

Caracterização tecnológica de painéis particulados
produzidos com resíduos de cinco espécies tropicaisTechnological characterization of particleboards
made with waste of five tropical speciesBruna Laís Longo¹, Alexsandro Bayestorff da Cunha², Polliana D'Angelo Rios²,
Rodrigo Figueiredo Terezo² e Caio Cesar Faedo de Almeida¹

Resumo

O objetivo do presente estudo foi caracterizar tecnologicamente painéis particulados produzidos com resíduo de beneficiamento de cinco espécies tropicais comerciais: angelim (*Hymenolobium* sp. / *Andira* sp.), cambará (*Qualea* sp.), canelão (*Nectandra* sp. / *Ocotea* sp.), cedro (*Cedrelinga cateniformis*) e itaúba (*Mezilaurus itauba*). Foram confeccionados três painéis de cada espécie, além de três painéis com a mistura das cinco espécies em iguais proporções (*mix*), totalizando 18 painéis com massa específica nominal de 0,65 g/cm³. Os painéis foram compostos por 12% de resina ureia formaldeído e 1% de emulsão de parafina. O ciclo de prensa utilizado foi de 160°C de temperatura, pressão de 40 kgf/cm² durante 8 minutos. Os dados foram submetidos à análise de variância e teste de Tukey a 95% de confiabilidade. Todas as madeiras, exceto o cedro, apresentaram massas específicas maiores e razões de compactação menores que o intervalo proposto pela literatura, o que refletiu em valores baixos de resistência e rigidez. Todos os painéis apresentaram resultados satisfatórios quanto à estabilidade dimensional dos painéis. As madeiras de angelim, cambará e canelão apresentaram resultados promissores. O cedro, apesar de resultar na maior razão de compactação, não apresentou resultados mecânicos na mesma magnitude, exceto para ligação interna. Recomenda-se a incorporação de espécies com menor massa específica básica, bem como o controle da granulometria das partículas e o aumento da massa específica nominal dos painéis.

Palavras-chave: espécies alternativas, uso de resíduos, painéis de média densidade.

Abstract

The objective of this study was to characterize technologically particleboards produced from the processing residues of five commercial tropical species: angelim (*Hymenolobium* sp / *Andira* sp), cambará (*Qualea* sp), canelão (*Nectandra* sp / *Ocotea* sp), cedar (*Cedrelinga cateniformis*) and itaúba (*Mezilaurus itauba*). Three panels of each species and also three panels with the mix of the five species in equal proportions (*mix*) were made, resulting in 18 panels with nominal density of 0,65g/cm³. The panels were composed of 12% of urea formaldehyde resin and 1% wax emulsion. The press cycle used was of 160°C temperature and pressure of 40 kgf/cm² for 8 minutes. The data were submitted to the analysis of variance and Tukey test (95% of reliability). All wood species except for cedro presented higher densities and lower compression ratios than the intervals cited in the literature. This was reflected in the lower values of resistance and stiffness. All panels presented good results for the dimensional stability. The species angelim, cambara and canelão presented promising results. Cedro, although with higher compression ratio; did not show mechanical results in the same magnitude, except for internal bond. The incorporation of species with lower wood densities is recommended, as well as the control of the particles granulometry and the increase of the panels' nominal density.

Keywords: alternative species, waste use, medium density panels.

INTRODUÇÃO

As características dos resíduos sólidos das indústrias de base florestal e da indústria moveleira dependem da matéria-prima, do processo empregado e do produto final a ser obtido. As combinações possíveis dessas variáveis resultam numa gama de dimensões e tipos de resíduos, os quais apresentam características distintas (HILLIG; SCHNEIDER, 2006).

¹Mestrado em Engenharia Florestal. UDESC – Universidade do Estado de Santa Catarina – Centro de Ciências Agroveterinárias. Avenida Luiz de Camões, 2090 – Conta Dinheiro – 88520-000 – Lages, SC. E-mail: bruna.lais@florestal.eng.br; caio-almeida@florestal.eng.br.

²Professor Adjunto. UDESC – Universidade do Estado de Santa Catarina – Centro de Ciências Agroveterinárias. Avenida Luiz de Camões, 2090 – Conta Dinheiro – 88520-000 – Lages, SC. E-mail: alexsandro.cunha@udesc.br; polliana.rios@udesc.br; rodrigo.terezo@udesc.br

Os resíduos de madeira resultantes de todas as fases do processo produtivo são considerados subprodutos e, portanto não poderiam ser descartados no processo industrial ao longo da cadeia produtiva. O setor industrial atual, não somente o de base florestal, preza pelo aproveitamento de resíduos, reintegrando-os ao processo produtivo. Isso aumenta os rendimentos industriais e reduz os impactos ou potenciais passivos ambientais (ABRAF, 2013).

Em contrapartida, Pierre (2010) considera que por falta de uma destinação imediata, grandes quantidades desses resíduos são simplesmente empilhados e encontram-se hoje em diversos estágios de decomposição. O mesmo autor complementa que muitas vezes os resíduos são queimados a céu aberto ou sofrem combustão espontânea com emissão de particulados finos na atmosfera. Em concordância, Yuba (2001) cita que para aquelas serrarias que não têm consumidores para os resíduos produzidos, algumas das soluções adotadas são a queima e a deposição irregular, que resultam em poluição do ar, solo e água.

Em relação às medidas tomadas pelas empresas quanto ao destino dos resíduos, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída sob a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010), aponta a auto responsabilidade das empresas na remoção, estocagem e tratamento de resíduos gerados pelos processos de produção, a partir de procedimentos adequados para a conservação do meio ambiente.

