

Painéis MDF produzidos com *Pinus caribaea* e resina poliuretana monocomponente a base de óleo de mamona

Sérgio Augusto Mello da Silva, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Departamento de Engenharia Civil, Ilha Solteira, SP. e-mail: sams@dec.feis.unesp.br

André Luis Christoforo, Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Civil, São Carlos, SP. e-mail: alchristoforo@yahoo.com.br

Luciano Donizeti Varanda, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Materiais, São Carlos, SP. e-mail: lu.varanda@hotmail.com

Diego Henrique de Almeida, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas, São Carlos, SP. e-mail: diegoestruturas@gmail.com

Marcio Rogerio da Silva, Universidade de São Paulo, Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Departamento de Engenharia de Biosistemas, Pirassununga, SP. e-mail: copacabana.mrs@ig.com.br

Amós Magalhães de Souza, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Materiais, São Carlos, SP. e-mail: amosmag@gmail.com

Julio Cesar Molina, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Itapeva, Faculdade de Engenharia, Itapeva, SP. e-mail: molina@itapeva.unesp.br

Francisco Antonio Rocco Lahr, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas, São Carlos, SP. e-mail: frocco@sc.usp.br

Resumo: Este trabalho objetivou avaliar com o auxílio da norma EMB/IS-2:1995⁽¹⁾ as propriedades mecânicas: módulo de resistência à flexão (MOR), resistência à tração perpendicular (TP) e resistência à tração superficial (TS) de painéis de madeira de média densidade (MDF) produzidos com adesivo poliuretano monocomponente a base de óleo de mamona e fibras de madeira de *Pinus caribaea*. Painéis de dimensões 500x500 mm e densidade nominal de 0,75g/cm³ foram preparados com uma pressão de compactação de 50MPa, teor de adesivo de 5% e teor de umidade das fibras de 12%. Os fatores experimentais espessura da placa (8 e 15mm) e temperatura de prensagem (90 e 100°C) foram investigados, conduzindo a um planejamento fatorial completo do tipo 22. Duas réplicas e a aleatorização na preparação e execução dos ensaios foram adotadas. O teor de 5% de adesivo aliado aos demais fatores apresentaram resultados superiores quando comparados aos advindos do documento normativo EMB/IS-2:1995⁽¹⁾, com destaque para as chapas fabricadas com espessura de 8mm e temperatura de 100°C.

Palavras-chave: painéis de média densidade, propriedades mecânicas, planejamento fatorial de experimentos.

MDF panels produced with *Pinus caribaea* and monocomponent polyurethane resin based on castor oil

Abstract: This paper investigates the mechanical properties, such as, the flexural strength modulus, perpendicular strength and superficial strength of medium density fiberboard (MDF) manufactured with *Pinus caribaea* fibres and monocomponent resin derived from castor oil based on the recommendations of EMB/IS-2:1995⁽¹⁾ standard. Panels with dimensions 500 x500mm and density of 0.75g/cm³ were prepared under hot pressing at 50MPa, resin content of 5% and fibre humidity content of 12%. The experimental factors such as the panel thickness (8 and 15mm) and pressing temperature (90 and 100°C) were analyzed using a full factorial design of 22. Two replicates and randomization procedure were conducted not only on the fabrication of the samples but also on the mechanical testings. The resin content of 5% jointed to the other factors provided superior properties when compared to the EMB/IS-

2:1995⁽¹⁾ standard, revealing the thickness of 8 mm and pressing temperature of 100°C the best setup condition.

Keywords: medium density fiberboard, mechanical properties, design of experiments (DOE).

1. Introdução

Painéis de média densidade são de grande empregabilidade nas construções rurais e civis assim como na indústria moveleira, possibilitando o uso de espécies diversificadas incluindo as de pequeno potencial de emprego na construção civil, assim como dos resíduos oriundos do processamento da madeira, contribuindo por minorar os impactos ambientais gerados (Xing *et al.*, (2006)⁽²⁾; Akbulut e Koç (2006)⁽³⁾; Yemele *et al.*, (2008)⁽⁴⁾).

Várias pesquisas vêm sendo desenvolvidas na elaboração de MDF, objetivando-se verificar a viabilidade da elaboração de painéis mediante certos fatores e níveis experimentais estipulados, sendo os adesivos a base de ureia-formaldeído os mais utilizados Uysal (2005)⁽⁵⁾.

