III CBCTEM
Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira
Florianópolis - 2017

PAINÉIS DE PARTÍCULAS PRODUZIDOS COM RESÍDUOS AGRÍCOLA E FLORESTAL

Luciano Donizeti Varanda[1]
Fabio M Yamaji[1]
Luis Ricardo Oliveira Santos[1]
Sophia Lourenço Vasconcelos[1]
André Luis Christoforo[2]
Francisco Antonio Rocco Lahr[3]

[1] Departamento de Ciências Ambientais, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, Brasil
[2] Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil
[3] Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo

PAINÉIS DE PARTÍCULAS PRODUZIDOS COM RESÍDUOS AGRÍCOLA E FLORESTAL

Resumo: Os painéis à base de madeira vêm sendo amplamente utilizados em todo o mundo, em diversos segmentos da indústria madeireira, como em móveis, painéis, estruturas e outros componentes na construção civil. O grande volume de resíduos gerados pela agroindústria viabiliza o desenvolvimento de materiais alternativos e sustentáveis, destacando-se os painéis de partículas. O objetivo deste trabalho é produzir painéis de partículas homogêneos de alta densidade, com resíduos de madeira de *Pinus elliottii* e casca de aveia (*Avena sativa*), aderidos sob pressão com dois tipos de adesivo, poliuretano à base de óleo de mamona e melamina formaldeído, e avaliar o desempenho físico e mecânico destes painéis. O desempenho físico-mecânico dos painéis foi avaliado com base nas normas ABNT NBR 14810 (2006 e 2013). Os resultados apontaram propriedades físicas e mecânicas dos painéis, em alguns tratamentos superiores aos requisitos estipulados por normas consultadas. Conclui-se que os painéis produzidos com o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona apresentaram melhor desempenho físico e mecânico.

Palavras-chave: painéis aglomerados, *Pinus elliottii*, casca de aveia, propriedades físicas e mecânicas.

PARTICLEBOARDS PRODUCED WITH AGRICULTURAL AND FOREST WASTES

Abstract: Wood-based panels have been widely used throughout the world in various segments of the timber industry, such as furniture, panels, structures and other components in construction. The large volume of waste generated by the agro-industry enables the development of alternative and sustainable materials, particularly particle board. The aim of this paper is to produce homogeneous panels of high density with wood residues of *Pinus elliottii* and oats hulls (*Avena sativa*), adhered under pressure with two types of adhesive, polyurethane based on castor oil and melamine formaldehyde, and evaluate the physical and mechanical performance of these panels. The physical-mechanical performance of the panels was evaluated based on the ABNT NBR 14810 (2006 and 2013) standards. The results indicated physical and mechanical properties of the panels, in some treatments superior to the requirements stipulated by standards consulted. It was concluded that the panels produced with the polyurethane adhesive based on castor oil showed better physical and mechanical performance.

Keywords: agglomerated panels, *Pinus elliottii*, oat hulls, physical and mechanical properties.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento e caracterização de novos materiais vêm sendo constantemente abordados, no que diz respeito às necessidades impostas pelo mercado, como materiais

mais eficientes, redução de custos com energia, maior versatilidade, redução na geração de resíduos, menores impactos ambientais e produtos menos impactantes ao planeta (SILVA et al., 2015).

A vantagem dos produtos derivados da madeira diz respeito ao aprimoramento das propriedades da madeira maciça, juntamente com a possibilidade de utilização de matérias-primas alternativas em sua fabricação. A utilização de produtos à base de madeira tem crescido muito nos últimos anos, no Brasil e no mundo. Os painéis de partículas merecem destaque no cenário dos produtos derivados da madeira, por ser a principal matéria-prima de uma gama de indústrias de outros setores madeireiros, como indústrias de pisos, de móveis, de embalagens, indústria naval e de diversos segmentos da construção civil (VARANDA, 2016).

Os painéis aglomerados caracterizam-se pela conversão da madeira em partículas, que após secas e misturadas a um adesivo sintético termofixo e distribuídas aleatoriamente entre si (matriz randômica), são conformadas a partir dos efeitos de temperatura e pressão, gerando um painel (MOSLEMI, 1974; PEDRESCHI, 2009; TSOUMIS, 1991).

As vantagens tecnológicas dos painéis aglomerados são atribuídas tanto à redução da heterogeneidade estrutural quanto à possibilidade de utilização, sem restrições em relação à forma, se comparados com a madeira maciça (ROWELL et al., 2000).

