

Painéis aglomerados produzidos com bagaço de
cana em associação com madeira de eucaliptoParticleboards produced with sugar cane
bagasse and *Eucalyptus* woodRafael Farinassi Mendes¹, Lourival Marin Mendes², Renata Aparecida Serio Abranches³,
Rosimeire Cavalcante dos Santos⁴ e José Benedito Guimarães Júnior⁴**Resumo**

O objetivo do estudo foi avaliar o efeito da porcentagem de associação de bagaço de cana com a madeira de eucalipto em diferentes tipos e teores de adesivos na produção de painéis aglomerados. Os painéis foram produzidos com bagaço de cana em porcentagens de 25%, 50% e 75% complementados com a madeira de eucalipto, e com os adesivos uréia-formaldeído (UF) e fenol-formaldeído (FF) a 6%, 9% e 12% (com base na massa seca das partículas). Na prensagem dos painéis foi utilizada pressão de 40 kgf/cm² e temperatura de 160°C para UF e 180°C para FF, por um período de 8 minutos. O adesivo UF mostrou-se estatisticamente igual ou superior a FF em quase todas as propriedades avaliadas. O tratamento que obteve melhores resultados foi UF a 12% e 75% de bagaço de cana, atendendo os valores estipulados pela norma CS 236-66, com exceção do módulo de elasticidade. Apesar disso, os painéis produzidos com UF a 6% e 75% de bagaço de cana atenderam também a norma em todas as propriedades, com exceção do módulo de elasticidade, sendo a alternativa economicamente mais viável. Sugere-se a continuação de pesquisas nesta linha, incluindo a manipulação das variáveis de produção, e estudos sobre a interação entre a madeira de eucalipto e o bagaço de cana, afim de que todos os resultados se adequem aos valores propostos pela norma.

Palavras-Chave: Aglomerados, Bagaço de cana, Eucalipto, Adesivo**Abstract**

The objective was to evaluate the percentage of sugar cane bagasse associated with *Eucalyptus* wood in different levels and types of adhesives in the particleboard production. The panels were produced with bagasse in percentages of 25%, 50% and 75% complemented with the wood of *Eucalyptus*; the adhesives used were Urea-Formaldehyde (UF) and Phenol-Formaldehyde (FF) to 6%, 9% and 12% (based on dry weight of particles). In the pressing of the panels 40 kgf/cm² of pressure was used; at a temperature of 160°C for UF and 180°C for FF, for 8 minutes. The UF adhesive was statistically equal to or greater than FF in almost all properties evaluated. The treatment that presented the best result was UF at 12% and 75% of bagasse, meeting the values stipulated by the CS 236-66 standard, except for the elasticity modulus. The panels produced with 6% of UF and 75% of sugar cane bagasse also met the standard in all properties, except for the elasticity modulus; and this is the most economically viable alternative. It is suggested that this line of research be continued, including the handling of the variables of production, and studies on the interaction between the *Eucalyptus* wood and sugar cane bagasse, so that all results comply with the values proposed by the standard.

Keywords: Particleboard, Sugar cane bagasse, *Eucalyptus*, Adhesive**INTRODUÇÃO**

Os painéis aglomerados surgiram na Alemanha, no início da década de 40, como

forma de viabilizar a utilização de resíduos de madeira, em face da dificuldade de obtenção de madeiras de boa qualidade para produção de lâminas para compensados,

¹Engenheiro Florestal pela Universidade Federal de Lavras – Caixa Postal 3037 – Lavras, MG - 37200-000 – E-mail: rafaelmendes@usp.br

²Professor Adjunto do Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal de Lavras – Caixa Postal 3037 – Lavras, MG - 37200-000 – E-mail: lourival@ufla.br

³Graduanda em Engenharia Florestal da Universidade Federal de Lavras – Caixa Postal 3037 – Lavras, MG - 37200-000 – E-mail: renatabranches@yahoo.com.br

⁴Doutorando em Ciência e Tecnologia da Madeira pela Universidade Federal de Lavras – Caixa Postal 3037 – Lavras, MG - 37200-000 – E-mail: jbguimaraejr@hotmail.com; Meire_caico@yahoo.com.br

devido ao isolamento do país durante a segunda Guerra Mundial.

Os setores de construção civil e de mobiliário são os principais responsáveis pela evolução tecnológica das indústrias de painéis particulados, tendo em vista a utilização deste como matéria-prima básica. A princípio, podem ser produzidos a partir de qualquer material lignocelulósico que lhes confirme alta resistência mecânica e peso específico pré-estabelecido (ROWELL *et al.*, 2000), os quais depois de terem as partículas aglutinadas com adesivo, se consolidam sob a ação de temperatura e pressão.

No Brasil, tais indústrias consomem um volume significativo de madeiras provenientes de florestas plantadas, principalmente do gênero pinus e eucalipto. Para atender à demanda cada vez mais crescente pela madeira, há necessidade de não somente aumentar a área de plantios com essas espécies, mas também procurar opções de matéria-prima de rápido crescimento que possam contribuir de forma quantitativa e qualitativa.

O aproveitamento dos resíduos gerados pela agroindústria brasileira mostra-se como alternativa para atender tal demanda do setor de painéis aglomerados, apresentando-se com vários tipos de resíduos lignocelulósicos com potencialidades para aproveitamento, dentre os quais: sabugo de milho, casca de arroz, casca de café, casca de amendoim, caule de bananeira, casca de coco, caule de mandioca, casca de mamona, bagaço de cana, entre outros (OKINO *et al.* (1997); ROWELL *et al.* (2000); MENDES (2008a) e MENDES *et al.* (2009)).