Nesse sentido, Iwakiri et al. (2000) citam que o aproveitamento de resíduos provenientes de serrarias para produção de painéis de madeira aglomerada seria uma forma de se obter um produto de maior valor agregado. Os autores ressaltam ainda que, o posterior revestimento superficial dos painéis por colagem de lâminas naturais ou sintéticas para utilização na indústria moveleira elevaria mais ainda este valor agregado.

Os painéis aglomerados caracterizam-se pela transformação da madeira em pequenas partículas que, secas e misturadas com adesivos sintéticos e distribuídas aleatoriamente entre si, são prensadas sob calor e pressão, gerando um painel particulado (MOSLEMI, 1974). De acordo com esse conceito, Guimarães Jr. et al. (2011) afirmam que todo e qualquer material lignocelulósico tem potencial de ser utilizado como matéria-prima para a fabricação de painéis de partículas.

Diversos estudos que abordam a utilização de algum tipo de resíduo de madeira na produção de painéis particulados de média densidade podem ser encontrados na literatura, como: Iwakiri et al. (2000); Dacosta et al. (2005); Pedrazzi et al., (2006); Rowell (2007); Setunge et al. (2009); Pierre (2010); Suffian et al. (2010); Almeida et al. (2012); Iwakiri et al. (2012b). Porém, ainda há pouca informação acerca da utilização de resíduos de madeiras tropicais, dada a variabilidade de espécies e tipos de resíduos existentes.

Dessa forma, o objetivo do presente estudo foi caracterizar por meio das propriedades físicas e mecânicas os painéis aglomerados produzidos com resíduos do beneficiamento de cinco espécies tropicais comerciais, de modo a fornecer informações sobre as alternativas de utilização de um resíduo, ainda pouco utilizado.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados para a produção dos painéis resíduos provenientes do aplainamento de pranchas de cinco espécies tropicais, sendo: angelim (*Hymenolobium* sp. / *Andira* sp.), cambará (*Qualea* sp.), canelão (*Nectandra* sp. / *Ocotea* sp.), cedro (*Cedrelinga cateniformis*) e itaúba (*Mezilaurus itauba*). Os resíduos foram coletados nas empresas Comércio de Madeiras Schmidt Ltda. e Esquadrias Guanabara Ltda., ambas de Lages – SC, Madebuss Fábrica de Esquadrias de Madeira Ltda. de São Bonifácio – SC e na Madetim Móveis e Esquadrias Ltda. de Timbó - SC. Além dos resíduos das pranchas, foram coletadas amostras com dimensões aproximadas de 5 X 5 X 5 cm para a determinação da massa específica da madeira sólida, de acordo com a norma NBR 11941 (ABNT, 2003), a qual é utilizada para a determinação da razão de compactação dos painéis.

O adesivo aplicado nas partículas foi composto pela resina ureia formaldeído (UF) com teor de sólidos de 66% e pH de 8,1 e emulsão de parafina com teor de sólidos de 61% e pH de 9,8.

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, utilizando as partículas das espécies tropicais na forma pura e no *mix* das cinco espécies em proporções iguais, totalizando 6 tratamentos. Foram produzidos 3 painéis por tratamento com massa específica de 0,65 g/cm³ e dimensões de 40,00 x 40,00 x 1,55 cm.

O preparo das partículas para a formação dos painéis envolveu a passagem dos resíduos pelo moinho de facas rotativas, pela classificação em peneiras para a eliminação de finos e pela secagem para a obtenção do teor de umidade desejado. Ao final do processo, as partículas apresentavam dimensões médias de 0,9 mm de espessura, 22 mm de comprimento, largura variável e teor de umidade de 4±1%.

A aplicação da resina e da emulsão de parafina foi realizada de forma independente, por meio de pistola pulverizadora localizada dentro do tambor que fazia a movimentação das partículas a uma velocidade de 20 rpm. O colchão de partículas foi formado dentro de caixa vazada, onde o objetivo era a deposição do material de forma homogênea para evitar diferenças de massa específica dentro do mesmo e painel e conseqüentemente diferenças nas propriedades tecnológicas.

O colchão foi submetido a uma pré-prensagem a frio com pressão específica de 5 kgf/cm² por um tempo de 10 minutos para que houvesse melhor acomodação das partículas e diminuição da altura do mesmo. Posteriormente, foi aplicado o ciclo de prensagem de 160 °C e pressão de 40 kgf/cm² por 8 minutos.

Após o processo de prensagem, os painéis foram acondicionados em uma câmara climatizada com temperatura de 20±3 °C e umidade relativa de 65±5% até a estabilização da massa. Depois de climatizados, foram retirados os corpos de prova para a realização dos ensaios tecnológicos, os quais seguiram as recomendações da norma ASTM D1037, (ASTM, 1995) para massa específica, teor de umidade, absorção de água, inchamento em espessura e ligação interna, da norma DIN 52362, (DIN, 1982) para determinação do módulo de elasticidade e de ruptura a flexão estática, e da norma NBR 14810, (ABNT, 2013) para arrancamento de parafuso superficial e de topo.

Os resultados encontrados nos ensaios foram submetidos a análises preliminares para a verificação dos pressupostos para utilização da estatística paramétrica. Assim, os dados foram testados quanto à presença de *outliers* (análise gráfica (*boxplot*)), normalidade da distribuição (Kolmogorov-Smirnov) e homogeneidade de variâncias (Teste de Levene). Posteriormente, os dados foram avaliados por meio da análise da variância e em caso de diferença estatística foi aplicado o teste de comparação de médias de Tukey a 95% de confiabilidade. Além da análise estatística tradicional, os resultados foram comparados com a literatura e com os parâmetros das normas ANSI A208.1 (ANSI, 2009); CS 236-66 (CS, 1968); CSA 0437 (CSA, 1993); EN 312-2 (EN, 2003); NBR 14810, (ABNT, 2013).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Propriedades físicas

Na tabela 1 pode ser observado que os resultados de massa específica da madeira sólida de cinco espécies tropicais e do *mix* proporcional variaram entre 0,46 g/cm³ (cedro) e 0,71 g/cm³ (itaúba). Quanto ao intervalo ótimo para a produção de painéis de partícula considerado por Hillig (2000), apenas o tratamento composto por resíduos de cedro se enquadra com o intervalo proposto pelo autor (entre 0,40 e 0,60 g/cm³).