A expansão das indústrias de painéis à base de madeira aumenta notadamente a demanda por matéria-prima, forçando a busca por outros materiais. Uma alternativa encontrada é o aproveitamento de materiais lignocelulósicos residuais provenientes de florestais plantadas e da agroindústria (OLIVEIRA, 2010).

Em 2014, o Brasil produziu cerca de 17,2 milhões de metros cúbicos de resíduos à base de madeira. Neste mesmo ano, a produção brasileira de painéis aglomerados foi de aproximadamente 3,4 milhões de metros cúbicos (FAO, 2015). Os resíduos sólidos provenientes da agroindústria quando associados à disposição inadequada, além de ocorrer perda de nutrientes e de biomassa, aumenta o potencial poluidor desses materiais. Portanto, utilizações mais adequadas, que agregam maior valor a estes resíduos, podem minimizar problemas ambientais, além de gerar empregos e renda.

Dentre esses resíduos agroindustriais, a casca gerada no processo de beneficiamento do cereal aveia apresenta grande potencial, especialmente em relação à quantidade de matéria-prima que, segundo Webster (1986), representa cerca de 30% da massa do referido cereal. De acordo com o que aponta o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017), a produção brasileira de aveia foi de aproximadamente 884 mil toneladas em 2016, ou seja, foram geradas aproximadamente 265 mil toneladas de casca de aveia. O Estado do Rio Grande do Sul é o maior produtor de aveia do país, sendo responsável por 74% da referida safra.

Neste contexto, faz-se necessário e urgente o estudo de insumos alternativos na produção de painéis de partículas. O objetivo deste estudo foi produzir painéis de partículas homogêneos de alta densidade, com resíduos de madeira de *Pinus elliottii* e casca de aveia (*Avena sativa*), aderidos sob pressão com dois tipos de adesivo, poliuretano à base de óleo de mamona e melamina formaldeído, e avaliar o desempenho físico e mecânico destes painéis.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material

Este estudo foi desenvolvido na Universidade de São Paulo (USP), Campus de São Carlos, especificamente no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM), pertencente ao Departamento de Engenharia de Estruturas (SET) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC).

Na confecção dos painéis de partículas foram utilizados resíduos de madeira de

Pinus elliottii e resíduos de casca de aveia (*Avena sativa*). A madeira de *Pinus elliottii* apresentou densidade aparente de 480 kg/m^3 (ALMEIDA, 2014), segundo a norma ABNT NBR 7190:1997. O material casca de aveia apresentou densidade aparente de 290 kg/m^3, segundo dados fornecidos pela empresa do setor que disponibilizou o material para este estudo.

Os resíduos de madeira de *Pinus elliottii* foram obtidos na cidade de São Carlos, estado de São Paulo. A casca de aveia empregada foi obtida de uma indústria do setor, localizada na cidade de Porto Alegre, estado do Rio Grande do Sul.

Para estabelecer a adesão entre as partículas, foram utilizados dois tipos de adesivos: poliuretano à base de óleo de mamona e melamina formaldeído.

Foi adotado o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona devido ao seu bom desempenho obtido em estudos anteriores, desenvolvidos no LaMEM/SET, com painéis de madeira (BERTOLINI et al., 2014; DIAS, 2005; NASCIMENTO, 2003), além de ser um adesivo de procedência majoritariamente natural e renovável. O adesivo poliuretano à base de óleo de mamona utilizado é do tipo bicomponente, na proporção 1:1 entre pré-polímero e poliol, com teor de sólidos de 100%. Um dos componentes (poliol) é derivado de óleo vegetal, com densidade de 1,10 g/cm^3 e o outro componente (pré-polímero) é o isocianato polifuncional, com densidade de 1,24 g/cm^3.

Foi utilizado o adesivo melamina formaldeído por este ser largamente empregado em indústrias de painéis à base de madeira no Brasil, apesar de seu uso ser controlado e questionável em países com rigoroso controle ambiental pelo fato deste emitir formaldeído, substância indesejável e prejudicial à saúde humana (PETERSON, 1964; SAMLAIC, 1983). O adesivo melamina formaldeído (MF) utilizado apresenta as seguintes características físico-químicas: pH a 25ºC de 8,48; teor de sólidos 3H a 105ºC de 71,28%; densidade a 25ºC de 1,26g/cm^3; viscosidade Brookfield a 25ºC de 756 centipoises e formol livre igual a 0,19%.

O adesivo melamina formaldeído (MF) teve adição de 1,5% de sulfato de amônia, em relação à massa do adesivo. O sulfato de amônia tem a função catalisadora, isto é, acelerar o processo de cura do adesivo. Optou-se por não utilizar a parafina devido ao adesivo MF apresentar boa resistência a umidade.

