

Painéis MDF produzidos com resina poliuretana à base de óleo de mamona

Medium density fiberboard manufactured with castor oil based polyurethane resin

Sérgio Augusto Mello da Silva^{*}

André Luis Christoforo^{**}

Túlio Hallak Panzera^{***}

Francisco Antonio Rocco Lahr^{****}

Este trabalho objetivou avaliar a viabilidade da produção de painéis MDF fabricados com madeiras das espécies *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* e resinas poliuretanas mono e bicomponente derivadas do óleo de mamona, com base nas recomendações da norma europeia Euro MDF Board (EMB/IS-2:1995). Os painéis desenvolvidos com ambas as resinas foram confeccionados com parâmetros de fabricação distintos, em razão de testes preliminares desenvolvidos. Com exceção da absorção de água após 24 horas dos materiais fabricados com a madeira *Eucalyptus grandis*, todas as demais variáveis resposta atenderam aos requisitos do documento normativo europeu, evidenciando a potencialidade dos materiais fabricados. Entretanto, pelos valores significativamente superiores obtidos das propriedades mecânicas aliados aos excessivos valores da absorção de água, de maneira a contribuir com a possível fabricação dos painéis em escala industrial, novas pesquisas devem ser desenvolvidas, com o objetivo de testar novos valores para os parâmetros de fabricação, que possibilitem a redução dos teores das resinas utilizados.

*This study aimed at evaluating the feasibility of manufacturing MDF panels with *Pinus caribaea* and *Eucalyptus grandis* wood species, and mono and bi-component castor oil based polyurethane resins, according to the Euro MDF Board (EMB/IS-2:1995) standard. With results from preliminary tests, panels developed with both resins were prepared with different parameters of fabrication. Except for values of water absorption after 24 hours by materials made with *Eucalyptus grandis* timber, all other response variables met the requirements of the European standard, which demonstrates the potential of engineered materials. Considering the significantly higher values obtained by the mechanical properties along with excessive amounts of water absorption, contributing to eventual manufacturing of fiberboards on an industrial scale, further research should be developed aiming to test new values for fabrication parameters, which may, in turn, allow for the reduction of the resin contents.*

Palavras-chave: Chapa de fibras. *Pinus caribaea*. *Eucalyptus grandis*.

Key words: Fiberboards. *Pinus caribaea*. *Eucalyptus grandis*.

^{*} Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP), Avenida Brasil, 56, Centro, 15385-000 - Ilha Solteira (SP), Brasil. E-mail: sams@dec.feis.unesp.br.

^{**} Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), Praça Frei Orlando, 170, Centro, 36307-352, São João del-Rei (MG), Brasil. E-mail: alchristoforo@yahoo.com.br.

^{***} Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), Praça Frei Orlando, 170, centro, 36307-352, São João del-Rei (MG), Brasil. E-mail: tuliopanzera@hotmail.com.

^{****} Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP), Avenida Trabalhador São-carlense, 400, 13566-590, São Carlos (SP), Brasil. E-mail: frocco@sc.usp.br

Introdução

Várias pesquisas vêm sendo desenvolvidas na elaboração de MDF no intuito de verificar a viabilidade da elaboração de painéis mediante certos fatores e níveis experimentais estipulados, sendo os adesivos à base de ureia-formaldeído os mais utilizados (UYSAL, 2005).

Krzysik et al. (2001) estudaram a viabilidade de utilização da madeira de *Eucalyptus saligna* como matéria-prima para produção de MDF. Foram confeccionados painéis com densidades variáveis (0,66 - 1,10g/cm³) e três espessuras (6, 13, e 19 mm), utilizando-se 10% de resina ureica e 1,5% de parafina. Os resultados obtidos indicaram ser possível o emprego da espécie de madeira na fabricação de MDF.

Gonçalves et al. (2003) avaliaram propriedades físicas e mecânicas de chapas de madeira aglomerada fabricadas com fibras de madeira *Eucalyptus pellita* e adesivo modificado obtido pela substituição parcial do adesivo ureia-formaldeído (UF) por extratos tânicos de *Mimosa caesalpiniaefolia*, sendo testados três formas de extração e dois níveis de substituição da resina sintética pelo extrato tânico da madeira. Os resultados para o módulo de elasticidade na flexão, módulo de ruptura na flexão, adesão interna e inchamento em espessura apresentaram-se em conformidade com a norma americana CS-236-66, empregada para a avaliação da qualidade das chapas fabricadas.