Tabela 1. Valores médios para massa específica da madeira sólida, massa específica, razão de compactação e teor de umidade dos painéis.

Table 1. Mean values of solid wood specific gravity and specific gravity, compression ratio and moisture content of the panels.

Tratamento	ME _m (g/cm ³)	ME _p (g/cm ³)	RC	TU (%)
T1 (Angelim)	0,611 (3,95)	0,604 b (1,68)	1,00 bc (2,62)	7,59 e (2,24)
T2 (Cambará)	0,658 (1,70)	0,618 ab (1,94)	0,98 c (3,47)	8,78 a (1,43)
T3 (Canelão)	0,613 (2,40)	0,643 a (3,47)	1,03 bc (4,02)	8,38 bc (1,95)
T4 (Cedro)	0,462 (2,22)	0,641 a (1,69)	1,40 a (3,56)	8,55 ab (3,34)
T5 (Itaúba)	0,708 (1,17)	0,629 ab (2,02)	0,89 d (2,83)	8,09 cd (3,07)
T6 (<i>Mix</i>)	0,610	0,634 a (2,83)	1,05 b (4,32)	7,97 d (1,35)

Legenda: ME_m = massa específica da madeira sólida; ME_p = massa específica do painel; RC = razão de compactação; TU = teor de umidade; (coeficiente de variação, em porcentagem). Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey em 95% de confiabilidade. Legend: ME_m = solid wood specific gravity; ME_p = panel specific gravity; RC = compression ratio; TU = moisture content; (variation coefficient, in percentage). Average values followed by the same letter in the column do not differ statistically from each other according to the Tukey test at 95% of reliability.

Em relação à massa específica dos painéis, os valores obtidos variaram entre 0,60 g/cm³ (angelim) e 0,64 g/cm³ (canelão). Os resultados foram inferiores à massa específica nominal estabelecida de 0,65 g/cm³. Isso pode ter ocorrido devido a perdas de material decorrentes do processo laboratorial manual e ainda devido ao retorno em espessura após a liberação da pressão na prensa hidráulica. Dessa forma, os painéis podem ser classificados como de média densidade de acordo com o intervalo de 0,60 a 0,80 g/cm³ que preconiza a CS 236-66 (CS, 1968), e o intervalo de 0,55 a 0,75 g/cm³ determinado pela NBR 14810 (ABNT, 2013) e pela EN 312-2 (EN, 2003). Porém, de acordo com a ANSI A.208-1 (ANSI, 2009), apenas os tratamentos T3 e T4 atingiram o intervalo requerido de 0,64 a 0,80 g/cm³.

Para razão de compactação os valores médios variaram de 0,89 (itaúba) a 1,40 (cedro), com diferença estatística entre grande parte dos tratamentos. Observa-se que os valores mínimos e máximos obtidos se referem às mesmas espécies que obtiveram os valores extremos para a massa específica da madeira sólida, porém de forma inversamente proporcional. Esse fato é devido às partículas provenientes da madeira com menor massa específica requererem maior massa de material por unidade de volume e conseqüentemente apresentarem uma razão de compactação maior.

Salienta-se que para razão de compactação, o resultado obtido para o cedro foi o único que apresentou valor médio dentro do intervalo entre 1,3 e 1,6 proposto por Moslemi (1974); Maloney (1993) para garantir uma área de contato satisfatória entre as partículas e densificação suficiente para a formação de um painel com qualidade. A baixa razão de compactação encontrada na maioria dos tratamentos pode, segundo Hillig (2000) prejudicar a colagem e a resistência do painel, além de afetar a absorção d'água por permitir maiores espaços para a sua penetração.

Quanto ao teor de umidade dos painéis, percebe-se que os resultados variaram entre 7,6% (angelim) e 8,8% (cambará) e todos os tratamentos apresentaram valores inferiores ao teor de umidade de equilíbrio da madeira sólida, que seria de 12% nas mesmas condições de climatização. Segundo Wu (1999), esta redução de higroscopicidade justifica-se pelo processamento da madeira em partículas, adição de resina e aditivos e aplicação de pressão e alta temperatura durante o ciclo de prensagem.

Pode-se observar por meio da tabela 2 que os valores de absorção após 2 horas de imersão variaram entre 19,89% (angelim) e 40,49% (cedro) e após 24 horas entre 27,86% (cambará) e 42,64% (cedro). As espécies que apresentaram os menores valores, independentemente da duração do ciclo de imersão dos corpos de prova foram o angelim e cambará, diferenciando-se estatisticamente dos demais. Salienta-se que os resultados apresentados para esta propriedade não se relacionaram de forma clara com a massa específica dos painéis, razão de compactação e teor de umidade.

Tabela 2. Valores médios para absorção de água dos painéis.

Table 2. Mean values of panels' water absorption.

Tratamento	A2h (%)	A24h (%)
T1 (Angelim)	19,89 a (12,87)	29,99 a (25,82)
T2 (Cambará)	22,29 ab (16,94)	27,86 a (21,32)
T3 (Canelão)	29,21 c (11,69)	36,36 b (17,71)
T4 (Cedro)	40,49 d (14,06)	42,64 c (13,56)
T5 (Itaúba)	26,61 c (10,10)	41,17 bc (23,68)
T6 (Mix)	25,60 bc (14,01)	41,54 bc (15,89)

Legenda: A2h e A24h = absorção de água após 2 e 24 horas de imersão, respectivamente; (coeficiente de variação, em porcentagem). Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 95% de confiabilidade.
Legend: A2h and A24h = water absorption after 2 and 24 hours of immersion, respectively; (variation coefficient, in percentage). Average values followed by the same letter in the column do not differ statistically from each other accordingly to the Tukey test at 95% of reliability.