2.2 Delineamento experimental

A partir dos ensaios preliminares foi definido o delineamento experimental adotado. Originou vinte tratamentos (Tr), como mostra a Tabela 1.

Para cada um dos vinte tratamentos (Tr) foram produzidos cinco painéis de partículas idênticos (VARANDA, 2016), totalizando 100 painéis de partículas. Os painéis produzidos possuem dimensões nominais de 280 x 280 x 10 milímetros.

Tabela 1. Delineamento experimental adotado

Tratamentos (Tr)	%CA	%Ades.	TA
Tr1	0	11	MF
Tr2	0	11	PU
Tr3	0	13	MF
Tr4	0	13	PU
Tr5	25	11	MF
Tr6	25	11	PU
Tr7	25	13	MF
Tr8	25	13	PU
Tr9	50	11	MF
Tr10	50	11	PU
Tr11	50	13	MF

Tr12	50	13	PU
Tr13	75	11	MF
Tr14	75	11	PU
Tr15	75	13	MF
Tr16	75	13	PU
Tr17	100	11	MF
Tr18	100	11	PU
Tr19	100	13	MF
Tr20	100	13	PU

onde: Tr = tratamento; %CA = percentual de casca de aveia; %Ades. = percentual de adesivo; TA = tipo de adesivo; MF = adesivo melamina formaldeído e PU = adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.

2.3 Produção dos painéis em laboratório

As partículas de ambos os materiais foram geradas em um moinho de facas do tipo Willye, da marca Marconi, modelo MA 680, utilizando-se peneira de 2,8 milímetros de abertura para obtenção das partículas.

Após a geração das partículas, foi determinado o teor de umidade destas em estufa, à temperatura de 105±2ºC.

A próxima etapa foi a preparação e aplicação da resina, onde as partículas de *Pinus elliottii* e de casca de aveia geradas, juntamente com o adesivo utilizado, foram pesados nas quantidades estipuladas e adicionados na encoladeira, para mistura e homogeneização do adesivo com as partículas. As proporções de adesivo utilizadas foram 11 e 13% em relação à massa das partículas. A quantidade de partículas utilizadas em cada painel foi definida a partir da faixa de densidade (de 850 a 950 kg/m^3) e do volume adotado para os painéis (dimensões nominais de 280 x 280 x 10 milímetros). As partículas e o adesivo ficaram na encoladeira por cinco minutos, no mínimo. A encoladeira utilizada é da marca Lieme, modelo BP-12 SL (Figura 1a).

Após a completa homogeneização do adesivo com as partículas, a mistura foi submetida à pré-prensagem (Figura 1b), para formação do “colchão” de partículas. Este recebeu uma força de 1 kN, equivalente a uma pressão de 0,013 MPa. A pré-prensagem do painel foi realizada por prensa mecânica manual, de fabricação própria.

Em seguida, o “colchão” de partículas (já pré-conformado) com espessura na faixa de 2 a 3 centímetros (Figura 1c) seguiu para a prensa. A prensagem dos painéis foi realizada em prensa semiautomática da marca Marconi, modelo MA 098/50 (Figura 1d), com capacidade de 800 kN e temperatura máxima de 200ºC.

As condições de prensagem empregadas neste estudo foram: tempo de dez minutos, pressão de 4 MPa e temperaturas de 100ºC para o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona e 160ºC para o adesivo melamina formaldeído. Após a prensagem, todos os painéis produzidos ficaram acondicionados por 72 horas, no mínimo, objetivando a estabilização e a cura completa do adesivo.

Após o período de acondicionamento, os painéis foram submetidos ao esquadrejamento e posterior seccionamento para retirada dos corpos de prova. Inicialmente foi retirado cerca de 10 milímetros de cada extremidade do painel, em uma serra circular esquadrejadeira. Os painéis passaram a ter dimensões nominais de 260 x 260 x 10 milímetros (Figura 1e). A partir do esquadrejamento, os painéis foram seccionados nas dimensões dos corpos de prova. Para o esquadrejamento e seccionamento dos painéis foi utilizada uma serra circular esquadrejadeira da marca Invicta, modelo SCI-160.