Shi et al. (2005) avaliaram as propriedades de resistências e rigidez de painéis MDF confeccionados com fibras de álamo (*Populus sp*) e adesivo à base de ureia-formaldeído. Os autores concluíram que as propriedades de resistência à flexão e adesão interna sofreram influência favorável à utilização de fibras de clones de madeira, apresentando relações lineares significativas entre o MOR e o MOE dos painéis.

Jun Li et al. (2006) avaliaram a viabilidade do uso de duas espécies exóticas de madeira larch (*Larix gmelinii* e *Larix sibirica*) como matéria-prima para a fabricação de painéis MDF com o uso do adesivo à base de ureia-formaldeído, sendo investigadas as variáveis: módulo de elasticidade na flexão (MOE), módulo de ruptura na flexão (MOR) e adesão interna (AI). Os resultados obtidos para as três variáveis indicaram ser possível o emprego de ambas as espécies de madeira na fabricação de painéis MDF.

Akgüla e Çamlıbelb (2008) avaliaram a resistência e a rigidez de painéis MDF fabricados com madeira da espécie *Rhododendron ponticum* coladas com adesivo à base de ureia-formaldeído. Os resultados obtidos das propriedades mecânicas indicaram ser possível o emprego da referida madeira na fabricação de painéis MDF.

Saffian et al. (2011) estudaram a viabilidade de produção de painéis MDF com clones de seringueira (*Hevea brasiliensis*) RRIM 2020 com quatro anos de idade. Os resultados encontrados para o módulo de elasticidade e resistência à flexão indicaram ser possível a fabricação de painéis MDF com as madeiras utilizadas.

Um aspecto a se considerar devido à manufatura de painéis de fibras é a utilização de adesivos que apresentam em sua composição o formaldeído, o qual pode ser liberado

mesmo após a cura do painel. Nesse sentido faz-se necessário o desenvolvimento de novos produtos, como é o caso do estudo proposto por Bradi et al. (2006), tendo avaliado a influência da mistura de óleo vegetal em matriz poliuretana na resistência mecânica de painéis de fibra. 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 com qualidade satisfatória. José e Beraldo (2006) também avaliaram o desempenho físico e mecânico de painéis de partículas de bambu com resina poliuretana à base de óleo de mamona. Os resultados obtidos comprovaram a potencialidade para uso industrial dos materiais fabricados.

Campos (2005) avaliou propriedades físicas e mecânicas de painéis de média densidade fabricados com fibras de Pinus e Eucalipto com adição de 8, 10 e 12% de resina à base de ureia-formaldeído (UF), poliuretana (PU) bicomponente derivada de óleo de mamona e resina inorgânica. Os melhores valores obtidos para os módulos de resistência à flexão estática e tração perpendicular dos MDF confeccionados separadamente com fibras de Pinus e Eucalipto foram de 29,4 e 28 MPa e 0,91 e 0,89 MPa, respectivamente, considerando-se a adição de 12% de PU. Essas resistências foram todas superiores às resistências dos MDF comerciais.

Silva et al. (2008) avaliaram a eficiência do emprego de resinas poliuretanas monocomponente e bicomponente derivadas de óleo de mamona na ligação interna (resistência à tração perpendicular) e densidade de chapas de fibras de *Pinus caribaea*, utilizando o manual de procedimentos experimentais propostos pela *EuroMDFBoard-EMB/IS-2:1995*. As chapas foram fabricadas com espessura de 10 mm com 8% de resina poliuretana mono e bicomponente. Os autores concluíram que a adição de 8% de resina poliuretana conferiu boa adesão entre as fibras e resistência à tração perpendicular superiores aos valores mínimos propostos pela norma europeia.

Dias (2008) avaliou propriedades mecânicas de painéis de madeira aglomerada produzidos com resina poliuretana bicomponente à base de óleo de mamona. Apenas para o MOE, os resultados obtidos na pesquisa não alcançaram o valor mínimo exigido pelas normas de comercialização (18 MPa).

Fiorelli et al. (2011) elaboraram painéis de partículas aglomeradas com bagaço de cana e resina poliuretana derivada de óleo de mamona investigando as variáveis resposta: densidade, inchamento, absorção de água e módulo de elasticidade e de ruptura na flexão. Os resultados indicaram que os materiais fabricados apresentaram bom desempenho físico e mecânico.

Paes et al. (2011) avaliaram o efeito da combinação da pressão (2,0; 3,0; 3,5 MPa) e temperatura (50; 60; 90 oC) na produção de painéis de partículas com resíduos de madeira *Pinus elliottii* e resina poliuretana à base de mamona na variáveis resposta: densidade, inchamento e absorção de água (0-2h; 2-24h; e 0-24h); módulo de elasticidade e módulo de ruptura na 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.