O bagaço de cana, que é um conjunto de fibras emaranhadas de celulose, tem sido produzido cada vez em maior quantidade devido ao aumento da área plantada e da industrialização da cana-de-açúcar, decorrentes principalmente de investimentos públicos e privados na produção alcooleira. Segundo dados do IBGE (2010), a safra de cana-de-açúcar no Brasil no ano de 2009 foi de aproximadamente 698 milhões de toneladas, o que representa para o país geração de cerca de 195 milhões de toneladas de bagaço de cana, pois, de acordo com Silva *et al.* (2007), cada tonelada processada de cana-de-açúcar gera um total de 280 kg de resíduo.

Geralmente este bagaço de cana é queimado em reservatórios de vapor para produzir energia para uso industrial, mas atualmente devido às suas características físico-químicas, está sendo utilizado em um vasto campo de pesquisas,

dentre os quais, na produção de ração animal, na indústria química com a produção de plástico biodegradável, na produção de bicarbonato de sódio e cloreto de amônio, e também para a manufatura de painéis aglomerados (SILVA, *et al.*, 2007 e ANSELMINI, 2007).

Em questão da produção de painéis aglomerados, tal resíduo além de sofrer uma agregação de valor, poderá atender à crescente demanda da indústria de painéis de madeira, além de possibilitar sua expansão, diminuir a utilização de madeira e conseqüentemente a pressão sobre as florestas, e ainda reduzir os custos de produção dos painéis, tornando-os ainda mais competitivos no cenário econômico.

Quanto às propriedades e qualidade dos painéis, muitos são os fatores que contribuem para as características do produto final, dentre eles pode-se destacar: a densidade do material lignocelulósico, densidade dos painéis, umidade das partículas, razão de compactação, ciclo de prensagem, quantidade e tipo de adesivo (KELLY, 1977 e MALONEY, 1993).

Dentre os principais tipos de adesivos utilizados pela indústria de painéis de madeira estão: a uréia-formaldeído (UF), que apresenta resistência à umidade muito limitada, e a fenol-formaldeído (FF), indicada para produção de painéis para uso externo ou em ambiente com alta umidade relativa. Por ser o componente de maior custo, torna-se muito importante a definição do tipo e quantidade de adesivo a ser utilizado, no sentido de se buscar uma otimização na relação custo-benefício.

Outra variável importante é o tipo de material, e a conseqüente relação entre a sua densidade e a densidade dos painéis, denominada de razão de compactação. Kelly (1977), Moslemi (1974), Maloney (1993) e Tsoumis (1991) recomendam que a razão de compactação deve estar na faixa de 1,3 a 1,6 para que ocorra adequada densificação e consolidação do painel à espessura final desejada. Relatam ainda que painéis quando produzidos com material de baixa densidade, apresentam, normalmente, maior resistência à flexão e à ligação interna, quando comparados a painéis confeccionados com material de alta densidade. Já as propriedades de absorção de água e inchamento em espessura passam a ter valores maiores. Em contrapartida, Vital *et al.* (1974) concluíram que painéis com maior razão de compactação apresentaram menor absorção de água que painéis com menor razão de compactação.

Eles atribuíram esse fato à redução na porosidade e aumento na quantidade de material lenhoso, como prováveis causas da menor taxa de absorção de água.

Diante disso, o objetivo do estudo foi avaliar o efeito da porcentagem de associação de bagaço de cana com a madeira de eucalipto em diferentes tipos e teores de adesivos na produção de painéis aglomerados.

MATERIAL E MÉTODOS

Obtenção da matéria-prima utilizada

O bagaço de cana, obtido através da moagem da cana em uma moenda, foi oriundo de um alambique de produção de cachaça artesanal, localizado na cidade de Lavras, sul do estado de Minas Gerais. Já a madeira de eucalipto foi proveniente de testes clonais instalados no município de Paracatu, região noroeste do estado de Minas Gerais, de propriedade da Companhia Mineira Metais.

Delineamento experimental

A variação da porcentagem de bagaço de cana associado à madeira de eucalipto, bem como os diferentes tipos e teores de adesivos empregados, constam na Tabela 1.

Para atender os objetivos propostos, foram confeccionados três painéis para cada tratamento (Tabela 1), com massa específica nominal de 0,70g/cm³ e 1% de parafina (base massa seca do material).

Determinação da densidade básica dos materiais

A densidade básica da madeira de eucalipto e do bagaço de cana foi determinada de acordo com a norma NBR 11941 (ABNT, 2003), enquanto que a densidade do material lignocelulósico, (DML) que foi utilizado no cálculo da razão de compactação (RC=densidade do painel/DML), foi obtida com a soma da porcentagem utilizada de cada material multiplicada pela sua densidade.

Manufatura dos painéis

As partículas de eucalipto e de bagaço de cana foram geradas com a utilização de um moinho martelo com uma peneira de abertura de 6 mm, uniformizando assim, as dimensões das partículas dos dois tipos de materiais. Foram então levadas para uma estufa com circulação de ar forçada, com temperatura variando entre 60 e 65°C, até que atingissem o teor de umidade de 3% (base massa seca do material).

O adesivo e a parafina foram aplicados ao material por meio de aspersão em uma encoladeira do tipo tambor giratório de acordo com os tratamentos pré-estabelecidos. As partículas ao saírem do tambor foram conduzidas a uma caixa formadora de colchão com as dimensões de 480 mm x 480 mm.

Tal colchão foi então submetido a uma pré-prensagem a frio, com o objetivo de dar uma melhor conformação, e posterior prensagem a quente, com temperatura de 180 °C para o adesivo FF e 160°C para UF, pressão específica de 40 kgf/cm² e tempo de prensagem de 8 minutos.