O resultado apresentado pelo cedro pode ser explicado pela maior razão de compactação em relação aos demais tratamentos. Segundo Iwakiri (2005), isso indica que as características físicas dos painéis dessa espécie tendem a ser depreciadas, pois existe maior quantidade de partículas sob compressão e, quando expostas à umidade, essas forças são liberadas, causando maiores alterações dimensionais.

Os resultados de absorção de água obtidos por Iwakiri et al. (2012b) foram menores que o deste estudo após 2 horas, teste para o qual os autores obtiveram o valor máximo de 17,62% para painéis de copaíba (*Copaifera multijuga*) com massa específica nominal de 0,75 g/cm³. Para absorção de

água após 24 horas, os mesmos autores obtiveram o valor máximo de 43,43% também para a co- paíba, valor este próximo dos obtidos no presente estudo. Já Naumann et al. (2008), encontraram valor médio bem maior (127,0%) de absorção de água após 24 horas para painéis aglomerados de massa específica média igual a 0,57 g/cm³, produzidos com partículas provenientes de cavaco de paricá (*Schizolobium amazonicum*).

A tabela americana de propriedades físicas e mecânicas para painéis de média massa específica (FPL, 1987) estabelece valores entre 5 e 50% para absorção de água após 24 horas. Assim, todos os tratamentos atenderam a este requisito. Porém, os painéis produzidos não atenderam à norma CSA 0437 (CSA, 1993) que preconiza os valores máximos de 10 e 15% de absorção de água após respectivamente 2 e 24 horas de imersão.

Os valores médios referentes ao inchamento em espessura e inchamento residual (TNRE) estão apresentados na Tabela 3, na qual observa-se que os valores variaram entre 3,57% (angelim) e 10,11% (cedro) após 2 horas de imersão e entre 7,48% (itaúba) e 11,59% (*mix*) após 24 horas de imersão. Foram encontradas diferenças significativas entre as espécies, dentre as quais ressalta-se positivamente o desempenho das espécies angelim, cambará e itaúba após 2 horas de imersão. Após a imersão durante 24 horas observou-se resultados mais homogêneos entre as espécies, destacando apenas a diferença observada entre a itaúba e o *mix*.

Tabela 3. Valores médios para inchamento em espessura, após 2 e 24 horas de imersão em água, e taxa de não retorno em espessura.

Table 3. Mean values of thickness swelling, 2 and 24 hours after immersion in water, and spring back.

Tratamento	I2h (%)	I24h (%)	TNRE (%)
T1 (Angelim)	3,57 a (15,58)	8,17 ab (12,20)	8,70 a (15,31)
T2 (Cambará)	4,28 a (21,44)	10,48 ab (14,41)	10,33 a (17,42)
T3 (Canelão)	6,74 bc (15,27)	10,59 ab (11,87)	8,75 a (13,02)
T4 (Cedro)	10,11 d (20,69)	10,89 ab (23,51)	8,61 a (15,96)
T5 (Itaúba)	4,82 ab (29,38)	7,48 a (19,90)	6,86 a (14,68)
T6 (<i>Mix</i>)	7,33 c (23,38)	11,59 b (10,04)	9,90 a (19,33)

Legenda: I2h e I24h = inchamento em espessura após 2 e 24 horas de imersão, respectivamente; TNRE = taxa de não retorno em espessura; (coeficiente de variação, em porcentagem). Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 95% de confiabilidade. Legend: I2h and I24h = thickness swelling after 2 and 24 hours of immersion in water, respectively; TNRE = Springback; (variation coefficient, in percentage). Average values followed by the same letter in the column do not differ statistically from each other accordingly to the Tukey test at 95% of reliability.

No caso do cedro, a maior quantidade de material lenhoso e, conseqüentemente a maior razão de compactação, propiciou uma maior liberação das tensões de compressão, apresentando o valor de inchamento em espessura mais alto. Já os painéis de *mix* apresentaram valores intermediários após 2 horas de imersão. Este comportamento se deve ao fato de que a mistura equilibra as características das espécies (TRIANOSKI, 2010).

De forma análoga à absorção de água, também não foi observada relação clara entre a razão de compactação e o inchamento em espessura, no entanto, foi observada certa influência da maior razão de compactação sobre o inchamento em espessura, conforme conceito apresentado por Maloney (1993) e Moslemi (1974), uma vez que o cedro apresentou a maior razão de compactação e o maior valor médio de inchamento em espessura após 2 horas de imersão.

Iwakiri et al. (2012b) obtiveram valores de inchamento em espessura variando de 4,01% (*Ocotea* sp.) a 8,51% (*Copaifera multijuga*) após 2 horas e de 10,97% (*Ocotea* sp.) a 22,37% (*Virola surinamensis*) após 24 horas de imersão. Os valores encontrados pelos autores estão consoantes aos observados neste estudo para o ciclo de 2 horas de imersão, porém um pouco mais altos após 24 horas de imersão. Trianoski (2010) observou valores médios de inchamento após 24 horas de 16,78 e 25,98% para painéis de massa específica nominal de 0,80 g/cm³ produzidos com madeira de *Toona ciliata* e *Grevillea robusta*, respectivamente. Avaliando entre outras composições, painéis puros de *S. amazonicum*, Naumann et al. (2008) encontraram um inchamento médio de 18,7 e 23,1% após 2 e 24 horas, respectivamente. Iwakiri et al. (2004), avaliando painéis produzidos com madeira de *Grevillea robusta* observaram que os painéis produzidos com 8% de adesivo e massa específica nominal de 0,60 g/cm³ apresentaram inchamento médio de 8,57 e 17,71% após 2 e 24 horas de imersão, respectivamente.