Sartori et al. (2012) avaliaram o desempenho físico (inchamento e absorção de água em 2 e em 24 horas) e mecânico (módulo de elasticidade e de resistência à flexão, tração perpendicular e energia ao impacto) de painéis estruturais de madeira de reflorestamento e chapas de partículas de bagaço de cana-de-açúcar produzidas com resina poliuretana bicomponente derivada de óleo de mamona, como solução alternativa para o 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.

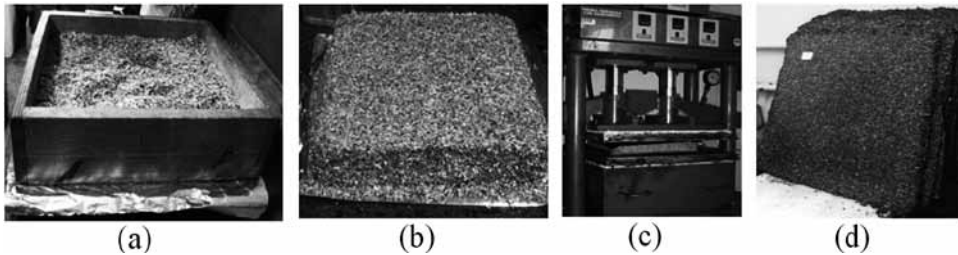
Dentro desse contexto, este trabalho objetivou avaliar a viabilidade da produção de painéis MDF confeccionados com fibras de madeira *Pinus caribaea* e de *Eucalyptus grandis* e diferentes teores de resinas poliuretanas (PU) mono (PUMO) e bicomponente (PUBI) derivadas de óleo de mamona, com base nas recomendações da norma europeia Euro MDF Board EMB/IS-2:1995 (Medium Density Fiberboard Definition).

Materiais e Métodos

Os painéis de fibras de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* foram fabricados com resina PU monocomponente e bicomponente, possuindo dimensões médias de 500 mm de largura por 500 mm de comprimento, com 8 mm de espessura os fabricados com resina poliuretana monocomponente e 10 mm os fabricados com resina poliuretana bicomponente. Com relação à adição das resinas, foram adotados procedimentos distintos em função das características de cada resina. Para o caso da monocomponente, utilizaram-se 5% de resina em função da massa seca das partículas, sendo em seguida adicionadas as partículas. No caso da resina bicomponente, consideraram-se para sua composição a relação de 1 parte de polioliol para 1 parte de pré-polímero, totalizando 8% de resina, em função da massa seca das partículas. A adição da resina nas partículas ocorreu considerando-se primeiramente a introdução do polioliol, e após homogeneização do polioliol às partículas, a adição do pré-polímero.

Os painéis com resina poliuretana PUMO foram fabricados no Laboratório de Desenvolvimento de Produtos e Controle de Qualidade da Indústria DURATEX, e os painéis com resina poliuretana PUBI foram fabricados no Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira (LaMEM), da Universidade de São Paulo (USP). Depois de extraídas as fibras das madeiras de ambas as espécies, a elas foram adicionadas as resinas, e após a mistura mecânica das fases, os compostos foram inseridos em um molde (formador de colchão), sacados destes e levados na prensa hidráulica para formação das chapas (Figura 1).

Figura 1 - Sequência de fabricação das chapas



Os ensaios foram realizados de acordo com o manual de procedimentos experimentais do documento normativo europeu EMB/IS-2:1995. A partir dos valores propostos por essa norma, foi elaborado, por meio de testes iniciais, um conjunto de parâmetros para confecção dos painéis, com objetivo de avaliar o módulo de elasticidade na flexão (MOE), módulo de ruptura na flexão (MOR), adesão interna (AI) e inchamento em espessura e absorção de água após 24 horas.

Os parâmetros adotados na fabricação dos painéis elaborados com o uso das resinas poliuretanas PUMO e PUBI estão apresentados na Tabela 1, adaptados do trabalho de Silva et al. (2008). Cabe chamar a atenção de que os parâmetros de fabricação dos painéis com o uso de ambas as resinas foram distintos (testes iniciais). Dessa forma, as análises estatísticas, realizadas com o auxílio da análise de variância (ANOVA), com 5% de significância, foram efetuadas com o intuito de verificar se as espécies de madeira, para um mesmo tipo de resina, foram significativas ou não nas propriedades físicas e mecânicas investigadas, fazendo-se uso do *software* Minitab[®] versão 16.