Shi *et al.*, (2005)⁽⁶⁾ avaliaram as propriedades de resistências e rigidez de MDF confeccionados com fibras de madeiras de clones de álamo híbrido, que se caracterizam por serem espécies de madeiras duras. Os estudos revelaram que as fibras propiciaram produção de MDF com resistências mecânicas satisfatórias e com boa estabilidade dimensional.

Jun Li *et al.*, (2006)⁽⁷⁾ avaliaram a viabilidade do uso de duas espécies exóticas de madeira larch (*Larixgmelinii* e *Larixsibirica*) como matéria-prima para a fabricação de painéis MDF, sendo investigados as variáveis módulo de elasticidade na flexão (MOE), módulo de ruptura à flexão (MOR) e adesão interna (AI). Os resultados obtidos para as três variáveis indicam ser possível o emprego de ambas as espécies de madeira na fabricação de painéis MDF.

Akgula e Çambelb (2008)⁽⁸⁾ avaliaram a resistência e a rigidez de painéis MDF fabricados com a madeira Rhododendron, encontrada em abundância na região do Mar Negro (Turquia), tendo as partículas sob umidade controlada em 14% e unidas por adesivo a base de ureia-formaldeído. Os resultados obtidos das condições investigadas indicam o emprego da madeira Rhododendron na fabricação de painéis MDF.

Saffian *et al.*, (2011)⁽⁹⁾ estudaram a viabilidade de produção de painéis MDF em clones de seringueira RRIM 2020 com quatro anos de idade, sendo avaliados os módulos de elasticidade (MOE) e de ruptura (MOR). Os resultados encontrados indicaram ser possível a fabricação de painéis MDF com os clones de seringueira avaliados.

Um aspecto a se considerar devido à industrialização de painéis de partículas é a utilização de produtos que poluem o meio ambiente, principalmente por meio da emissão de gases. Nesse sentido, faz-se necessário o desenvolvimento de novos produtos, como é o caso do estudo proposto por Bradi *et al.*, (2006)⁽¹⁰⁾, tendo avaliado a influência da mistura de óleo vegetal em matriz poliuretana na resistência mecânica de painéis de fibras de madeira. As análises realizadas possibilitaram concluir que é possível a utilização de misturas de óleo vegetal em matriz poliuretana na relação de 35:65 (em peso) para confecção de painéis de fibras de madeira.

Dias (2008)⁽¹¹⁾ avaliou propriedades mecânicas de painéis de madeira aglomerada constituídos de resina poliuretana à base de óleo de mamona. Os resultados obtidos para o MOE não alcançaram o valor mínimo de 18 MPa, sendo justificado pela má distribuição do adesivo durante o processo de formação dos painéis.

Fiorelli *et al.*, (2011)⁽¹²⁾ elaboraram painéis de partículas aglomeradas com bagaço de cana e resina poliuretana derivada do óleo de mamona investigando as variáveis resposta: densidade, inchamento, absorção e módulos de elasticidade e de ruptura à flexão. Os resultados indicaram os materiais fabricados como sendo de alta densidade, recomendado

para uso industrial, evidenciando a eficiência da resina poliuretana a base de mamona como adesivo.

Paes *et al.*, (2011)⁽¹³⁾ avaliaram o efeito da combinação da pressão (2,0; 3,0 e 3,5 MPa) e temperatura (50; 60 e 90°C) em painéis de partículas com resíduos de madeira de *Pinus elliottii* e resina poliuretana à base de mamona nas variáveis resposta: densidade, inchamento e absorção de água (0-2h; 2-24h e 0-24h); módulo de elasticidade e de ruptura à flexão, arrancamento de parafuso e ligação interna, concluindo que as combinações: 3,0 MPa e 90°C e 3,5 MPa e 60°C apresentaram os melhores resultados, comprovando ser a temperatura de prensagem a variável mais significativa quanto a qualidade (acabamento) das chapas elaboradas.

Sartori *et al.*, (2012)⁽¹⁴⁾ avaliaram o desempenho mecânico de painéis de madeira de reflorestamento e chapas de partículas de bagaço de cana-de-açúcar com resina poliuretana bicomponente derivada do óleo de mamona como solução alternativa para o sistema de fechamento lateral do tronco coletivo de centro de manejo para bovinos de corte. As propriedades físico-mecânicas obtidas comprovaram a eficiência do modelo estrutural proposto para uso em centro de manejo.

Segundo a Associação Brasileira da Indústria de Painéis de Madeira – ABIPA (2014)⁽¹⁵⁾, o Brasil é um dos países mais avançados do mundo na fabricação de MDF, com o maior número de fábricas de última geração, cuja produção anual em 2012 foi de aproximadamente 3,7 milhões de m³.