Tabela 1. Delineamento experimental.

Table 1. Experimental design.

Tratamentos	Associação de material		Adesivo	
	Bagaço de cana (%)	Eucalipto (%)	Tipo	%
T1	75	25	Fenol-Formaldeído (FF)	6
T2	50	50		6
T3	25	75		6
T4	75	25		9
T5	50	50		9
T6	25	75		9
T7	75	25		12
T8	50	50		12
T9	25	75		12
T10	75	25	Uréia-Formaldeído (UF)	6
T11	50	50		6
T12	25	75		6
T13	75	25		9
T14	50	50		9
T15	25	75		9
T16	75	25		12
T17	50	50		12
T18	25	75		12

Confecção e acondicionamento dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova foram confeccionados com o emprego de uma serra circular esquadrejadeira. Inicialmente, retirou-se cerca de 2 cm de cada extremidade dos painéis, com o intuito de evitar algum efeito de borda proporcionado no processo de produção, e em seguida foram retirados os corpos-de-prova, com suas dimensões de acordo com os ensaios aplicados. Para as propriedades físicas (Absorção de água e inchamento em espessura) foi empregada a norma ASTM – D1037-93 (2002); para as propriedades mecânicas (Módulos de ruptura e elasticidade na flexão estática) foi empregada a norma DIN 52362 (1982), e para ligação interna, a norma ASTM – D1037-93 (2002).

Os corpos-de-prova foram colocados em câmara de climatização e mantidos à temperatura de $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $(65 \pm 5)\%$, até atingirem a umidade de equilíbrio.

Análise estatística

Foi considerado um experimento em delineamento inteiramente casualizado com três repetições, em que os tratamentos estavam arranajados em um esquema fatorial $3 \times 3 \times 2$ (três porcentagens de bagaço de cana – 25%, 50% e 75%; três teores de adesivo – 6%, 9% e 12%; dois tipos de adesivos – fenol e uréia-formaldeído).

Como foi observada diferença estatística entre a densidade aparente média de cada tratamento, realizou-se uma análise de correlação entre a densidade dos painéis e cada uma das propriedades. Para as propriedades em que se observou correlação significativa procedeu-se a uma análise de covariância com as médias ajustadas para a densidade dos painéis, utilizando rotinas do software Statistical Analysis System (SAS, 1999).

Para a diferenciação dos tratamentos foi utilizado o teste de médias Tukey, com 5% de significância.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Densidade aparente e razão de compactação

Os valores médios obtidos para a densidade básica da madeira de eucalipto e do bagaço de cana foram de 0,560 e 0,098 g/cm³, respectivamente.

A densidade aparente média de cada tratamento e seus respectivos valores de razão de compactação estão apresentados na Tabela 2.

Os valores médios da densidade aparente dos painéis variaram na faixa de 0,618 a 0,665 g/cm³, estando, desta forma, todos os tratamentos classificados como painéis de média densidade, que se referem a painéis de densidade de 0,59 a 0,80 g/cm³ (IWAKIRI, 2005). Os baixos valores de densidade observados, tendo como base aquela nominal (0,70g/cm³), podem ser atribu-

Tabela 2. Valores médios da densidade aparente e razão de compactação dos painéis aglomerados de bagaço de cana com madeira de eucalipto.

Table 2. Mean values of the apparent density and compaction ratio of the sugar cane bagasse plus eucalyptus wood panels.

Associação de material		Adesivo		Densidade (g/cm ³)	Razão de compactação	
Bagaço de cana (%)	Eucalipto (%)	Tipo	%			
75	25	FF	6	0,665	3,116	
50	50		6	0,661	2,010	
25	75		6	0,618	1,390	
75	25		9	0,636	2,982	
50	50		9	0,649	1,975	
25	75		9	0,634	1,426	
75	25		12	0,655	3,071	
50	50		12	0,656	1,996	
25	75		12	0,636	1,431	
75	25		UF	6	0,663	3,111
50	50			6	0,640	1,945
25	75			6	0,645	1,451
75	25	9		0,648	3,037	
50	50	9		0,661	2,011	
25	75	9		0,646	1,453	
75	25	12		0,661	3,098	
50	50	12		0,664	2,018	
25	75	12	0,650	1,463		
CV(%)				1,99	1,08	

FF= Fenol-fomaldeído; UF= Uréia-Formaldeído.

idos à especificidade das condições laboratoriais em relação ao processo industrial, com perdas de materiais durante o manuseio das partículas nas etapas de aplicação de adesivo, formação do colchão e prensagem dos painéis.

Apenas os painéis produzidos com 25% de bagaço de cana apresentaram valores médios de razão de compactação estipulados como ideais por Kelly (1977), Moslemi (1974), Maloney (1993) e Tsoumis (1991), na faixa de 1,3 a 1,6. Tais resultados se devem à baixa densidade do material bagaço de cana (0,098 g/cm³) em comparação com a madeira de eucalipto (0,560 g/cm³), e como a razão de compactação é determinada pela relação entre a densidade do painel pela densidade do material lignocelulósico, tal valor aumenta conforme é adicionada maior porcentagem de bagaço na associação com madeira.

Propriedades físicas

Absorção de água em duas horas de imersão

De acordo com os resultados da análise de variância para absorção de água após duas horas de imersão em água, considerando a densidade dos painéis como covariável, os resultados experimentais mostram que os resíduos seguem uma distribuição normal, segundo o teste de Shapiro-Wilk (p-valor = 0,1564). A regressão linear significativa (p-valor = 0,0010) indica que existe uma relação linear entre essa propriedade e a densidade dos painéis. A estimativa do coeficiente de regressão linear indica que para o aumento de 0,01 g/cm³ na densidade dos painéis há uma redução de 2,95% na absorção de água em duas horas.