Tabela 1 - Parâmetros experimentais estipulados na confecção dos painéis MDF

Parâmetros	PUMO	PUBI
Densidade (g/cm ³)	0,5 a 0,8	
Espessura nominal (mm)	8	10
Fração de resina PU (%)	5	8
Pressão (MPa)	5	4
Teor de Umidade (%)	12	3
Tempo (s)	105	250
Temperatura (°C)	160	160

Para avaliação das propriedades físicas e mecânicas foram fabricados 6 painéis por espécie de madeira, 3 com 5% de resina poliuretana monocomponente e os demais com 8% de resina poliuretana bicomponente, sendo os corpos de prova confeccionados após 72 horas da fabricação dos painéis.

Dos painéis fabricados foram extraídos 24 corpos de prova para cada um dos cinco testes experimentais executados, sendo doze com a madeira *Pinus caribaea* e outros doze com *Eucalyptus grandis*. Os corpos de prova fabricados para avaliação do

MOE e MOR foram preparados nas dimensões de 50×400 mm, e 50×50 mm para os ensaios de adesão interna, densidade, inchamento em espessura e absorção de água após 24 horas (EMB/IS-2:1995).

Resultados e Discussões

As estatísticas descritivas referentes às propriedades físicas investigadas por tratamento são apresentadas na Tabela 2, sendo \bar{x} a média amostral, s o desvio padrão amostral, CV o coeficiente de variação, e_{ap} a média das espessuras aparentes e d_{ap} a média das densidades aparentes.

Tabela 2 - Propriedades físicas dos painéis

CP	Absorção de água após 24h (%)				Inchamento após 24h (%)			
	<i>Pinus</i>		<i>Eucalyptus</i>		<i>Pinus</i>		<i>Eucalyptus</i>	
	PUMO	PUBI	PUMO	PUBI	PUMO	PUBI	PUMO	PUBI
\bar{x}	33,97	34,8	62,40	75,92	11,32	14,42	12,88	15,83
s	3,35	0,16	1,82	6,17	0,40	1,24	0,34	1,70
CV(%)	9,87	0,47	2,92	8,13	3,55	8,60	2,65	10,72
EMB/IS-2:1995	35%				17%			
Espessuras (e_{ap}) e Densidades Aparentes (d_{ap})								
e_{ap} (mm)	8,73	10,9	8,70	11,3	8,73	10,9	8,70	11,3
d_{ap} (g/cm ³)	0,80	0,72	0,80	0,70	0,80	0,72	0,80	0,70
EMB/IS-2:1995	Espessura: 6 a 12mm				Densidade: 0,50 a 0,80g/cm ³			

Os valores de absorção de água após 24 horas dos painéis de *Pinus caribaea* fabricados da condição com 5% de resina PU monocomponente e 8% de resina PU bicomponente foram inferiores ao limite de 35% proposto pela norma EMB/IS-2:1995. Entretanto, nos painéis de *Eucalyptus grandis* fabricados com os mesmos teores de adesivo a absorção de água superou esse limite, sendo os fabricados com resina PUMO e PUBI 78,29% e 116,91% superiores ao valor de referência da norma. Ressalta-se que os valores estipulados da norma europeia são referentes a compostos fabricados com o uso de resinas à base de ureia-formaldeído, sendo diferentes dos adesivos utilizados no presente trabalho, e que a diferença percentual da absorção de água após 24 horas entre os tipos de adesivo se justifica pela não inclusão de solventes na resina PUBI, assim como discutido no trabalho de Silva et al. (2008).

Ressalta-se que a resina poliuretana bicomponente apresentou 66% de sólidos, pH entre 8 e 9 e massa específica média de 1,29g/cm³. Para o processo de cura fez-se necessária a utilização de um catalisador à base de cloreto de sódio comercial, com teor de sólidos de 20% na dosagem de 2,5% de sólidos de catalisador em relação ao teor de sólidos do PU, classificada como não tóxicas (CARLO, 2002).

Com relação ao inchamento após 24 horas, observa-se na Tabela 2 que todos os

valores foram inferiores ao limite de 17% do proposto pela norma EMB/IS-2:1995, evidenciando que as resinas poliuretanas e os distintos parâmetros de fabricação (Tabela 1) conferiram aos painéis características adequadas quanto a essa propriedade.

De acordo com os parâmetros experimentais propostos na Tabela 1, para confecção dos painéis com as resinas poliuretanas, observa-se que as densidades e espessuras aparentes estão dentro dos limites propostos pela norma europeia, assim como encontrado nos trabalhos de Dias (2008) e Fiorelli et al. (2011).