De acordo com a NBR 14810 (ABNT, 2013), o inchamento máximo não deve ser superior a 8% após 2 horas. Considerando este valor limítrofe, apenas o cedro não atendeu à norma. Quanto ao atendimento das normas internacionais, todos os tratamentos obtiveram desempenho satisfatório frente às normas EN 312-2 (EN, 2003); CS 236-66 (CS, 1968); ANSI A208.1 (ANSI, 2009), que preconizam os valores de inchamento médio máximo após 24 horas de 15, 35 e 40%, respectivamente, para painéis de média densidade.

Quanto ao inchamento residual, Trianoski (2010) observou valores de 13,02, 37,38 até 91,81% para painéis produzidos com as espécies *Toona ciliata*, *Schizolobium parahyba* e *Grevillea robusta*, respectivamente. Esses valores são consideravelmente maiores que os obtidos neste estudo. Cabe considerar que o autor utilizou o valor de 0,80 g/cm³ como massa específica dos painéis, diferentemente desta pesquisa, que utilizou 0,65 g/cm³. Isto pode ter alterado a estabilidade dimensional dos painéis, uma vez que há mais tensões de prensagem a serem liberadas em contato com a água em painéis de maior massa específica.

Abordando as causas que contribuem para a instabilidade dimensional de painéis aglomerados, Cunha et al. (2014) ressaltam que a massa específica, isoladamente, não é um parâmetro adequado para predição da estabilidade dimensional dos painéis. Os autores complementam ainda que inúmeros outros aspectos podem influenciar esta variável e entre estes, citam a espécie, razão de compactação, liberação de tensões geradas na prensagem, quantidade e qualidade de aditivos, entre outros.

Nesse sentido, as propriedades físicas dos painéis poderiam ser melhoradas utilizando-se partículas de menores dimensões, aumentando assim a área superficial de colagem e a ligação entre as partículas. Outro aspecto que pode ser destacado é a utilização de painéis multicamadas, nos quais as camadas externas sejam mais densificadas, e com maior teor de adesivo que a camada interna, de forma a impedir ou retardar a entrada de água no painel.

Propriedades Mecânicas

O módulo de elasticidade (MOE), módulo de ruptura (MOR) e tração perpendicular à superfície dos painéis são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Valores médios para módulo de elasticidade e módulo de ruptura à flexão estática, e tração paralela.
Table 4. Mean values of modulus of elasticity and modulus of rupture for static bending, and internal bond.

Tratamento	MOE (MPa)	MOR (MPa)	LI (MPa)
T1 (Angelim)	860,22 a (18,70)	5,09 ab (15,79)	0,53 a (15,35)
T2 (Cambará)	866,23 a (16,57)	6,21 a (17,86)	0,48 ab (16,11)
T3 (Canelão)	935,62 a (13,39)	5,51 ab (19,21)	0,44 ab (18,97)
T4 (Cedro)	631,46 b (20,31)	4,60 bc (14,02)	0,53 a (19,62)
T5 (Itaúba)	552,14 b (20,58)	2,12 d (18,54)	0,36 bc (14,16)
T6 (Mix)	611,90 b (14,15)	3,35 cd (17,26)	0,24 c (16,64)

Legenda: MOE e MOR = módulo de elasticidade e ruptura, respectivamente; LI = ligação interna; (coeficiente de variação, em porcentagem). Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 95% de confiabilidade.
Legend: MOE and MOR = modulus of elasticity and rupture, respectively; LI = internal bond; (variation coefficient, in percentage). Average values followed by the same letter in the column do not differ statistically from each other according to the Tukey test at 95% of reliability.

Observa-se que os valores médios de MOE variaram de 552,14 MPa (Itaúba) a 935,62 MPa (canelão), sendo que os tratamentos formados por angelim, cambará e canelão resultaram estatisticamente superiores em relação aos demais. Porém, os valores de MOE obtidos em todos os tratamentos não atendem ao requisito mínimo exigido pelas normas EN 312-2 (EN, 2003); NBR 14810 (ABNT, 2013); ANSI A208-1 (ANSI, 2009); CS 236-66 (CS, 1968) que é respectivamente de 1600, 1600, 2000 e 2403 MPa.

Os valores médios de módulo de ruptura (MOR) variaram entre 2,12 MPa (itaúba) e 6,21 MPa (cambará). Cabe destacar que, assim como para MOE, os resultados obtidos para MOR também destacam positivamente as espécies angelim, cambará e canelão, e também não atendem às normas

NBR 14810 (ABNT, 2013); CS 236-66 (CS, 1968) que especificam 11 MPa como valor limitante ao uso, EN 312-2 (EN, 2003); ANSI A208-1 (ANSI, 2009) que estabelecem o valor limítrofe de 13 MPa.

Os valores encontrados no ensaio de flexão estática se apresentaram inferiores aos encontrados na literatura para outras espécies alternativas. Trianoski (2010) obteve os valores de 1474,6 MPa para MOE e 7,0 MPa para MOR em painéis de *Grevillea robusta*. Sanches (2012) observou para painéis homogêneos compostos pela mistura de *Pinus taeda* e *Mimosa scabrella* os valores de 940,4 MPa para MOE e de 7,6 MPa para MOR. Guimarães Jr. et al. (2013), estudando painéis puros de *Acacia mangium*, obtiveram os valores de 1803,8 e 11,1 MPa para MOE e MOR, respectivamente. Iwakiri et al. (2012b), encontraram para *Caryocar villosum* os valores de 2389,0 MPa para MOE e 13,7 MPa para MOR. Entre os autores supracitados, apenas Sanches (2012) utilizou a mesma densidade nominal dos painéis que o presente estudo (0,65 g/cm³). E foi também o que mais se aproximou dos resultados obtidos. Os demais autores utilizaram densidade nominal de 0,70 a 0,80 g/cm³.