Considerando-se os aspectos positivos da atual produção de MDF do Brasil e a necessidade de estudos que possibilitem a utilização de novos adesivos, este trabalho objetivou avaliar as propriedades mecânicas: módulo de resistência à flexão (MOR), resistência à tração perpendicular (TP) e resistência à tração superficial (TS) de painéis MDF produzidos com adesivo poliuretano monocomponente derivado do óleo de mamona e fibras de madeira de *Pinus caribaea*.

2. Materiais e métodos

Os estudos para confecção e avaliação dos painéis MDF fabricados foram realizados junto ao Laboratório de Controle de Qualidade e Desenvolvimento de Produtos da Indústria DURATEX Ltda., de acordo com os procedimentos experimentais propostos pelo documento normativo europeu EuroMDFBoard - EMB/IS-2:1995⁽¹⁾.

Os painéis confeccionados possuem densidade nominal de 0,75g/cm³, espessura nominal de 8 e 15 mm, 5% (base massa seca) de resina poliuretana monocomponente a base de óleo de mamona, pressão de prensagem de 5MPa, temperaturas de prensagem de 90 e 100°C e teor de umidade das fibras de 12%, conduzindo a um planejamento fatorial completo do tipo 22, gerando quatro condições experimentais (CE), assim como explicitado na tab. 1.

Tabela 1 - Condições experimentais investigadas.

CE	Combinação	
	Espessura (mm)	Temperatura (°C)
C1	8	90
C2	8	100
C3	15	90
C4	15	100

No planejamento de experimentos inicial o fator porcentagem de adesivo foi estipulado com dois níveis, sendo de 3 e 5%. Entretanto, em testes iniciais constatou-se que o uso de 3% em massa de adesivo é inadequado para a fabricação dos painéis, considerando-se dessa forma apenas a fração de 5% de adesivo.

Os painéis foram confeccionados com fibras de *Pinus caribaea* (fig. 1c), obtidas por meio de desfibramento termomecânico, segundo as seguintes etapas: (a) definição da massa de

fibra; (b) adição de adesivo poliuretano monocomponente derivado do óleo de mamona às fibras (5% base massa seca) e formação do colchão de fibras (fig. 1a); (c) pré-prensagem a frio do colchão de fibras e posterior prensagem com controle de temperatura e pressão para produção dos painéis MDF (fig. 1b).

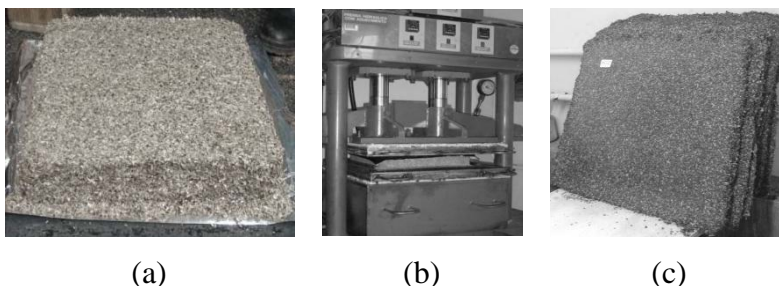


Figura 1 - Fabricação dos painéis sob pressão a quente.

Foram produzidos dois painéis de partículas para cada uma das quatro condições experimentais investigadas, com dimensões de 500x500 mm, dando origem a duas réplicas (R1 e R2).

De cada painel foram extraídos seis corpos de prova de dimensões 400x50 mm para a obtenção do MOR, doze corpos de prova de dimensões 50x50 mm para obtenção da TP e doze corpos de prova de dimensões 50x50 mm para obtenção da TS.

3. Resultados e discussões

Os valores médios das variáveis resposta por réplica (R1 e R2) são apresentados na tab. 2.

Tabela 2 - Valores médios das variáveis respostas para cada condição experimental e respectiva réplica.

CE	MOR-R1 (MPa)	TP-R1 (MPa)	TS-R1 (MPa)	MOR-R2 (MPa)	TP-R2 (MPa)	TS-R2 (MPa)
C1	36,66	1,38	1,54	36,13	1,23	1,60
C2	37,61	1,50	1,76	38,29	1,58	1,70
C3	34,59	0,79	1,36	33,81	0,81	1,43
C4	37,40	0,90	1,61	38,14	0,94	1,56

Da norma EuroMDFBoard - EMB/IS-2:1995⁽¹⁾, os valores estipulados do MOR são de 23 MPa e 20 MPa para espessuras (mm) nos intervalos (6 - 9) e (12 - 19), respectivamente, de 0,55 MPa para TP e de 1,20 MPa para TS, para espessuras entre 6 e 19 mm.