A Tabela 3 apresenta os P-valores e os respectivos coeficientes de determinação ajustados (R^2 (Adj.)) da ANOVA do fator espécie de madeira por tipo de adesivo sobre as propriedades físicas dos compostos fabricados. Ressalta-se que P-valores inferiores a 0,05 (5%) são considerados significativos (MONTGOMERY, 2005), estando sublinhados na Tabela 3. Coeficientes de determinação R^2 (Adj.) cada vez mais próximos de 100% implicam processos de fabricação mais homogêneos.

Tabela 3 - Resultados da ANOVA do fator espécie de madeira sobre as propriedades físicas dos compostos

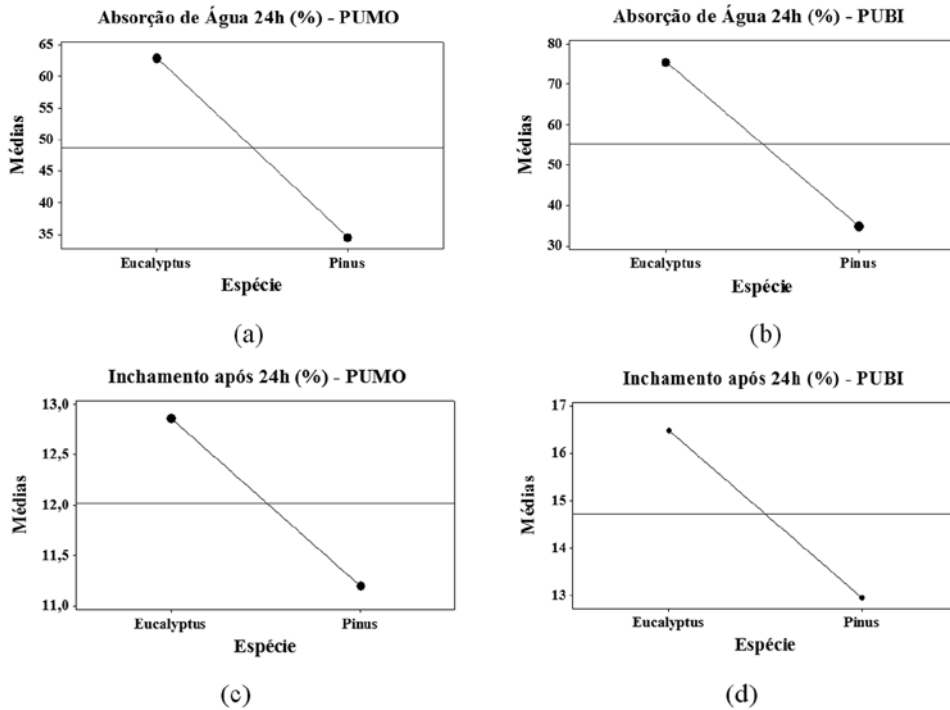
PUMO		
Resposta	P-valor	R^2 (Adj.)
<i>Abs. 24h</i>	<u>0,000</u>	85,21%
PUBI		
<i>Abs. 24h</i>	<u>0,000</u>	81,74%
PUMO		
Resposta	P-valor	R^2 (Adj.)
<i>Inc. 24h</i>	<u>0,000</u>	88,02%
PUBI		
<i>Inc. 24h</i>	<u>0,000</u>	73,92%

Da Tabela 3 nota-se que os P-valores da ANOVA foram inferiores a 5% em todos os casos, implicando ser significativo o uso das espécies de madeira na obtenção das propriedades físicas, e que os coeficientes de determinação R^2 (Adj.) foram superiores a 70%, implicando a boa homogeneidade obtida na fabricação dos materiais (MISSAGIA et al., 2012).

Os requisitos para validação do modelo da ANOVA por variável resposta investigada foram todos atendidos. A normalidade dos resíduos, independência e homogeneidade foram verificados respectivamente com o auxílio do teste de normalidade de Anderson-Darlig, do gráfico de resíduos *versus* ordem de observação e do gráfico de resíduos *versus* valores ajustado.

A Figura 2 ilustra os gráficos de efeitos principais do fator espécie de madeira sobre as propriedades físicas de interesse.