Em relação ao processo de densificação dos painéis, Moslemi (1974) relatou que painéis produzidos com espécies de baixa massa específica geralmente apresentaram maior resistência à flexão, quando comparados com painéis obtidos de espécies de alta massa específica. Nesse sentido, alternativas para o aumento do desempenho mecânico dos painéis poderiam estar na utilização das espécies em conjunto com outras de menor massa específica, no aumento da massa específica dos painéis e no aumento do teor de resina, porém o acréscimo deste último fator refletiria de forma expressiva no valor do produto final.

Os resultados obtidos para ligação interna variaram de 0,24 MPa (*mix*) a 0,53 MPa (cedro e angelim), sendo possível observar por meio da tabela 4 que os painéis do tratamento 6 (*mix*) foram inferiores aos demais e semelhantes aos painéis do tratamento 5, formados por partículas de itaúba. Já os demais tratamentos (angelim, cambará, canelão e cedro) foram semelhantes. Nesta variável, apenas os painéis do *mix* das espécies não atenderam ao requisito mínimo de 0,35 MPa exigido pela NBR 14810 (ABNT, 2013) e pela EN 312-2 (EN, 2003). Em relação a ANSI A208.1 (ANSI, 2009), adiciona-se a itaúba ao não atendimento ao parâmetro mínimo de 0,40 MPa e a CS 236-66 (CS, 1968) o canelão em virtude da norma solicitar 0,48 MPa.

Os valores obtidos para esta propriedade são relativamente inferiores aos encontrados na literatura para outras espécies de cunho não convencional. Iwakiri et al. (2004) observaram o valor médio de 0,71 MPa para *Grevillea robusta*, Iwakiri et al. (2010) 0,76 MPa (*Schizolobium amazonicum*), Trianoski et al. (2011), 1,12 MPa (*Acrocarpus fraxinifolius*). Assim como Iwakiri et al. (2012b) que ao estudarem o resíduo de *Ecclinusa guianensis* na produção de painéis particulados, obtiveram o valor médio de 1,46 MPa.

Saldanha (2004) cita que a planicidade das partículas, bem como o índice de esbeltez favorecem o processo de aplicação da resina, a formação do colchão e área de contato entre as partículas, ou seja, quanto maiores as razões de planicidade e esbeltez, melhores são as condições de distribuição da resina, o que pode interferir na resistência mecânica dos painéis. Nesse sentido, o maior controle da granulometria das partículas pode proporcionar melhores índices de planicidade e esbeltez, que por sua vez, podem melhorar o desempenho mecânico dos painéis.

Melo e Del Menezzi (2010) relacionaram o baixo desempenho de painéis de *E. grandis* ao gradiente vertical de densidade. Segundo os autores, esse gradiente pode ser influenciado pelo tipo de matéria-prima e fatores relacionados à prensagem, como tempo de prensagem, tempo de fechamento da prensa e pressão. Vital (1973), ao estudar diferentes espécies de madeira utilizadas na manufatura de painéis aglomerados, verificou que a resistência a ligação interna foi influenciada pela massa específica da camada interna do painel. Nesse sentido, sugere-se o aumento de massa específica dos painéis aliado ao maior controle da uniformização das partículas na caixa formadora do colchão em nível laboratorial.

Os valores obtidos para a resistência dos painéis ao arrancamento do parafuso são apresentados na tabela 5, na qual observa-se que os resultados variaram entre 512,38 N (itaúba) e 874,00 N (angelim) para a superfície e entre 378,41 N (*mix*) e 624,35 N (angelim) para o topo.

Tabela 5. Valores médios para a resistência ao arrancamento do parafuso.**Table 5.** Mean values of screw withdrawal resistance.

Tratamento	APs (N)	APt (N)
T1 (Angelim)	874,00 a (21,79)	624,35 a (16,42)
T2 (Cambará)	848,25 ab (14,85)	570,80 ab (21,90)
T3 (Canelão)	767,64 ab (16,59)	485,98 ab (12,73)
T4 (Cedro)	869,88 a (18,19)	604,01 a (19,74)
T5 (Itaúba)	512,38 c (21,23)	405,25 b (16,00)
T6 (Mix)	647,86 bc (12,88)	378,41 b (19,38)

Legenda: APs e APt = resistência ao arrancamento de parafuso de superfície e de topo, respectivamente; (coeficiente de variação, em porcentagem). Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 95% de confiabilidade. APs and APt = superficial and top screw withdrawal resistance, respectively; (variation coefficient, in percentage). Mean values followed by the same letter in the column do not differ statistically from each other according to Tukey test at 95% reliability.

As espécies angelim, cambará, canelão e cedro foram superiores à itaúba e ao *mix* para as duas posições de ensaio (topo e superfície), porém, nenhuma das espécies atenderam ao limite mínimo de 1020 N estabelecido pela NBR 14810 (ABNT, 2013) e de 800 N (topo) e 900 N (superfície) determinados pela ANSI A208-1 (ANSI, 2009).

Modes et al. (2012), avaliando painéis de *Peltophorum dubium* com massa específica nominal de 0,63 g/cm³, observaram o valor médio de 568,8 N para o arrancamento de parafuso. Trianoski et al. (2011) observaram os valores médios de 1482,96 e 1088,18 N para arrancamento de parafuso de superfície e topo, respectivamente, para painéis puros de *Acrocarpus fraxinifolius* com massa específica nominal de 0,75 g/cm³. Iwakiri et al. (2012a) obtiveram os valores médios de 1900 N para a superfície e 1615 N para o topo de painéis puros produzidos com *Melia azedarach* sob uma massa específica nominal de 0,75 g/cm³. Dessa forma, observa-se que o valor maior de massa específica dos painéis pode resultar em melhores resultados mecânicos. Trianoski (2010) menciona que esta relação se deve a redução dos espaços vazios no painel, que promove um maior contato entre as partículas, gerando assim uma maior resistência mecânica. Dessa forma, a produção de painéis com as espécies estudadas pode apresentar resultados mais promissores quando aumentada a massa específica nominal dos painéis.