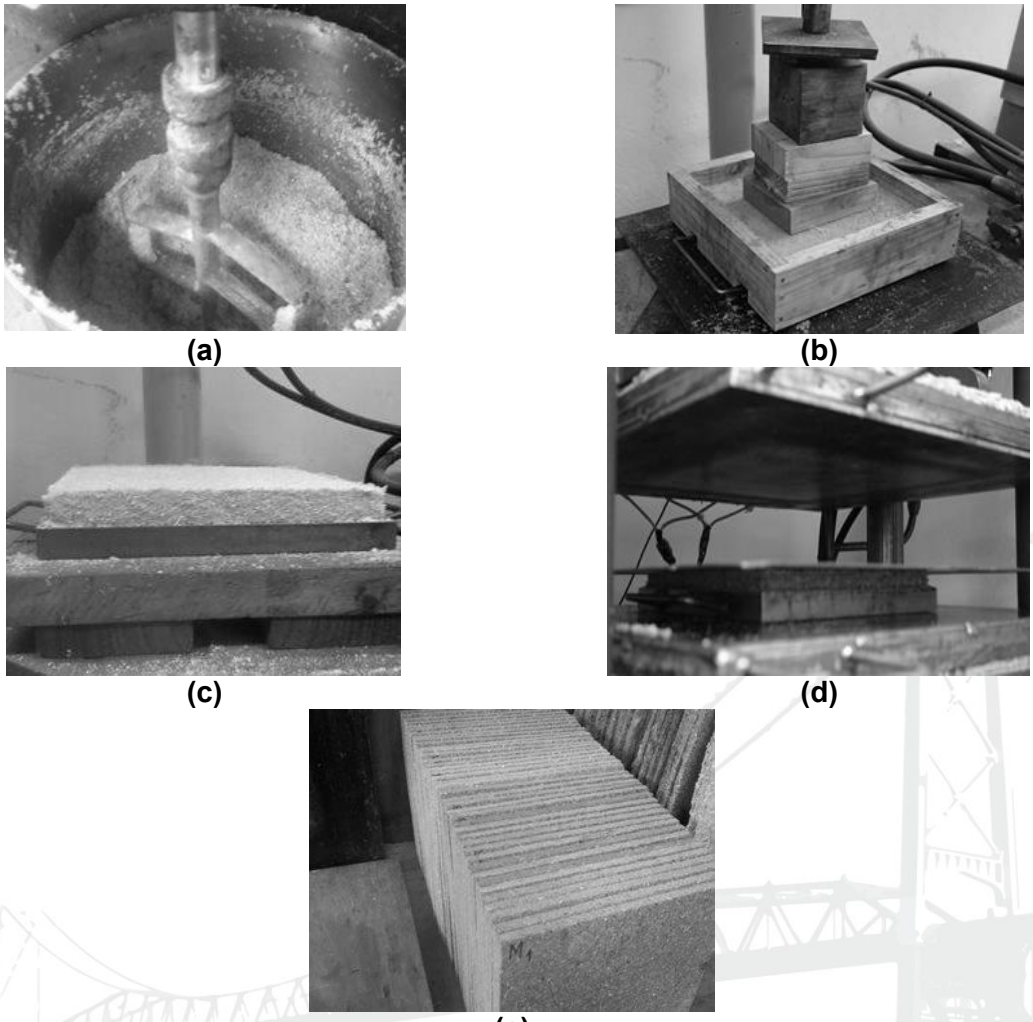

Figura 1 - Misturador das partículas com o adesivo (a), pré-prensagem (b), “colchão” de partículas pré-conformado (c); painel sendo prensado (d) e painéis esquadrejados (e).

Toda a caracterização físico-mecânica dos painéis produzidos foi realizada de acordo com as normas ABNT NBR 14810:2006 e ABNT NBR 14810:2013. Este estudo iniciou-se no final de 2012 e a nova versão da norma ABNT NBR 14810 foi publicada em dezembro de 2013 e com validade a partir de janeiro de 2014. Nesse período, parte dos ensaios físicos foi realizada seguindo a norma em vigor na época, ou seja, a ABNT NBR 14810:2006.

De cada painel foi retirado um corpo de prova para cada uma das propriedades físicas e mecânicas avaliadas, exceto para a propriedade física teor de umidade (TU). Para esta foi retirado um corpo de prova para cada um dos dez painéis selecionados aleatoriamente, dentre os 100 painéis produzidos, apenas para verificar o TU médio dos painéis avaliados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos para as propriedades físicas e mecânicas dos painéis foram comparados com os requisitos estabelecidos pelas normas ABNT NBR 14810:2006, ABNT NBR 14810:2013, ANSI A208.1:1999 e BS EN 312:2003.

O teor de umidade médio dos painéis avaliados foi de 9,2%, com coeficiente de variação de 4,8%. Os painéis aglomerados produzidos por Weber e Iwakiri (2015)

apresentaram teor de umidade na faixa de 7,3 a 9,0%, isto é, semelhante ao teor de umidade médio dos painéis deste estudo.