Dos valores apresentados na tab. 2, constata-se que os painéis fabricados nas quatro condições experimentais atendem aos requisitos deste código normativo.

Os desvios padrões e os coeficientes de variação encontrados por réplica para ambas as variáveis resposta variaram nos intervalos (0,08; 4,86) e (0,03; 0,13), respectivamente.

Os P-valores do teste de normalidade de Anderson-Darling variaram entre 0,188 a 0,804, sendo todos superiores a 0,05, comprovando ser normal a distribuição dos dados encontrados (Montgomery, 2005)⁽¹⁶⁾, validando o emprego da análise de variância (ANOVA) utilizada para o tratamento dos dados.

Com relação à espessura, durante o processo de confecção das chapas existe uma dificuldade natural de fluxo (trânsito) da resina no seu interior. Neste sentido, quanto maior o volume de material a ser revestido pela resina, maior a dificuldade de fluxo (trânsito) no interior das chapas, justificando ser o MOR dos painéis com espessura de 8mm superior ao MOR dos painéis de 15 mm.

A tab. 3 apresenta os resultados da ANOVA para as médias das variáveis resposta: MOR, TP e TS, encontrando-se sublinhado os P-valores menores ou iguais a 0,05 (5%), significativos a um nível de confiabilidade de 95% (Montgomery, 2005)⁽¹⁶⁾.

Tabela 3 - P-valores para as variáveis resposta investigadas.

Fatores	<i>MOR</i>	<i>TP</i>	<i>TS</i>
Espessura (8 e 15 mm)	<u>0,026</u>	<u>0,000</u>	<u>0,006</u>
Temperatura (90 e 100°C)	<u>0,002</u>	<u>0,012</u>	<u>0,004</u>
Interação: Espessura x Temperatura	<u>0,043</u>	0,329	<u>0,646</u>

Com relação ao módulo de resistência à flexão, os fatores individuais assim como a interação entre ambos mostraram ser significativos, exibindo P-valores menores que 0,05 (tab. 3).

As figs. 2a e 2b apresentam respectivamente os gráficos de efeitos principais e interações dos fatores investigados sobre o MOR. Nota-se da fig. 2a que o MOR sofre um decréscimo de 3,17% da espessura de 8 mm para a de 15 mm, e que a temperatura de 100°C conferiu aumento de 7,25% em relação aos painéis fabricados com a temperatura de 90°C.

Com relação à interação entre os fatores, a maior diferença do MOR ocorreu para a temperatura de 90°C, apresentando os painéis com espessura de 8mm serem 6,43% superiores aos confeccionados com a espessura de 15mm (fig. 2b).

Constata-se da fig. 2b que os painéis fabricados com a temperatura de 100°C aliada a espessura de 8mm conferiram os maiores valores para o MOR.

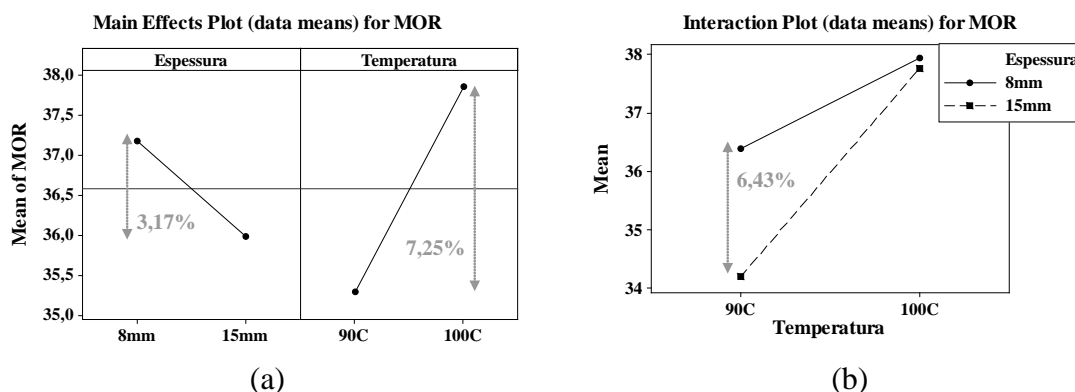


Figura 2 - Gráficos de efeitos principais (a) e de interação (b) para a variável resposta MOR.