Os resultados mostram ainda que não existe efeito significativo para a porcentagem de bagaço de cana associada à madeira de eucalipto, assim como entre os adesivos e seus diferentes teores.

Absorção de água em vinte e quatro horas de imersão

De acordo com a análise de variância para absorção de água após vinte e quatro horas de imersão em água (AA 24h), os resultados experimentais mostram que os resíduos seguem uma distribuição normal segundo o teste de Shapiro-Wilk (p-valor=0,1624). A regressão linear não significativa (p-valor = 0,3367) indica que não existe uma relação linear entre essa variável e a densidade dos painéis.

Os resultados indicam um efeito significativo da interação tripla entre os fatores estudados (tipo de adesivo x teor de adesivo x porcentagem de substituição de madeira por bagaço de cana) para a propriedade AA 24h.

De acordo com a análise de desdobramento na Tabela 3, analisando os tipos de adesivos e seus diferentes teores dentro de cada porcentagem de associação de bagaço de cana, houve diferença estatística entre os tipos de adesivo apenas nos tratamentos que utilizaram 25% de bagaço de cana a 6% de teor de adesivo, 50% de bagaço de cana a 6% e 9% de teor de adesivo e com 75% de bagaço de cana a 9% de teor de adesivo, sendo que em todos os casos o adesivo FF apresentou-se com menor porcentagem de absorção de água. Observa-se ainda que para o adesivo FF não houve diferença estatística entre seus diferentes teores nas porcentagens de 25% e 50% de bagaço de cana, enquanto que para 75% de bagaço de cana os teores 9% e 12% foram estatisticamente superiores ao de 6%, absorvendo dessa forma menor porcentagem de água. Já para o adesivo UF, não houve diferença estatística entre seus diferentes teores nas porcentagens de 50% e 75% de bagaço de cana, enquanto que para 25% de bagaço de cana os teores 9% e 12% foram estatisticamente superiores ao de 6%.

Tabela 3. Valores médios de absorção de água após vinte e quatro horas de imersão, em porcentagem, em função dos tipos de adesivos e seus diferentes teores dentro de cada porcentagem de bagaço de cana.

Table 3. Mean values of water absorption after twenty-four hours of immersion, in percentage, depending on the types of adhesives and their different levels within each sugar cane bagasse percentage.

Porcentagem bagaço de cana	Teor de adesivo	Tipo de adesivo	
		FF	UF
25%	6%	30,06 (4,37) b A	53,10 (4,06) a A
	9%	24,44 (4,14) a A	16,66 (4,06) a B
	12%	26,28 (4,11) a A	21,81 (4,05) a B
50%	6%	22,84 (4,10) b A	36,30 (4,09) a A
	9%	22,16 (4,06) b A	38,46 (4,10) a A
	12%	17,36 (4,07) a A	28,12 (4,13) a A
75%	6%	35,67 (4,13) a A	29,43 (4,12) a A
	9%	17,16 (4,11) b B	30,61 (4,06) a A
	12%	13,33 (4,07) a B	21,56 (4,10) a A
CV (%) 26,05			

1- médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem entre si pelo teste t de Student com um nível nominal de significância de 5%;
2- médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna, dentro da combinação (porcentagem - adesivo) não diferem entre si pelo teste Tukey com um nível nominal de significância de 5%. Dentro dos parênteses encontra-se o erro-padrão.

De acordo com a análise de desdobramento na Tabela 4, analisando o efeito das diferentes porcentagens de associação de bagaço de cana em cada teor de adesivo e em cada tipo de adesivo, não houve diferenças estatísticas entre as porcentagens de associação de bagaço de cana dentro de seus diferentes teores de adesivo para FF. Para UF, com teor de 6% os painéis produzidos com 50% e 75% de bagaço de cana apresentaram-se estatisticamente superiores aos com 25%, absorvendo dessa forma menor porcentagem de água, para 9% os painéis produzidos com 25% de bagaço de cana se mostraram estatisticamente superiores, e para 12% não houve diferença estatística.

Iwakiri *et al.* (2000) estudando a produção de painéis aglomerados com a utilização de resíduos de serraria de *Eucalyptus maculata*, *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus tereticornis* e a mistura das três espécies, obtiveram valores médios de absorção de água para vinte e quatro horas de imersão na faixa de 37,37% a 58,80%. Neste sentido, o comportamento dos painéis de bagaço de cana produzidos em associação com madeira de eucalipto foi satisfatório em comparação aos resultados encontrados na literatura.

Inchamento em espessura em duas e vinte e quatro horas de imersão

De acordo com a análise de variância para inchamento em espessura a duas e vinte e quatro horas (IE 2h e IE 24h), considerando a densidade dos painéis como covariável para a propriedade IE 2h, os resultados experimentais mostram que os resíduos seguem uma distribuição normal segundo o teste de Shapiro-Wilk (p-valor=0,1475 e 0,2113, respectivamente). A regressão linear significativa para duas horas de imersão (p-valor = 0,0175) indica que existe uma relação linear entre essa propriedade e a densidade dos

painéis. A estimativa do coeficiente de regressão linear indica que para o aumento de 0,01 g/cm³ na densidade dos painéis há uma redução de 3,78% no inchamento em espessura em duas horas, enquanto que para vinte e quatro horas de imersão, tal regressão não se mostrou significativa (p-valor=0,0847) indicando que não existe uma relação linear entre essa propriedade e a densidade dos painéis.