Segundo Silva et al. (2006), após a produção (reconstituição da madeira), ocorre redução da umidade de equilíbrio dos painéis, se comparado à madeira sólida. Tal redução (ou diminuição da higroscopicidade) se deve à fragmentação da madeira em partículas e a posterior incorporação de adesivos, parafinas e outros aditivos, e, especialmente pela aplicação de altas temperaturas e pressões durante a prensagem e consolidação do painel (JANKOVSKI, 1988), fase em que, segundo Mendes (2001) ocorre o rearranjo e a diminuição das regiões higroscópicas da madeira.

Na Tabela 2 são apresentados os valores médios ($\bar{x}$) e os coeficientes de variação (Cv) das propriedades físicas e mecânicas dos painéis. Como pode ser observado na Tabela 2, os coeficientes de variação obtidos para as propriedades físicas e mecânicas avaliadas se encontraram abaixo de 20%, condizente aos coeficientes de variação obtidos no estudo de Gava et al. (2015), entre outros. É importante lembrar que valores de coeficientes de variação inferiores a 20% são um bom indício da uniformidade do processo de produção dos painéis (DIAS, 2005; NASCIMENTO, 2003).

Tabela 2. Resultados das propriedades físicas e mecânicas referente aos 20 tratamentos delineados

Tr	Estat.	I 2h (%)	A 2h (%)	D (kg/m^3)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	TP (MPa)
1	$\bar{x}$	12,2	30,3	882	2704	24,4	1,54
	Cv (%)	9,0	18,5	2,5	8,3	11,1	13,8
2	$\bar{x}$	7,6	12,5	892	2549	29,9	1,97
	Cv (%)	15,1	17,2	2,4	8,5	8,0	18,6
3	$\bar{x}$	9,6	22,3	921	3110	27,9	2,33
	Cv (%)	11,0	14,6	1,9	15,6	17,9	13,1
4	$\bar{x}$	5,6	5,1	931	2566	31,6	2,72
	Cv (%)	17,5	12,4	4,9	11,6	9,7	14,1
5	$\bar{x}$	15,9	33,9	907	2310	19,9	0,92
	Cv (%)	10,0	9,2	3,3	6,2	6,5	17,3
6	$\bar{x}$	7,6	6,7	972	2052	25,4	2,46
	Cv (%)	16,8	15,2	4,9	11,6	10,2	17,9
7	$\bar{x}$	14,6	28,0	926	2847	24,4	1,54
	Cv (%)	10,4	18,6	4,1	9,7	8,9	12,0
8	$\bar{x}$	5,5	5,7	980	2406	31,2	2,55
	Cv (%)	17,8	19,3	5,1	9,3	11,8	9,7
9	$\bar{x}$	21,3	40,5	966	2018	17,0	0,64
	Cv (%)	10,7	18,2	1,9	11,3	16,0	18,1
10	$\bar{x}$	7,8	6,9	941	1909	24,5	2,32
	Cv (%)	18,9	10,0	9,1	6,3	8,4	16,1
11	$\bar{x}$	16,7	29,5	968	2328	20,4	0,91
	Cv (%)	8,3	9,8	2,6	8,4	15,0	11,5
12	$\bar{x}$	5,8	5,0	990	2135	30,2	2,02
	Cv (%)	12,2	14,7	7,1	7,4	5,9	16,9
13	$\bar{x}$	27,7	39,1	977	1810	13,8	0,35
	Cv (%)	6,8	12,8	2,7	4,3	10,4	18,8
14	$\bar{x}$	7,5	7,1	995	2027	29,4	2,09
	Cv (%)	19,7	12,3	2,6	11,1	5,5	16,3
15	$\bar{x}$	18,9	30,1	995	1831	13,7	0,44

16	*Cv (%)*	9,0	8,2	1,8	14,6	15,8	11,6
	$\overline{x}$	6,8	7,0	931	1936	28,8	1,32
	Cv (%)	13,6	9,3	7,6	6,6	9,9	14,6
17	$\overline{x}$	27,5	36,8	997	1430	11,5	0,13
	Cv (%)	9,5	18,7	4,3	16,7	16,4	8,3
18	$\overline{x}$	6,0	4,0	1022	1776	23,8	1,67
	Cv (%)	17,3	14,5	6,6	10,5	16,6	10,5
19	$\overline{x}$	21,6	29,1	1066	1808	12,2	0,34
	Cv (%)	9,6	16,3	3,0	5,6	16,1	16,8
20	$\overline{x}$	2,6	2,9	1015	1763	26,8	1,43
	Cv (%)	13,6	18,1	7,2	7,6	7,8	15,3

onde: Tr = tratamento; Estat. = estatísticas de valores médios ($\overline{x}$) e coeficientes de variação (Cv); I 2h = inchamento em espessura para o período de duas horas; A 2h = absorção de água para o período de duas horas; D = densidade; MOE = módulo de elasticidade na flexão estática; MOR = módulo de ruptura na flexão estática e TP = resistência à tração perpendicular.

