

Estabilidade térmica de painéis aglomerados de
bagaço de cana-de-açúcar e madeira de *Pinus* spp.Thermal stability of particleboards of sugar
cane bagasse and *Pinus* spp. WoodThiago de Paula Protásio¹, Rafael Farinassi Mendes², Mário Vanoli Scatolino³,
Lourival Marin Mendes⁴, Paulo Fernando Trugilho⁴ e Isabel Cristina Nogueira Alves de Melo⁵**Resumo**

O objetivo deste trabalho foi avaliar a estabilidade térmica de painéis aglomerados produzidos com distintas porcentagens de bagaço de cana-de-açúcar em associação com a madeira de *Pinus* spp. e, diferentes teores de adesivo ureia-formaldeído, visando compreender melhor a degradação térmica dessas chapas quando submetidas a situações de calor intenso. Foram avaliados nove tratamentos, sendo estes compostos por painéis produzidos com diferentes quantidades de bagaço de cana-de-açúcar em substituição a madeira de *Pinus* (25, 50 e 75%) e em associação com três teores de adesivo ureia-formaldeído (6, 9 e 12%). As amostras de, aproximadamente, 5 mg foram acondicionadas em cápsulas de alumina e, as análises, realizadas em uma atmosfera de nitrogênio com fluxo de 50 mililitros por minuto. A taxa considerada foi de 10°C por minuto até a temperatura final de 600°C. As curvas termogravimétricas foram divididas em dois estágios, conforme as variações máximas de massa obtidas. Foi realizada, ainda, a termogravimetria derivada (DrTGA), que é a derivada primeira da curva TGA. Observou-se que, independentemente da quantidade de adesivo utilizada, o acréscimo de bagaço de cana e, conseqüentemente, o decréscimo da madeira de *Pinus* spp., resultou na diminuição da estabilidade térmica dos painéis aglomerados. Quanto ao efeito do aumento do teor de adesivo na manufatura dos painéis, observou-se que há uma tendência de diminuição da temperatura *onset* e de pico e aumento da perda de massa para o principal estágio de degradação, principalmente quando se compararam os painéis produzidos com 6% e 12% de adesivo ureia-formaldeído.

Palavras-chave: perda de massa, termogravimetria, decomposição térmica.

Abstract

The objective of this study was to evaluate the thermal stability of particleboards produced with different percentages of sugar cane bagasse, in combination with *Pinus* spp. wood, and different levels of urea-formaldehyde adhesive, in order to better understand the thermal degradation of these boards at intense heat situations. Nine treatments were evaluated, comprised of particleboards produced with different amounts of sugar cane bagasse, in replacement of *Pinus* wood (25, 50 and 75%), and in combination with three levels of urea-formaldehyde adhesive (6, 9 and 12%). Samples of approximately 5 mg were placed in alumina capsules and analyses were performed in a nitrogen atmosphere with a flow rate of 50 milliliters per minute. The rate employed was 10°C per minute until the final temperature of 600°C. The thermogravimetric curves were divided into two stages, according to the maximum mass variations obtained. Derivative thermo-gravimetry (DrTGA), which is the first derivative of the TGA curve, was also performed. It was observed that, regardless of the amount of adhesive used, the addition of sugar cane bagasse and, consequently, the decrease in *Pinus* spp. wood, resulted in the decrease in the thermal stability of particleboards. Regarding the effect of the increase in the content of adhesive on the manufacture of the particleboards, it was observed that there is a decreasing trend in the onset temperature and in the peak, and an increase in mass loss for the main degradation stage, especially when the particleboards produced with 6% and 12% urea-formaldehyde adhesive are compared.

Keywords: mass loss, thermogravimetry, thermal decomposition.

¹Doutorando em Ciência e Tecnologia da Madeira. UFLA – Universidade Federal Lavras. Caixa Postal 3037 - Lavras, MG - 37200-000. E-mail: depaulaprotasio@gmail.com.

²Professor Adjunto do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras. UFLA – Universidade Federal Lavras. Caixa Postal 3037 - Lavras, MG - 37200-000. E-mail: rafaelfarinassi@gmail.com.