Salienta-se ainda que as propriedades mecânicas dos painéis poderiam ser melhoradas utilizando-se juntamente com espécies de menor massa específica, elevando a densificação dos painéis, o que possivelmente refletiria nas propriedades tecnológicas dos mesmos.

CONCLUSÕES

As madeiras das espécies utilizadas no estudo, exceto o cedro, apresentaram massas específicas maiores e razões de compactação menores que o intervalo proposto pela literatura para a produção de painéis reconstituídos, o que refletiu nos valores baixos de resistência e rigidez encontrados.

Todas as espécies apresentaram resultados satisfatórios quanto à estabilidade dimensional dos painéis. No entanto, os resultados de absorção de água foram maiores que o exigido pela norma CSA para todas as espécies.

Entre as espécies estudadas, o angelim, cambará e canelão apresentaram resultados promissores. O cedro, apesar de apresentar a maior razão de compactação, não apresentou resultados para as propriedades mecânicas na mesma magnitude, exceto para ligação interna.

Todas as espécies apresentaram bom desempenho para ligação interna, exceto o *mix*. No que tange às demais propriedades mecânicas, nenhuma das espécies atendeu às normas. Porém, as espécies angelim e cambará foram as que apresentaram resultados promissores.

Na busca pela melhoria das propriedades mecânicas dos painéis, mais estudos incorporando espécies de baixa massa específica são necessários.

Recomenda-se a realização de pesquisas com as espécies utilizadas, pois acredita-se que melhorando o controle da granulometria das partículas, bem como aumentando a massa específica nominal dos painéis, seja possível atingir resultados consoantes às normas para todas as espécies.

AGRADECIMENTOS

Às empresas Comércio de Madeiras Schmidt Ltda., Esquadrias Guanabara Ltda., Madebuss Fábrica de Esquadrias de Madeira Ltda., Madetim Móveis e Esquadrias Ltda., Isogama Indústria Química Ltda., Indústria de Compensados Sudati Ltda. Ao SENAI – Unidade Lages. À Secretaria Estadual da Educação do Estado de Santa Catarina (SED/SC – FUMDES).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: madeira - determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14810**: painéis de madeira de média densidade. Rio de Janeiro, 2013. 69 p.

ABRAF - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário Estatístico 2013**: ano base 2012, Brasília. 2013. 148 p.

ALMEIDA, J. E.; LOGSDON, N. B.; JESUS, J. M. H. Painéis de madeira aglomerada produzidos com serragem e poliestireno expandido. *Floresta*, Curitiba, v. 42, n. 1, p. 189-200, jan./mar. 2012.

ANSI - AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI A208.1**: Mat formed wood particleboard: specifications. Gaithersburg: National Particleboards Association, 2009. 9 p.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1037**: Standard test methods for evaluating properties of wood-base fiber and particle panel materials. Philadelphia, 1995.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Lei nº 12305**, de 02 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS. Disponível em: Acesso em: 02 mai. 2014.

CS - COMMERCIAL STANDART. **CS 236-66**: Mat formed wood particleboard, 1968.

CSA - CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **CSA 0437-93**: OSB and waferboard. Ontario, 1993. 18 p.

CUNHA, A. B.; LONGO, B. L.; RODRIGUES, A. A.; BREHMER, D. R. Produção de painéis de madeira aglomerada de *Eucalyptus benthamii*, *Eucalyptus dunnii* e *Eucalyptus grandis*. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 42, n. 102, p. 259-267, jun. 2014.

DACOSTA, L. P. E.; HASELEIN, C. R.; SANTINI, E. J.; SCHNEIDER, P. R.; CALEGARI, L. Qualidade das chapas de partículas aglomeradas fabricadas com resíduos do processamento mecânico da madeira de *Pinus elliottii* (Engelm.). *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 15, n. 3, p. 311-322, 2005.

DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 52362**: Testing of wood chipboards bending test, determination of bending strength. Berlin, 1982. 40 p.

EN - EUROPEAN STANDARD. **EN 312 -2** : particleboards: specifications. British Standard Institution, London, 2003. 22 p

FPL - FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook**: wood as an engineering material. Washington: USDA/FS, 1987. 466 p. (Agriculture Handbook, 72).

GUIMARÃES JR., J. B.; ARAÚJO, B. L. M.; LOPES, O. P.; MENDES, R. F.; MENDES, L. M. Produção de painéis aglomerados da madeira de desrama de *Acacia mangium*. *Pesquisa Florestal Brasileira*, Colombo, v. 33, n. 76, p. 387-391, 2013.

GUIMARÃES JR., J. B.; MENDES, L. M.; MENDES, R. F.; MORI, F. A. Painéis de madeira aglomerada de resíduos da laminação de diferentes procedências de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus cloeziana*. *Cerne*, Lavras, v. 17, n. 4, p. 443-452, out./dez. 2011.

HILLIG, E. **Qualidade de chapas aglomeradas estruturais, fabricadas com madeira de pinus, eucalipto e acácia negra, puras ou misturadas, coladas com tanino-formaldeído**. 2000, 96 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2000.

HILLIG, E.; SCHNEIDER, V. E. Resíduos da atividade moveleira e de base florestal: caracterização e aproveitamento. In: **Polo Moveleiro da Serra Gaúcha – Sistemas de Gerenciamento Ambiental na Indústria Moveleira**. Caxias do Sul: Educs, 2006. Cáp. 6.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 2005, 247 p.