Na Tabela 3 têm-se os resultados das propriedades físicas e mecânicas dos painéis de outros dois estudos recentes com aglomerados de alta densidade e os requisitos das propriedades físicas e mecânicas estabelecidos por três normas.

Os dois estudos com aglomerados de alta densidade utilizados para comparação com os resultados deste trabalho foram: Fiorelli et al. (2015), que utilizaram partículas de *Pinus* spp. com fibras de coco verde, aglutinados com os adesivos poliuretano à base de óleo de mamona, na proporção de 10%, e adesivo ureia formaldeído, na proporção de 12%; e Gava et al. (2015), que trabalharam com partículas de clones de seringueira (*Hevea brasiliensis*) aderidas com adesivo poliuretano à base de óleo de mamona, na proporção de 12%.

Quanto às normas, na ABNT NBR 14810:2006 foram consultados os requisitos físicos da propriedade inchamento em espessura (2h) e densidade (D). Na norma ABNT NBR 14810:2013 foram consultados os requisitos mecânicos para as propriedades MOE, MOR e TP, para painéis de média densidade, com espessura nominal na faixa de 8 a 13 milímetros e do tipo P2, denominados painéis não estruturais para uso interno em condições secas.

A norma ANSI A208.1:1999 foi consultada quanto aos requisitos dos painéis de alta densidade (igual ou superior a 800 kg/m^3), denominados pela norma de tipo H-1. A norma BS EN 312:2003 foi consultada quanto aos requisitos mecânicos para os painéis do tipo P4, denominados painéis para uso em condições secas.

Na Tabela 3 são apresentados os resultados das propriedades físicas e mecânicas referentes a outros estudos e aos requisitos normativos.

Tabela 3. Resultados das propriedades físicas e mecânicas referentes a outros estudos e aos requisitos normativos

Autores	**I 2h (%)**	**A 2h (%)**	**D (kg/m^3)**	**MOE (MPa)**	**MOR (MPa)**	**TP (MPa)**
Este estudo	2,6 a 27,7	2,9 a 40,5	882 a 1066	1430 a 3110	11,5 a 31,6	0,13 a 2,72
Fiorelli et al. (2015)	6,9 a 26,0	12,8 a 69,8	720 a 850	859 a 2274	8,7 a 25,8	-
Gava et al. (2015)	3,7	10,2	840	1894	13,2	2,68
Normas	**I 2h (%)**	**A 2h (%)**	**D (kg/m^3)**	**MOE (MPa)**	**MOR (MPa)**	**TP (MPa)**

ABNT NBR 14810:2006	8	-	551 a 750	1800*	11*	0,4*
ANSI A208.1:1999	-	-	≥ 800	2400	16,5	0,9
BS EN 312:2003	-	-	-	2300	16	0,4

onde: I 2h = inchamento em espessura para o período de duas horas; A 2h = absorção de água para o período de duas horas; D = densidade; MOE = módulo de elasticidade na flexão estática; MOR = módulo de ruptura na flexão estática e TP = resistência à tração perpendicular.
* = requisitos da norma ABNT NBR 14810:2013, para as propriedades MOE, MOR e TP.

Como pode ser observado nas Tabelas 2 e 3, para a propriedade inchamento em espessura para o período de 2h, em linhas gerais, as faixas de resultados obtidos neste estudo são semelhantes às dos outros dois estudos utilizados na comparação. Na Tabela 2, para a propriedade inchamento em espessura (2h), dos vinte tratamentos avaliados, dez tratamentos (tratamentos 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 e 20, isto é, todos os tratamentos com o adesivo PU) apresentaram inchamento inferior a 8%, atendendo ao requisito da norma ABNT NBR 14810:2006.

A propriedade absorção de água para o período de 2h não possui requisitos em nenhuma das normas consultadas. Para a propriedade absorção de água (2h), o resultado médio obtido por Gava et al. (2015) é semelhante a faixa de resultados obtidos neste estudo. Os painéis de partículas produzidos por Fiorelli et al. (2015) apresentaram absorção de água de até 69,8%, ou seja, superior aos resultados aqui obtidos (absorção de água na faixa de 2,9 a 40,5%).