Os resultados mostram ainda que não existe efeito significativo para a porcentagem de bagaço de cana associada à madeira de eucalipto para IE 2h e IE 24h. Em questão do tipo de adesivo, a UF mostrou-se estatisticamente superior, apresentando dessa forma menor IE a duas e a vinte e quatro horas em comparação aos painéis produzidos com FF (Tabela 5).

Tabela 5. Valores médios de inchamento em espessura após 2 e 24 horas de imersão, em função dos tipos de adesivo.

Table 5. Mean values of thickness swelling after 2 and 24 hours of immersion, depending on the type of adhesive.

Tipo de adesivo	IE 2h (%)	IE 24h (%)
FF	9,15 (0,52) a	18,16 (0,35) a
UF	7,06 (0,52) b	15,10 (0,35) b
CV (%)	33,07	10,76
*CS 236-66	-	35%

I - médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste t de Student com um nível nominal de significância de 5%. Dentro dos parênteses encontra-se o erro-padrão.

IE= Inchamento em espessura.

*Requisitos exigidos pela norma CS 236-66 (1968).

Para os diferentes teores de adesivo, todos se diferenciaram estatisticamente, sendo o teor de 12% superior aos demais, tanto para duas como em vinte e quatro horas de imersão (Tabela 6). Tal fato é explicado por uma maior quantidade de adesivo por partícula, o que causa uma melhor ligação entre as mesmas, gerando menor inchamento em espessura.

Tabela 4. Valores médios de absorção de água após vinte e quatro horas de imersão, em porcentagem, em função da porcentagem de bagaço de cana e dos diferentes teores de adesivo dentro de cada tipo de adesivo.

Table 4. Mean values of water absorption after twenty-four hours of immersion, in percentage, depending on the percentage of sugar cane bagasse and the different levels of adhesive within each kind of adhesive.

Tipo de adesivo	Teor de adesivo	Porcentagem bagaço de cana		
		25%	50%	75%
FF	6%	30,06 (4,37) a	22,84 (4,10) a	35,67 (4,13) a
	9%	24,44 (4,14) a	22,16 (4,06) a	17,16 (4,11) a
	12%	26,28 (4,11) a	17,36 (4,07) a	13,33 (4,07) a
UF	6%	53,10 (4,06) a	36,30 (4,09) b	29,43 (4,12) b
	9%	16,66 (4,06) b	38,46 (4,10) a	30,61 (4,06) a
	12%	21,81 (4,05) a	28,12 (4,13) a	21,56 (4,10) a
CV (%)	26,05			

I - médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem entre si pelo teste Tukey com um nível nominal de significância de 5%. Dentro dos parênteses encontra-se o erro-padrão.

Tabela 6. Valores médios de inchamento em espessura após 2 e 24 horas de imersão, em função dos teores de adesivo.

Table 6. Mean values of thickness swelling after 2 and 24 hours of immersion, depending on the levels of adhesive.

Teor de adesivo	IE 2h (%)	IE 24h (%)
6%	10,89 (0,63) a	22,68 (0,42) a
9%	7,68 (0,64) b	15,22 (0,42) b
12%	5,75 (0,64) c	11,99 (0,43) c
CV (%)	33,07	10,76
*CS 236-66	-	35%

I- médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey com um nível nominal de significância de 5%. Dentro dos parênteses encontra-se o erro-padrão.

IE= Inchamento em espessura.

*Requisitos exigidos pela norma CS 236-66 (1968).

Iwakiri *et al.* (2000) estudando a produção de painéis aglomerados com a utilização de resíduos de serraria, obtiveram valores médios de inchamento em espessura para duas e vinte e quatro horas de imersão em água, variando respectivamente de 12,38% a 30,60% e de 23,51% a 38,81%. Já a norma CS 236-66 estipula valores máximos de inchamento em espessura a vinte e quatro horas de imersão de 35% tanto para UF como para FF. Desta forma todos os tratamentos se encontram abaixo dos valores médios encontrados na literatura e também atenderam a norma. (CS, 1968).

Propriedades mecânicas

Módulo de elasticidade (MOE) e Módulo de ruptura (MOR)

De acordo com a análise de variância para o módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR), considerando a densidade dos painéis como covariável, os resultados experimentais mostram que os resíduos seguem uma distribuição normal segundo o teste de Shapiro-Wilk (p-valor=0,5887 e 0,7122, respectivamente). A regressão linear significativa para as duas propriedades (p-valor= 0,0017 e < 0,0001, respectivamente) indica que existe uma relação linear entre essas propriedades e a densidade dos painéis. Para MOE a estimativa do coeficiente de regressão linear indica que para o aumento de 0,01 g/cm³ na densidade dos painéis há um aumento de 1014,86 kgf/cm². Já para MOR a estimativa do coeficiente de regressão linear indica que para o aumento de 0,01 g/cm³ na densidade dos painéis há um aumento de 18,37 kgf/cm².

Para MOE não foi observado efeito significativo das diferentes porcentagens de bagaço de cana associada à madeira de eucalipto. Enquanto que para MOR, observou-se tal diferença, sendo

a porcentagem de 75% estatisticamente superior às de 25% e 50% que se mostraram estatisticamente iguais (Tabela 7), podendo tal fato estar relacionado à maior razão de compactação dos painéis produzidos com 75% de bagaço de cana, gerada pela baixa densidade desse material (0,098g/cm³), o que significa um maior número de partículas na formação do colchão do painel, que depois da prensagem e aliado ao amolecimento da lignina do material devido à aplicação de temperatura, faz com que as partículas passem a ter um maior contato entre elas, apresentando dessa forma maior resistência a flexão. Assim, como também, pode ser em função da melhor relação dos adesivos com o material bagaço de cana do que em relação à madeira de eucalipto, o que deve ser mais bem entendido.