Da resistência à tração perpendicular, os fatores individuais mostraram ser significativos, exibindo P-valores menores que 0,05, o mesmo não ocorrendo com a interação entre ambos.

A fig. 3 apresenta o gráfico de efeitos principais dos fatores investigados sobre a TP. Nota-se da fig. 3 que a TP sofre um decréscimo de 38,73% da espessura de 8 mm para a de 15 mm, e a temperatura de 100°C conferiu um aumento de 18,10% em relação aos painéis fabricados com a temperatura de 90°C.

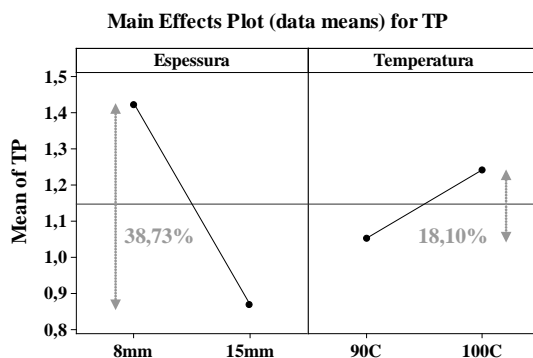


Figura 3 - Gráficos de efeitos principais para a variável resposta resistência a tração perpendicular TP.

Os fatores individuais assim como a interação entre ambos para a resistência à tração superficial mostraram ser significativos, exibindo P-valores menores que 0,05.

As figs. 4a e 4b apresentam, respectivamente, os gráficos de efeitos principais e interações dos fatores.

Nota-se da fig. 4a que a TS sofre um decréscimo de 9,70% da espessura de 8 mm para a de 15 mm, e que a temperatura de 100°C conferiu aumento de 12,16% em relação aos painéis fabricados com a temperatura de 90°C.

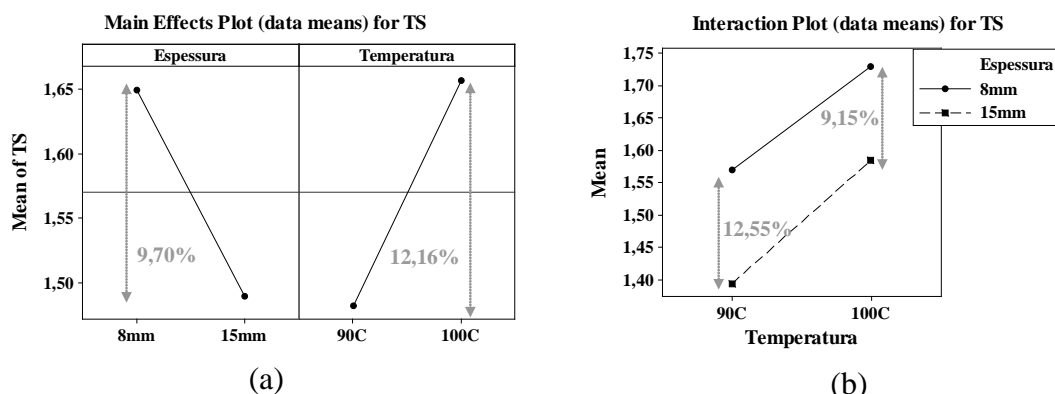


Figura 4 - Gráficos de efeitos principais (a) e de interação (b) para a variável resposta resistência a tração superficial TS.

Com relação à interação entre os fatores, a maior diferença da TS ocorreu para a temperatura de 90°C, apresentando os painéis com espessura de 8mm serem 12,55% superiores aos confeccionados com a espessura de 15mm (fig. 4b).

Constata-se da fig. 4b que os painéis fabricados com a temperatura de 100°C aliada a espessura de 8mm conferiram os maiores valores para a TS.

4. Conclusões

O estudo inicial do emprego da proporção em massa de 3% de resina poliuretana monocomponente revelou ser inadequado na elaboração dos painéis, por ser esta uma proporção de adesivo insuficiente para englobar as partículas de madeira, não garantindo a uniformidade na distribuição dos esforços atuantes.

Os valores do MOR, TS e TP obtidos dos painéis com fibras de madeira de *Pinus caribaea* para as quatro condições experimentais investigadas foram superiores aos estipulados pelo documento normativo EuroMDFBoard - EMB/IS-2:1995⁽¹⁾, evidenciando o potencial dos materiais desenvolvidos.

Dentre as condições experimentais investigadas, os painéis constituídos de 8 mm de espessura juntamente com a temperatura de 100°C conferiram os maiores valores para as propriedades mecânicas.