Como pode ser observado na Tabela 2, a densidade dos painéis apresentou baixos coeficientes de variação por tratamento. Entretanto, os resultados apresentaram grande variação entre os tratamentos avaliados, com resultados na faixa de 882 a 1066 kg/m^3 (Tabela 3). Nos outros dois estudos foram obtidas densidades dos painéis entre 720 a 850 kg/m^3. De acordo com Iwakiri (1989), diferenças na densidade final do painel estão associadas ao material utilizado na respectiva manufatura, a variáveis como o teor de umidade das partículas e as diferenças de densidade entre as partículas empregadas na confecção de tais painéis. Painéis de partículas de alta densidade devem apresentar densidade igual ou superior a 800 kg/m^3, de acordo com a norma ANSI A208.1:1999 e IWAKIRI (2005).

Quanto às propriedades mecânicas, no ensaio de flexão estática as duas propriedades avaliadas (módulo de elasticidade – MOE e módulo de ruptura – MOR), em linhas gerais apresentaram faixas de resultados semelhantes aos outros dois estudos utilizados na comparação. Apenas o trabalho de Fiorelli et al. (2015) considerou alguns tratamentos que apresentaram valores menores de MOE e MOR, se comparados a este estudo. Tal trabalho obteve seus dados de MOE na faixa de 859 a 2274 MPa e valores de MOR na faixa de 8,7 a 25,8 MPa.

Na Tabela 2, para a propriedade MOE, dos vinte tratamentos avaliados, dezessete deles apresentaram MOE superior a 1800 MPa, atendendo ao requisito da norma ABNT NBR 14810:2013 (apenas os tratamentos 17, 18 e 20 não atenderam a esta norma). Oito tratamentos (Tr 1 a 5, Tr 7, Tr 8 e Tr 11) apresentaram MOE superior a 2300 MPa, atendendo à norma BS EN 312:2003. Seis tratamentos (Tr 1 a 4, Tr 7 e Tr 8) apresentaram MOE superior a 2400 MPa, atendendo à norma ANSI A208.1:1999.

Para a propriedade MOR, dos vinte tratamentos avaliados, todos apresentaram valores superiores a 11 MPa, atendendo ao requisito da norma ABNT NBR 14810:2013 (para painéis do tipo P2 e espessura nominal de 10 milímetros). As normas BS EN 312:2003 e ANSI A208.1:1999 possuem requisitos para o MOR de 16 e 16,5 MPa, respectivamente. Apenas os tratamentos 13, 15, 17 e 19 não atenderam a estas duas normas, em relação ao

MOR, como mostram as Tabelas 2 e 3.

Quanto à propriedade resistência à tração perpendicular (TP), a faixa de resultados obtidos neste estudo é coerente aos resultados de Gava et al. (2015). Na Tabela 2, dos vinte tratamentos avaliados, dezessete deles apresentaram TP superior a 0,4 MPa, atendendo aos requisitos das normas ABNT NBR 14810:2013 e BS EN 312:2003 (apenas os tratamentos 13, 17 e 19 não atenderam a estas normas). Quinze tratamentos apresentaram TP superior a 0,9 MPa, atendendo à norma ANSI A208.1:1999 (os tratamentos 9, 13, 15, 17 e 19 não atenderam a esta norma).

4 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos foi possível registrar as seguintes conclusões:

- Os painéis produzidos foram classificados como de alta densidade (acima de 800 kg/m^3) e apresentaram teor de umidade médio de 9,2%. Os painéis produzidos com adesivo poliuretano à base de óleo de mamona apresentaram melhor desempenho físico (menores valores de inchamento e absorção para o período de duas horas), se comparado aos painéis produzidos com adesivo melamina formaldeído;
- Os painéis produzidos com maior percentual de adesivo (13%) apresentaram melhor desempenho físico que os painéis produzidos com 11% de adesivo. Quanto às propriedades mecânicas avaliadas, os painéis produzidos com 13% de adesivo apresentaram maiores valores médios do MOR, se comparados aos painéis produzidos com 11% de adesivo;
- Os painéis produzidos com o adesivo PU apresentaram maiores valores médios de módulo de ruptura e de resistência à tração perpendicular, se comparados aos painéis produzidos com o adesivo MF;
- A maioria dos tratamentos avaliados atendeu a pelo menos um dos requisitos das normas consultadas. Os painéis com percentuais de 75 e 100% de casca de aveia apresentaram maiores densidades, bem como desempenhos físicos e mecânicos inferiores, se comparados aos painéis com percentuais de 0, 25 e 50% de partículas de casca de aveia.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos de doutorado e pelo apoio à pesquisa;

E a Universidade de São Paulo (USP), pela concessão de toda a infraestrutura de seus laboratórios e recursos necessários para a realização deste estudo, em especial aos professores e funcionários do Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeiras – LaMEM/SET/EESC/USP.