Analisando a influência do tipo de adesivo, tanto para MOE como para MOR, a UF mostrou-se estatisticamente superior a FF (Tabela 8).

Tabela 7. Valores médios de módulo de ruptura, em função das porcentagens de bagaço de cana.

Table 7. Mean values of modulus of rupture, related to the percentage of sugar cane bagasse.

Porcentagem bagaço de cana	MOR (kgf/cm ²)
25%	117,41 (3,03) b
50%	124,00 (2,90) b
75%	150,39 (2,89) a
CV(%)	9,26
*CS 236-66	126 (FF) 112 (UF)

I- médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey com um nível nominal de significância de 5%. Dentro dos parênteses encontra-se o erro-padrão.

MOR= Módulo de ruptura.

*Requisitos exigidos pela norma CS 236-66 (1968).

Tabela 8. Valores médios de módulo de elasticidade e ruptura, em função dos tipos de adesivo.

Table 8. Mean values of elasticity modulus and rupture, according on the type of adhesive.

Tipo de adesivo	MOE (kgf/cm ²)	MOR (kgf/cm ²)
FF	9.463,85 (163,87) b	119,09 (2,35) b
UF	10.436,81 (163,87) a	142,12 (2,35) a
CV(%)	8,46	9,26
*CS 236-66	17500 (FF) 24500 (UF)	126 (FF) 112 (UF)

I- médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste t de Student com um nível nominal de significância de 5%. Dentro dos parênteses encontra-se o erro-padrão.

MOR= Módulo de ruptura;

MOE= Módulo de elasticidade.

*Requisitos exigidos pela norma CS 236-66 (1968).

Já em questão dos diferentes teores de adesivos, para MOE os teores 9% e 12% não se diferenciaram estatisticamente, ficando estes superiores aos valores obtidos para 6%; e para MOR,

todos os teores diferenciaram estatisticamente, sendo o teor de 12% superior aos demais (Tabela 9), explicado pelo fato de que quanto maior a quantidade de adesivo aplicada na produção dos painéis, melhor a ligação entre as partículas, o que resulta em maior resistência à flexão.

Tabela 9. Valores médios de módulo de elasticidade e ruptura, em função dos teores de adesivo.

Table 9. Mean values of elasticity modulus and rupture, according on the levels of adhesive.

Teor de adesivo	MOE (kgf/cm ²)	MOR (kgf/cm ²)
6%	9.134,80 (198,68) b	113,72 (2,85) c
9%	10.089,59 (199,97) a	134,63 (2,87) b
12%	10.626,59 (200,53) a	143,46 (2,88) a
CV(%)	8,46	9,26
*CS 236-66	17500 (FF)	126 (FF)
	24500 (UF)	112 (UF)

I - médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey com um nível nominal de significância de 5%. Dentro dos parênteses encontra-se o erro-padrão.

MOR= Módulo de ruptura;

MOE= Módulo de elasticidade.

*Requisitos exigidos pela norma CS 236-66 (1968).

Mendes *et al.* (2008b) comparando painéis comerciais produzidos com bagaço de cana na China com os painéis comerciais produzidos no Brasil com a madeira de eucalipto e pinus obtiveram valores médios para MOE de 16194,98 kgf/cm² para eucalipto e de 16561,20 kgf/cm² para bagaço de cana, enquanto que para MOR os valores médios foram de 198,66 kgf/cm² para eucalipto e 218,03 kgf/cm² para bagaço de cana. Já a norma CS 236-66 estipula valores mínimos para MOE de 24500 kgf/cm² para o adesivo UF e de 17500 kgf/cm² para FF. Para a propriedade MOR os valores mínimos estipulados pela norma são de 112 kgf/cm² para UF e de 126 kgf/cm² para FF. Diante disso, os painéis produzidos com bagaço de cana em associação com a madeira de eucalipto ficaram abaixo dos valores obtidos pela literatura. Em comparação com a norma, os valores médios de MOE ficaram abaixo dos valores mínimos estipulados, podendo ser resultado da não retirada da medula do bagaço de cana, assim como também da interação entre o bagaço de cana e a madeira de eucalipto, a qual deve ser melhor entendida; enquanto que para MOR apenas os painéis produzidos com o adesivo UF apresentaram valores acima do mínimo estipulado.

Compressão paralela à superfície do painel

De acordo com a análise de variância para compressão paralela, os resultados experimen-

tais mostram que os resíduos seguem uma distribuição normal segundo o teste de Shapiro-Wilk (p-valor=0,2414). A regressão linear não significativa (p-valor = 0,2011) indica que não existe uma relação linear entre essa propriedade e a densidade dos painéis.

Os resultados mostram um efeito significativo para a porcentagem de bagaço de cana associada à madeira de eucalipto (Tabela 10), sendo que os painéis produzidos com 75% de bagaço de cana se mostraram estatisticamente superiores aos produzidos com 50%, mas igual aos de 25% de bagaço de cana. Tal fato pode ser explicado pela baixa densidade do material bagaço de cana, o que gera uma maior quantidade de partículas por área, apresentando maiores resistências à compressão. Em questão dos painéis produzidos com 25% de bagaço de cana ser estatisticamente igual aos de 75%, tal situação pode ter acontecido pela interação entre os diferentes tipos de partículas, a qual deve ser melhor entendida.