Figura 2 - Gráficos de efeitos principais da ANOVA do fator espécie de madeira sobre as propriedades físicas materiais



Como o fator espécie de madeira está associado a dois níveis (*Pinus* e *Eucalyptus*), acusada a significância pela ANOVA, os maiores valores das propriedades físicas estão associados diretamente aos maiores valores médios, não sendo necessário o emprego do teste de agrupamento por Tukey (três ou mais níveis do fator), revelando ser o *Pinus caribaea* a espécie de madeira que forneceu os menores valores da absorção de água após 24 horas e do inchamento após 24 horas.

As Tabelas 4 e 5 apresentam os resultados dos testes de flexão e de adesão interna respectivamente dos compostos fabricados, sendo P e E as madeiras das espécies *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis*, enquanto M e B são os tratamentos com 5% de resina PUMO e 8% de resina PUBI respectivamente.

Tabela 4 - Resultados dos ensaios de flexão

	MOE (MPa)				MOR (MPa)			
	P		E		P		E	
	M	B	M	B	M	B	M	B
\bar{x}	3066	2479	3591	2461	38,24	25,26	39,98	23,23
s	164,41	5,48	149,89	15,10	2,19	0,50	2,16	0,19
CV(%)	5,37	0,227	4,177	0,61	5,71	1,97	5,40	0,83
EMB/IS-2:1995	2700 MPa				23 MPa			
Espessuras (e_{ap}) e Densidades Aparentes (d_{ap})								
e_{ap} (mm)	8,73	10,90	8,70	11,30	8,73	10,90	8,70	11,30
d_{ap} (g/cm ³)	0,80	0,72	0,80	0,70	0,80	0,72	0,80	0,70
EMB/IS-2:1995	Espessura: 6 a 12mm				Densidade: 0,50 a 0,80g/cm ³			

Tabela 5 - Resultados dos ensaios de adesão interna

CP	AI (MPa)			
	P		E	
	M	B	M	B
\bar{x}	1,42	0,76	1,16	0,74
s	0,12	0,06	0,07	0,04
CV(%)	8,71	8,13	6,00	5,08
EMB/IS-2:1995	0,55 MPa			
Espessuras (e_{ap}) e Densidades Aparentes (d_{ap})				
e_{ap} (mm)	8,73	10,90	8,70	11,30
d_{ap} (g/cm ³)	0,80	0,72	0,80	0,70

Na Tabela 4, as médias dos valores do MOE dos painéis elaborados com 8% de resina PU bicomponente juntamente com os respectivos parâmetros de fabricação para ambas as espécies de madeira (Tabela 1) foram inferiores a 2700 MPa, valor mínimo proposto pela norma EMB/IS-2:1995, entretanto, sendo em média apenas 8,85%. Da resina poliuretana monocomponente e respectivos parâmetros de fabricação, os materiais fabricados com madeira de *Eucalyptus grandis* apresentaram os maiores valores do módulo de elasticidade, 33% superiores ao valor estipulado pela norma e 17,12% superiores aos materiais fabricados com *Pinus caribaea*.

Os menores valores do módulo de ruptura na flexão foram provenientes dos materiais fabricados na condição com 8% de resina PUBI, apresentando serem os confeccionados com *Pinus* e *Eucalyptus* 9,70% e 1% superiores ao valor de referência estabelecido pela norma europeia, e os maiores valores do MOR foram provenientes dos materiais fabricados da condição com 5% de resina PUMO, sendo os materiais elaborados com *Pinus* e *Eucalyptus* de 66,26% e 73,82% superiores ao valor de referência da norma.

Assim como no módulo de elasticidade e de resistência na flexão, os menores valores da adesão interna foram provenientes dos materiais fabricados da condição com 8% de resina PUBI, apresentando serem os confeccionados com *Pinus* e *Eucalyptus* 38,11% e 34,55% superiores ao valor de referência estabelecido pela norma europeia, e os maiores valores da AI foram provenientes dos materiais elaborados da condição com 5% de resina PUMO, sendo os materiais elaborados com *Pinus* e *Eucalyptus* de 158,18% e 110,91% superiores ao valor de referência da norma.

A Tabela 6 apresenta os P-valores e os respectivos coeficientes de determinação ajustados (R^2 (Adj.)) da ANOVA do fator espécie de madeira por tipo de adesivo sobre as propriedades mecânicas dos compostos elaborados, estando sublinhados os P-valores inferiores a 5% (significativos).