5. Referências

- (1) EuroMDFBoard.MDF - Medium density fiberboard definition. Test Methods and Requirements. Industry Standard. Part I: Generalities EMB/IS – 1:1995 and Part II: Requirements for General Purpose Boards. EMB/IS - 2:1995.
- (2) Xing, C.; Deng, J.; Zhang, S.Y.; Riedl, B.; Cloutier, A. Impact of bark content on the properties of medium density fiberboard (MDF) in four species grown in eastern Canada. *Forest Products Journal*, v. 56, n. 3, p. 64-69, 2006.
- (3) Akbulut, T.; Koç, E. The effect of the wood species on the roughness of the surface and profiled areas of medium density fiberboard. *Wood Research*, v. 51, n. 2, p. 77-86, 2006.
- (4) Yemele, M.C.N.; Blanchet, P.; Cloutier, A.; Kouba, A. Effects of bark content and particle geometry on the physical and mechanical properties of particleboard made from black spruce and trembling aspen bark. *Forest Products Journal*, v. 58, n. 11, p. 48-56, 2008.
- (5) Uysal, B. Withdrawal strength of various laminated veneer dowels from composite materials. *Wood and Fiber Science*, v. 37, n. 2, p. 213-219, 2005.
- (6) Shi, J.L.; Zhang, S.Y.; Riedl, B.; Brunette, G. Flexural properties, internal bond strength and dimensional stability of medium density fiberboard panels made from hybrid poplar clones. *Wood and Fiber Science*, v. 37, n. 4, p. 629-637, 2005.
- (7) Jun Li, S.; Bernard, R. ; Zhang, S.Y.; Kocaefe, D. Feasibility of using two exotic larch species as raw material for medium density fiber board panel manufacturing. *Forest Products Journal*, v.56, n. 5, p. 48-52, 2006.
- (8) Akgula, M.; Çambelb. O. Manufacture of medium density fiberboard (MDF) panels from rhododendron (*R. ponticum* L.) biomass. *Building and Environment. Part Special: Building Performance Simulation*, v. 43, n. 4, p. 438–443, 2008.
- (9) Saffian, H.A.; Harun, J.; Thair, P.M; Abdar, K. Feasibility of Manufacturing a Medium Density Fibreboard Made of 4-Year Old Rubber Tree RRIM 2020 Clone. *Key Engineering Materials - Composite Science and Technology*, v. 471, p. 839-844, 2011.
- (10) Bradi, K.H.; Amim, K.A.M.; Othman, Z.; Manaf, H.A.; Khalid, N .K. *Effect of filler-to-matrix blending ratio on the mechanical strength of palm-based*. Source: Polymer International 55 (2): p. 190 - 195. Publisher: John Wiley & Sons LDT, The Atrium, Southern Gate, Chichester PO19 8SQ. England. Feb. 2006.
- (11) Dias, F.M. Aplicação de resina poliuretana à base de mamona na fabricação de painéis de madeira aglomerada. Capítulo de Livro: Lahr, F.A.R. Produtos derivados da madeira. São Carlos: EESC/USP, p. 37-160, 2008.
- (12) Fiorelli, J.; Rocco Lahr, F.A.; Nascimento, M.F.; Savastano Jr., H.; Rossignolo, J.A. Painéis de partículas à base de bagaço de cana e resina de mamona – produção e propriedades. *Acta Scientiarum. Technology*, v. 33, n. 4, p. 401-406, 2011.

- (13) Paes, J.B.; Nunes, S.T; Rocco Lahr, F.A.; Nascimento, M.F.; Lacerda, R.M.A. Qualidade de chapas de partículas de pinus elliottii coladas com resina poliuretana sob diferentes combinações de pressão e temperatura. *Ciência Florestal*, v. 21, n. 3, p. 551-558, 2011.
- (14) Sartori, D.L.; Cravo, J.C.M.; Barrero, N.G.; Fiorelli, J.; Savastano Jr., H. Paineis em madeira de reflorestamento e chapas de partículas para instalações rurais. *Floresta e Ambiente*, v. 19, n. 2, p. 171-178, 2012.
- (15) Associação Brasileira da Indústria de Painéis de Madeira – ABIPA. (2014). *Números do setor em 2012*. <http://www.abipa.org.br/numeros.php>. (13 de março).
- (16) Montgomery, D.C. (2005). *Design and analysis of experiments*. 6. ed. Arizona, John Wiley & Sons Inc.