Tabela 10. Valores médios de compressão paralela, em função das porcentagens de bagaço de cana.

Table 10. Mean values of parallel compression, related to the percentage of sugar cane bagasse.

Porcentagem Bagaço de cana	Compressão paralela (kgf/cm ²)
25%	45,60 (2,28) ab
50%	42,28 (2,19) b
75%	51,07 (2,18) a
CV(%)	19,67

I - médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey com um nível nominal de significância de 5%. Dentro dos parênteses encontra-se o erro-padrão.

Em questão do tipo de adesivo não foi observado diferença estatística, enquanto que para os teores de adesivo, os painéis produzidos com 12% se mostraram estatisticamente superiores aos produzidos com 6% e 9%, os quais se mostraram estatisticamente iguais (Tabela 11).

Tabela 11. Valores médios de compressão paralela, em função dos teores de adesivo.

Table 11. Mean values of parallel compression, related to the levels of adhesive.

Teor de adesivo	Compressão Paralela (kgf/cm ²)
6%	42,91 (2,15) b
9%	44,63 (2,16) b
12%	51,41 (2,17) a
CV(%)	19,67

I - médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey com um nível nominal de significância de 5%. Dentro dos parênteses encontra-se o erro-padrão.

Guimarães Júnior (2008), avaliando a qualidade da madeira de três espécies de eucalipto de diferentes procedências para a produção de painéis aglomerados convencional, obteve valores variando entre 58,02 a 66,64 kgf/cm² para *Eucalyptus cloeziana*; entre 44,70 a 59,73 kgf/cm² para *Eucalyptus grandis*; e entre 52,34 a 58,97 kgf/cm² para *Eucalyptus saligna*. Diante disso, os painéis produzidos com bagaço de cana em associação com a madeira de eucalipto estão próximos aos valores obtidos pela literatura.

Ligação interna

De acordo com a análise de variância para a ligação interna, considerando a densidade dos painéis como covariável, os resultados experimentais mostram que os resíduos seguem uma distribuição normal segundo o teste de Shapiro-Wilk (p-valor=0,1119). A regressão linear significativa (p-valor= 0,0194) indica que existe uma relação linear entre essa propriedade e a densidade dos painéis. A estimativa do coeficiente de regressão linear indica que para o aumento de 0,01 g/cm³ na densidade dos painéis há um aumento de 1,09 kgf/cm² na ligação interna.

Os resultados mostram efeito significativo para a porcentagem de bagaço de cana associada à madeira de eucalipto (Tabela 12), sendo que os painéis produzidos com 25% de bagaço de cana se mostraram estatisticamente superior aos produzidos com 50% e 75%. Tal fato pode ser explicado pela menor densidade do material bagaço de cana, pois para se conseguir uma densidade pré-determinada do painel é necessário um maior número de partículas por área, o que gera menor quantidade de adesivo por partícula, diminuindo assim os valores de resistência a ligação interna.

Tabela 12. Valores médios de ligação interna, em função das porcentagens de bagaço de cana.

Table 12. Mean values of internal bonding, related to the percentage of sugar cane bagasse.

Porcentagem bagaço de cana	Ligação interna (kgf/cm ²)
25%	6,42 (0,22) a
50%	5,66 (0,21) b
75%	5,18 (0,21) b
CV(%)	15,34
*CS 236-66	4,20 kgf/cm ²

I- médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey com um nível nominal de significância de 5%. Dentro dos parênteses encontra-se o erro-padrão.

*Requisitos exigidos pela norma CS 236-66 (1968).

Observou-se um efeito significativo da interação entre os fatores estudados, tipo de adesivo e teor de adesivo. De acordo com a análise de desdo-

bramento na Tabela 13, houve diferença estatística entre os tipos de adesivos em todos os teores estudados, sendo a UF superior a FF. Na análise dos diferentes teores dentro de cada tipo de adesivo, para FF os teores de 9% e 12% mostraram-se estatisticamente iguais, mas superiores a 6%, enquanto que para UF houve diferença estatística entre todos os teores estudados, sendo 12% superior aos demais.

Tabela 13. Valores médios de ligação interna, em kgf/cm², em função dos teores e tipo de adesivo.

Table 13. Mean values of internal bonding, measured in kgf/cm², according on the levels and type of adhesive.

Teor de adesivo	Tipo de adesivo	
	FF	UF
6%	3,43 (0,29) b B	5,24 (0,29) a C
9%	5,16 (0,30) b A	6,75 (0,29) a B
12%	5,39 (0,29) b A	8,51 (0,30) a A
CV(%)	15,34	
*CS 236-66	4,20 kgf/cm ²	

I- médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem entre si pelo teste t de Student com um nível nominal de significância de 5%; 2- médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey com um nível nominal de significância de 5%. Dentro dos parênteses encontra-se o erro-padrão.

*Requisitos exigidos pela norma CS 236-66 (1968).

Mendes *et al.* (2008b), comparando painéis comerciais produzidos com bagaço de cana na China e os painéis comerciais produzidos no Brasil com a madeira de eucalipto e pinus, obtiveram valores médios para ligação interna para bagaço de cana de 2,37 kgf/cm² e para eucalipto de 5,70 kgf/cm². Diante disso, os painéis produzidos com bagaço de cana em associação com a madeira de eucalipto apresentaram valores acima dos encontrados na literatura para painéis comerciais produzidos com bagaço de cana, e em comparação com os painéis comerciais de eucalipto, apenas os produzidos com UF com 9% e 12% se demonstraram satisfatórios.