Tabela 6 - Resultados da ANOVA do fator espécie de madeira sobre as propriedades mecânicas dos compostos

PUMO		
Resposta	P-valor	R ² (Adj.)
MOE	0,000	82,13%
PUBI		
MOE	0,251	78,34%
PUMO		
Resposta	P-valor	R ² (Adj.)
MOR	0,184	84%
PUBI		
MOR	0,159	72%
PUMO		
Resposta	P-valor	R ² (Adj.)
AI	0,000	76%
PUBI		
AI	0,421	73,92%

Da Tabela 6, nota-se que as espécies de madeira foram significativas apenas nas propriedades MOE e adesão interna para os materiais fabricados com resina poliuretana monocomponente, sendo equivalentes nas demais propriedades. As Figuras 3 e 4 ilustram os gráficos de efeitos principais do fator espécie de madeira sobre o módulo de elasticidade na flexão e adesão interna respectivamente.

Figura 3 - Gráficos de Efeitos principais da ANOVA do fator espécie de madeira sobre o MOE dos compostos

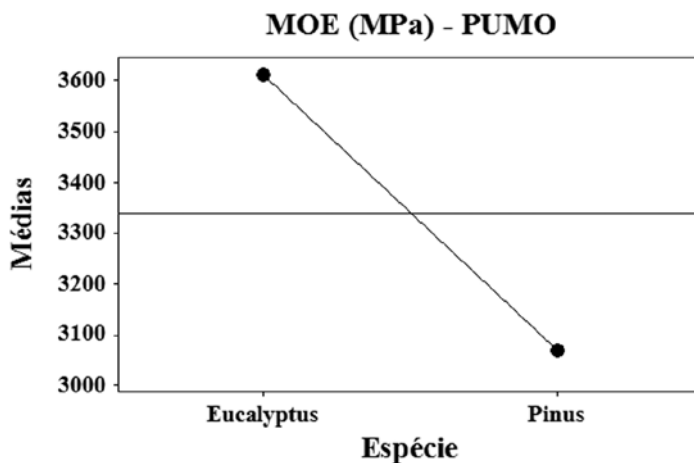
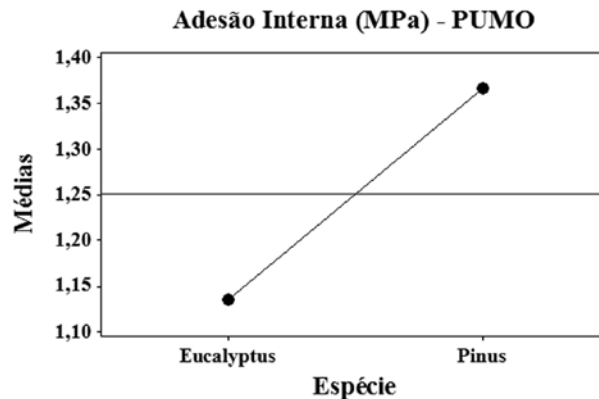


Figura 4 - Gráficos de Efeitos principais da ANOVA do fator espécie de madeira sobre a adesão interna dos compostos



Os resultados da ANOVA sobre a resina PUMO revelaram que a espécie de madeira *Eucalyptus grandis* apresentou melhores valores de MOE do que os compostos feitos com madeira *Pinus caribaea*, apresentando comportamento inverso para o módulo de resistência à flexão. Para as demais respostas por tipo de resina, o uso da espécie de madeira mostrou ser não significativo.

Conclusões

Os painéis fabricados das condições com 8% de resina poliuretana bicomponente e 5% de resina poliuretana monocomponente apresentaram propriedades físicas compatíveis com os valores de referência estipulados pela norma europeia EMB/IS-2:1995, exceto para a absorção de água após 24 horas dos materiais confeccionados com os dois tipos de adesivo e madeira *Eucalyptus grandis*, que apresentaram valores superiores ao limite estabelecido pela norma.

Com exceção do módulo de elasticidade na flexão dos materiais fabricados com a resina poliuretana bicomponente, as demais propriedades mecânicas para ambas as condições experimentais apresentaram valores superiores aos de referência estabelecidos pela norma europeia, conferindo à adesão interna as maiores diferenças em relação ao valor limite estipulado pela norma, seguida de resistência à flexão.

Pela análise de variância, constatou-se por tipo de resina que os melhores valores das propriedades físicas foram provenientes dos materiais feitos com as madeiras da espécie *Pinus caribaea*, e que nas propriedades mecânicas, as espécies forneceram resultados diferentes apenas para os materiais feitos com resina poliuretana monocomponente, apresentando os compostos feitos com *Eucalyptus grandis* os melhores valores do módulo de elasticidade na flexão, e com o *Pinus caribaea*, os melhores valores do módulo de resistência na flexão.

