-

Analisando os resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral das amostras compactadas em diferentes condições verificamos que as amostras do Tratamento IV, com teor de umidade de 12% e compactadas sob aquecimento (120 °C) apresentaram maior resistência em comparação as amostras dos outros Tratamentos. As amostras do Tratamento I, com 0% de umidade, compactadas sem aquecimento (21°C) não tiveram boa formação, não apresentando resistência ao ensaio da tração por compressão diametral.

A Figura 5 mostra o gráfico de tensão x deformação média das amostras produzidas em diferentes condições.

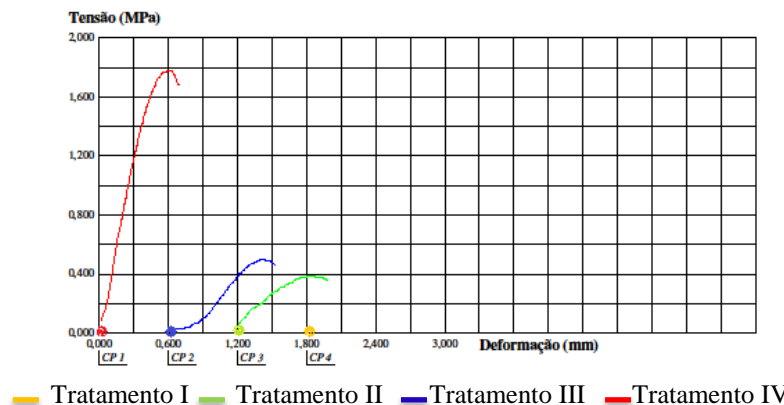


Figura 5. Gráfico da tensão x deformação das amostras com diferentes tratamentos.
Figure 5. Graph of stress x strain of samples with different treatments.



A presença da água na serragem do Tratamento III, com teor de umidade de 12%, compactados sem aquecimento (21⁰C), favoreceu a adesão das partículas do material, provavelmente por interações do tipo ligação de hidrogênio entre as partículas do *Pinus sp.* A boa resistência mecânica das amostras do Tratamento II, com teor de umidade de 0%, compactado com aquecimento (120⁰C) mesmo com baixo teor de umidade se deve a presença da lignina presente na serragem de *Pinus sp.*, ativada pelo aquecimento no processo, agindo como aglutinante entre as partículas do material.

CONCLUSÕES

Os resultados do ensaio mecânico das amostras mostraram que o teor de umidade do material, como também o aquecimento no processo de compactação influenciaram na resistência mecânica do material compactado. Tanto o teor de umidade como a temperatura agem no processo de adesão entre as partículas resultando em um material de maior resistência.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa e apoio financeiro. Aos Professores Doutores Antonio José Felix de Carvalho e Fábio Minoru Yamaji, pelo apoio acadêmico e pela disponibilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- WAMUKONYA, L.; JENKINS B. Durability and relaxation of sawdust and wheatstraw briquettes as possible fuels for Kenya. *Biomass and Biomass*, v. 8, n. 3, p. 175-179, 1995.
- OBERNBERGER, I.; THEK, G. Physical characterization and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. *Biomass and Bioenergy*, v. 27, p. 653-669, 2004.
- TABARÉS, J. L. M. et al. Feasibility study of energy use for densified lignocellulosic material (briquettes). *Fuel*, n. 79, p. 1229-1237, 2000.
- ERIKSSON, S.; PRIOR, M. *The briquetting of agricultural wastes for fuel*, Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1990.
- LI, Y.; LIU, H. High-pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel. *Biomass and Bioenergy*, v. 19, p. 177-186, 2000.
- GROVER, P. D.; MISHRA, S. K. *Biomass Briquetting: technology and practices*, Bangkok: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1996.
- DELGADO-FORNUÉ, E.; CONTRERAS H. J.; TORIZ, G. and ALLAN, G. G. Adhesion between Cellulosic Fibers in Paper. *Journal of Adhesion Science and Technology*. v. 25, p. 597-614, 2011.