IWAKIRI, S.; CUNHA, A. B. C.; ALBUQUERQUE, C. E. C.; GORNIAC, E.; MENDES, L. M. Resíduos de serrarias na produção de painéis de madeira aglomerada de eucalipto. *Scientia Agrária*, Curitiba, v. 1, n. 1-2, p. 23-28, 2000.

IWAKIRI, S.; MATOS, J. L. M.; TRIANOSKI, R.; PRATA, J. G. Produção de painéis aglomerados homogêneos e multicamadas de *Melia azedarach* (cinamomo) e *Pinus taeda* com diferentes teores de resina. *Cerne*, Lavras, v. 18, n. 3, p. 465-470, jul./set. 2012a.

IWAKIRI, S.; SHIMIZU, J.; SILVA, J. C.; DEL MENEZZI, C. H. S.; PUEHRINGHER, C. A.; VENSON, I.; LARROCA, C. Produção de painéis de madeira aglomerada de *Grevillea robusta* A. Cunn. Ex R. Br. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 883-887, 2004.

IWAKIRI, S.; VIANEZ, B. F.; WEBER, C. TRIANOSKI, R.; ALMEIDA, V. C. Avaliação das propriedades de painéis aglomerados produzidos com resíduo de serrarias de nove espécies de madeiras tropicais da Amazônia. *Acta Amazônica*, Manaus, v. 42, n. 1, p. 59-64, mar. 2012b.

IWAKIRI, S.; ZELLER, F.; PINTO, J. A.; RAMIREZ, M. G. L.; SOUZA, M. M.; SEIXAS, R. Avaliação do potencial de utilização da madeira de *Schizolobium amazonicum* "Paricá" e *Cecropia hololeuca* "Embaúba" para produção de painéis aglomerados. *Acta Amazônica*, Manaus, v. 40, n. 2, p. 303-308, 2010.

MALONEY, T. M. **Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing**. 2.ed. San Francisco: Miller Freeman, 1993. 689 p.

MELO, R. R.; DEL MENEZZI, C. H. S. Influência da massa específica nas propriedades físico-mecânicas de painéis aglomerados. *Silva Lusitana*, Lisboa, v. 18, n. 1, p. 59-73, 2010.

MODES, K. S.; VIVIAN, M. A.; LILGE, D. S.; MELO, R. R.; SANTINI, E. J.; HASELEIN, C. R. Utilização da madeira de canafístula (*Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub.) na confecção de chapas de madeira aglomeradas. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 22, n. 1, p. 147-159, jan./mar. 2012.

MOSLEMI, A. A. **Particleboard**. Illinois: Southern Illinois University, 1974. 244 p.

NAUMANN, R. B.; VITAL, B. R.; CARNEIRO, A. C. O.; DELLA LUCIA, R. M.; SILVA, J. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; COLLI, A. Propriedades de chapas fabricadas com partículas de madeira de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake e de *Schizolobium amazonicum* Herb. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 1143-1150, 2008.

PEDRAZZI, C.; HASELEIN, C. R.; SANTINI, E. J.; SCHNEIDER, P. R. Qualidade de chapas de partículas de madeira aglomerada fabricadas com resíduos de uma indústria de celulose. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 16, n. 2, p. 201-212, 2006.

PIERRE, F. C. **Caracterização físico-mecânica de painéis aglomerados de *Eucalyptus grandis* com adição de resíduos industriais madeireiros**. 2010. 122 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”, Botucatu, 2010.

ROWELL, R. M. Composite materials from forest biomass: a review of current practices, science and technology. In: DIMITRIS, S. A. (Ed.). **Materials, chemicals and energy from forest biomass**. North Carolina: ACS Publications, 2007. p. 76-92.

SALDANHA, L. K. **Alternativas tecnológicas para produção de chapas de partículas orientadas “OSB”**. 2004. 83 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

SANCHES, F. L. **Qualidade de painéis aglomerados produzidos com mistura de madeira de quatro espécies florestais**. 2012. 93 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Estadual do Centro Oeste, Irati, 2012.

SETUNGE, S.; WONG, K. K.; JOLLANDS, M. Economic and environmental benefits of using hardwood sawmill waste as a raw material for particleboard production. **Earth and Environmental Science**, Edinburgh, v. 9, n. 5-6, p. 485-494, 2009.

SUFFIAN, M.; ORMONDROYD, G. A.; HALE, M. D. Comparisons of particleboard produced from Acacia hybrid and a UK commercial particleboard furnish from recycled wood. **Journal of Tropical Forest Science**, Kepong, v. 22, n. 3, p. 227-236, 2010.

TRIANOSKI, R. **Avaliação do potencial de espécies florestais alternativas, de rápido crescimento, para produção de painéis de madeira aglomerada**. 2010. 260 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

TRIANOSKI, R.; IWAKIRI, S.; MATOS, J. L. M.; PRATA, J. G. Viabilidade da utilização de *Acrocarpus fraxinifolius* em diferentes proporções com *Pinus spp.* para produção de painéis aglomerados. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 91, p. 343-350, set. 2011.

VITAL, B. R. **Effects of species and panel densities on properties of hardwood particleboard**. 1973. 111 p. Dissertação (Magister in Forestry) - University of Wisconsin, Madison – WI, 1973.

WU, Q. Application of Nelson’s sorption isotherm to wood composites and overlays. **Wood and Fiber Science**, Pennsylvania, v. 31, n. 2, p. 187-191, 1999.

YUBA, A. N. **Cadeia produtiva da madeira serrada de eucalipto para produção sustentável de habitações**. 2001. 146 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

Recebido em 25/09/2014

Aceito para publicação em 12/06/2015