A norma CS 236-66 estipula valores mínimos para ligação interna de 4,2 kgf/cm² para painéis produzidos com UF e FF, estando desta forma todos os painéis produzidos com UF de acordo com a norma, e para FF apenas os produzidos com 6% de teor de adesivo não atenderam a mesma.

CONCLUSÃO

Pelos resultados obtidos pode-se concluir que: O adesivo uréia-formaldeído mostrou-se estatisticamente igual ou superior a Fenol-formaldeído em todas as propriedades avaliadas, com exceção de absorção de água a vinte e quatro horas de imersão;

Para os testes físicos, não houve diferença significativa para as diferentes porcentagens de associação de bagaço de cana. Para os teores de adesivo, nas propriedades IE 2h e IE 24h, 12% foi estatisticamente superior aos demais, os quais foram estatisticamente diferentes; na propriedade AA 2h não foi observada diferença estatística; e na propriedade AA 24h houve diferença apenas para os painéis com FF e 75% de bagaço de cana e para UF e 25% de bagaço de cana, sendo 12% e 9% estatisticamente iguais e superiores a 6%. Apesar disso, todos os tratamentos atenderam a norma CS 236-66;

Para os testes mecânicos, não houve diferença estatística das porcentagens de associação de bagaço de cana apenas para a propriedade MOE; para MOR os painéis produzidos com 75% de bagaço de cana apresentaram-se estatisticamente superiores; para compressão paralela, os produzidos com 25% e 75%, e para ligação interna os com 25% de bagaço. Em questão do teor de adesivo, 12% foi o que apresentou melhores resultados para MOR, compressão paralela e ligação interna, enquanto que para MOE, 9% e 12% foram estatisticamente iguais;

O tratamento que obteve melhores resultados foi UF a 12% e 75% de bagaço de cana, atendendo os valores estipulados pela norma CS 236-66, com exceção do MOE. Apesar disso os painéis produzidos com UF a 6% e 75% de bagaço de cana atenderam também à norma em todas as propriedades, com exceção também do MOE, sendo a alternativa economicamente mais viável.

Sugere-se a continuação de pesquisas nesta linha, incluindo manipulações das variáveis de produção, e estudos sobre a interação entre a madeira de eucalipto e o bagaço de cana, a fim de que todos os resultados se adequem à norma.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Normas técnicas NBR 11941 - Madeira - Determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6p.

ANSELMINI, R. Diversificação industrial inclui bioeletricidade, levedura, plástico biodegradável e gás carbônico. *Jornal cana, tecnologia industrial*, Ribeirão Preto, p.58, dez. 2007.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Annual book of ASTM: D-1037 - Standard methods of evaluating properties of wood-base fiber and particles materials*. Philadelphia, 2002.

CS - COMMERCIAL STANDARD. CS 236-66: *mat formed wood particleboard*. [S.l.], 1968.

DIN - NORMEN FÜR HOLZFASERPLATEN SPANPLATTEN SPERRHOLZ. *Testing of wood chipboards bending test, determination of bending strength: DIN 52362*. Berlin, 1982. p. 39-40.

GUIMARÃES JÚNIOR, J.B. *Painéis de madeira de eucalipto: estudo de caso de espécies e procedências*. 2008. 95p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Anuário estatístico do Brasil*. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/lspa_201002_5.shtm>. Acesso em: 15 março 2010.

IWAKIRI, S. *Painéis de madeira reconstituída*. Curitiba: FUPEF, 2005. 274p.

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

KELLY, M.W. Critical literature review of relationships between processing parameters and physical properties of particleboard. *USDA. Forest Service. FPL General Technical Report*, Madison, n.10, p.1-66, 1977.

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

MENDES, R.F. *Utilização do bagaço de cana de alambique na produção de painéis aglomerados*. 2008. 104p. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008a.

- MENDES, R.F.; MENDES, L.M.; GUIMARÃES JÚNIOR, J.B.; MENDONÇA, L.L. Qualidade de painéis aglomerados produzidos na China utilizando bagaço de cana. In: EBRAMEM - ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 11, 2008, Londrina. **Anais...** Londrina, 2008b.
- MENDES, R.F.; MENDES, L.M.; GUIMARAES JUNIOR, J.B.; SANTOS, R.C. ; BUFALINO, L. The adhesive effect on the properties of particleboards made from sugar cane generated in the distiller. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v.32, n.2, p.209-218, 2009.
- MOSLEMI, A.A. **Particleboard**. Illinois: Southern Illinois University Press, 1974. 244p.
- OKINO, E.Y.A.; ANDAHUR, J.P.V.; SANTANA, M.A.E.; SOUZA, M.R. Resistência físico-mecânica de chapas aglomeradas de bagaço de cana-de-açúcar modificado quimicamente. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.52, p.35-42, 1997.
- 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 based composites**. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2000. p.115-134.
- SAS INSTITUTE. **SAS procedures guide for computers**. 6.ed. Cary, 1999. v.3, 373p.
- SILVA, V.L.M.M; GOMES, W.C.O.; ALSINA, L.S. Utilização do bagaço de cana de açúcar como biomassa adsorvente na adsorção de poluentes orgânicos. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, Campina Grande, v.2, p.27-32, 2007.
- VITAL, B.R.; LEHMANN, W.F; BOONE, R.S. How species and board densities affect properties of exotic hardwood particleboards. **Forest Products Journal**, Madison, v.24, n.12, p.37-45, 1974.
- TSOUMIS, G. **Science and technology of wood: structure, properties, utilization**. New York: Chapman & Hall, 1991. 494p.

Recebido em 17/09/2009
Aceito para publicação em 04/05/2010