6 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, D. H. Proposta de método de ensaio para a determinação da resistência da madeira ao embutimento. 2014. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE – ANSI. A208.1: Particleboard. Gaithersburg, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997. 107p.

_____. NBR 14810: Chapas de madeira aglomerada. Rio de Janeiro, 2006.

_____. NBR 14810: Painéis de partículas de média densidade. Rio de Janeiro, 2013.

BERTOLINI, M. S. Painéis de resíduos madeireiros e de borracha de pneu associados à espuma poliuretana à base de mamona para aplicação como composições termoacústicas. 2014. 256 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

BRITISH STANDARD – BS. BS EN 312: Particleboards – specifications. London, 2003.

DIAS, F. M. Aplicação de resina poliuretana à base de mamona na fabricação de painéis de madeira compensada e aglomerada. 2005. 150 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

FIORELLI, J. et al. Painéis de partículas monocamadas fabricados com resíduo de madeira e fibra de coco verde. SCIENTIA FORESTALIS, v. 43, n. 105, p. 175-182, 2015.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS STATISTICS DIVISION - FAO. Statistics 2014: Faostat Forestry. Disponível em: < http://faostat3.fao.org/download/F/FO/E>. Acesso em: 26 maio 2017.

GAVA, M. et al. Production of particleboards from *Hevea brasiliensis* clones and castor oil-based polyurethane resin. BIORESOURCES, v. 10, n. 4, p. 6896-6905, 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Levantamento sistemático da produção agrícola - safra de 2016. Disponível em: < https://sidra.ibge.gov.br/home/lspa/brasil>. Acesso em: 29 maio 2017.

IWAKIRI, S. A influência das variáveis de processamento sobre propriedades das chapas de partículas de diferentes espécies de *Pinus*. 1989. 130 f. Tese (Doutorado) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1989.

_____. Painéis de madeira reconstituída. Curitiba: FUPEF, 2005.

JANKOWSKY, I. P. Colagem de madeiras. Piracicaba: ESALQ, 1988.

MENDES, L. M. *Pinus spp.* na produção de painéis de partículas orientadas. 2001. 156 f. Tese (Doutorado) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

MOSLEMI, A. A. Particleboard. London: Southern Illinois University Press, 1974.

NASCIMENTO, M. F. CHP - chapas de partículas homogêneas: madeiras do Nordeste do Brasil. 2003. 143 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

OLIVEIRA, J. M. Avaliação técnica e ergonômica de carteiras escolares confeccionadas com aglomerados de bagaço de cana de açúcar. 2010. 130 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

PEDRESCHI, R. Aproveitamento do bagaço de cana da indústria sucroalcooleira na produção de painéis aglomerados. 2009. 49 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

PETERSON, R. W. Wood adhesives. Forest Products Research Branch, OTAWA, n. 1055, 1964.

ROWELL, R. M.; HAN, J. S.; ROWELL, J. S. Characterization and factors affecting fiber properties. In: FROLLINI, E.; LEÃO, A. L.; MATTOSO, L. H. C. (Ed.). Natural polymers and agrofibers composites. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2000. p. 115-134.

SAMLAIC, J. Os atuais problemas e as possibilidades dos adesivos para madeira. REVISTA DA MADEIRA, n. 374, p. 7-10, 1983.

SILVA, D. A. L. et al. Environmental performance assessment of the melamine-urea-formaldehyde (MUF) resin manufacture: a case study in Brazil. JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, v. 96, p. 299-307, 2015.

SILVA, G. A. et al. Efeito de algumas variáveis de processamento nas propriedades físicas de painéis de madeira de partículas alongadas. CIÊNCIA FLORESTAL, v. 16, n. 1, p. 51-60, 2006.

TSOUMIS, G. Science and technology of wood: structure, properties, utilization. New York: Chapman & Hall, 1991. 494 p.

VARANDA, L. D. Painéis de alta densidade para aplicação em pisos: produção e avaliação de desempenho. 2016. 169 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

WEBER, C.; IWAKIRI, S. Utilização de resíduos de compensados, MDF e MDP para produção de painéis aglomerados. CIÊNCIA FLORESTAL, v. 25, n. 2, p. 405-413, abr./jun. 2015.

WEBSTER, F. H. Oats chemistry and technology. Saint Paul: American Association of Cereal Chemists, 1986.