Mesmo sendo diferentes os parâmetros de processo associados às resinas poliuretanas, impossibilitando eleger o melhor tipo de adesivo, em linhas gerais,

o respectivo conjunto de parâmetros de fabricação dos painéis associados à resina poliuretana monocomponente com *Pinus caribaea* conduziu aos melhores resultados das propriedades físicas e mecânicas investigadas.

Mesmo sendo satisfatórios os resultados obtidos para as propriedades físicas e mecânicas investigadas, pelos elevados valores na absorção de água após 24 horas dos painéis fabricados com madeira *Eucalyptus grandis* associado aos grandes valores das propriedades mecânicas, novas composições para as misturas devem ser investigadas com o objetivo da redução das frações de resina nos materiais, contribuindo por incentivar a produção de painéis MDF com o uso das madeiras *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* e da resina poliuretana derivada de mamona.

Referências

- AKGÜLA, M.; ÇAMLIBELB, 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.
- BRADI, K. H.; AMIM, K.; 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*, Publisher: John Wiley & Sons LDT, v.55, n.2, p.190- 95, 2006.
- CAMPOS, C. I. *Propriedades físico-mecânicas de MDF produzido com fibras de madeira de reflorestamento e adesivos alternativos em diferentes teores*. São Carlos-SP, 2005, 113 p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, 2005.
- CARLO, E. *Desenvolvimento e caracterização de um poliuretano monocomponente baseado em óleo vegetal curado ao ar*. São Carlos-SP, 2002, 282 p. Dissertação (Mestrado em Química) - Instituto de Química de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2002.
- DIAS, F. M. Aplicação de resina poliuretana à base de mamona na fabricação de painéis de madeira aglomerada. In: LAHR, F. A. R. *Produtos derivados da madeira*. São Carlos: EESC/USP, 2008. p.37-160
- EURO MDF BOARD - Medium density fiberboard definitions. Test Methods and Requirements. Industry Standard. Part I: Generalities. EMB/IS – 1:1995.
- EURO MDF BOARD - Medium density fiberboard definitions. Test Methods and Requirements. Industry Standard. Part II: Requirements for General Purpose Boards. EMB/IS – 2:1995.
- 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*, p. 401-406, 2011.
- GONÇALVES, C. A., LELIS, R. C. C; BRITO, E. O.; NASCIMENTO, A. M. Produção de chapas de madeira aglomerada com adesivo uréia-formaldeído modificado com tanino de mimosa caesalpiniaefolia bentham (sabiá). *Floresta e Ambiente*, v.10, n.1, p. 18-26, 2003.

JOSÉ, F. J.; BERALDO, A. L. Chapas prensadas de partículas de bambu e adesivo poliuretana à base de óleo de mamona. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 10., 2006, São Pedro. São Paulo. v. 1, p.1-11. *Anais...*

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.

KRZYSIK, A. M.; MUEHL, J. H.; YOUNGQUIST, J. A.; SPINA FRANCA, F. Medium density fiberboard made from Eucalyptus saligna. *Forest Products Journal*, v.51, n.10, p.47-50, 2001.

MISSAGIA, Z. M. V.; SANTOS, J. C.; CHRISTOFORO, A. L.; PANZERA, T. H.; SILVA, V. R. V. Compressive Behaviour of Polimeric Composites Reinforced with Sawdust. In: FIRST BRAZILIAN CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIAL ANNALS, 2012, Belo Horizonte.

MONTGOMERY, D. C. *Design and analysis of experiments*. 6th. ed. Arizona: John Wiley & Sons Inc., 2005.

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*, Santa Maria, v.21, n.3, p.551-558, 2011.

SAFFIAN, H. A.; HARUN, J., THAIR, P. M.; ABDAR, K. Feasibility of manufacturing medium density fiberboard made of 4-year old rubber tree RRIM 2020 clone. *Key Engineering Materials - Composite Science and Technology*, v.471, n.4, p.839-844, 2011.

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.

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.

SILVA, S. A. M.; GONÇALVES, R.; CAMPOS, C. I.; ROCCO LAHR, F. A. Avaliação da resistência à tração perpendicular e da densidade de chapas de fibras de média densidade confeccionadas com resina poliuretana monocomponente e bicomponente derivada de óleo de mamona. *Revista Minerva - Pesquisa e Tecnologia*, n.5, v.3, p. 235-240, 2008.

UYSAL, B. Withdrawal strength of various laminated veneer dowels from composite materials. *Wood and Fiber Science*, v.37, n.2, p.213-219, 2005.

Artigo recebido em: 4 dez. 2012

Aceito para publicação em: 20 mar. 2013