³Doutorando em Engenharia de Biomateriais UFLA – Universidade Federal Lavras. Caixa Postal 3037 - Lavras, MG - 37200-000. E-mail: mario_paraíso@hotmail.com.

⁴Professor Titular do Departamento de Ciências Florestais. UFLA – Universidade Federal Lavras. Caixa Postal 3037 - Lavras, MG - 37200-000. E-mail: lourival@dcf.ufla.br; trugilho@dcf.ufla.br.

⁵Doutora em Ciência e Tecnologia da Madeira. UFLA – Universidade Federal Lavras. Caixa Postal 3037 - Lavras, MG - 37200-000. E-mail: isabelnogueiraalves@gmail.com.

INTRODUÇÃO

A cadeia produtiva do setor brasileiro de base florestal associado às florestas plantadas caracteriza-se pela grande diversidade de produtos, compreendendo a produção, a colheita, o transporte e a industrialização da madeira. No entanto, necessita-se de uma diversificação do setor, especialmente dos painéis reconstituídos, por meio da introdução de novas matérias-primas nas indústrias, pois isso poderá contribuir decisivamente no aumento da produção industrial de painéis, sem a necessidade de implantação de novos plantios florestais.

Aliado a isso, o crescimento da população no planeta impulsiona as empresas florestais a aumentar sua produção, seja de painéis de madeira industrializada, de madeira processada mecanicamente, de siderurgia a carvão vegetal, de biomassa para geração de energia e dos diversos produtos finais nos segmentos industriais de papel e celulose (ABRAF, 2013; IBÁ, 2014).

Especificamente, quanto aos painéis reconstituídos de madeira, tem-se verificado um aumento da produção e exportação, além disso, as perspectivas do cenário atual são positivas e refletem o interesse do mercado consumidor interno por esses produtos. O aumento de renda da população brasileira e o crescimento da construção civil são fatores que impulsionaram o consumo interno desses produtos nos últimos anos (IBÁ, 2014).

Em 2013, a produção brasileira de painéis reconstituídos (MDF, MDP e HDF) foi de 7,9 milhões de metros cúbicos, um aumento de 8% em relação à produção de 2012 (IBÁ, 2014). Ainda segundo a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2014), o Brasil é o oitavo produtor mundial de painéis de madeira reconstituídos, com pouco mais de 3% do volume total, evidenciando a importância do setor de painéis para a cadeia produtiva florestal e a necessidade de pesquisas científicas para subsidiar o crescimento e a inovação tecnológica das indústrias de painéis reconstituídos, principalmente dos aglomerados/MDP.

Os painéis de madeira, especialmente os aglomerados, permitem melhor aproveitamento da matéria-prima lignocelulósica e apresentam certas vantagens em relação a outros materiais convencionais, por serem renováveis e biodegradáveis.

Ademais, na manufatura desses painéis, pode-se agregar valor a materiais de baixa aceitação, como madeiras de desbastes, resíduos do

processamento mecânico da madeira e resíduos agroindustriais, como o bagaço de cana. Nesse sentido, o uso desse material lignocelulósico, na produção de painéis, permite agregar valor ao resíduo e estocar carbono de forma eficiente. Outra grande vantagem dos painéis aglomerados consiste na possibilidade de diminuir a variabilidade da madeira, ou da biomassa lignocelulósica residual, que é oriunda de fatores químicos, físicos, mecânicos e anatômicos intrínsecos.

Nesse sentido, o Brasil se destaca como um grande produtor de cana-de-açúcar, destinada à atividade sucroalcooleira, com produção de 659.850.100 toneladas em uma área cultivada de 8.810.790 hectares (CONAB, 2013). Quanto à disponibilidade atual de bagaço de cana, Dias et al. (2012) relataram que a cada tonelada de cana moída tem-se 0,27 toneladas de bagaço. Logo, se pode constatar que o Brasil apresentou em 2013 178.159.527 toneladas de bagaço disponível para ser reutilizado pela indústria. Contudo, grande parte dessa matéria-prima é utilizada na cogeração de energia elétrica e no fornecimento de calor ao processo industrial, o que agrega baixo valor ao bagaço de cana comparativamente à produção industrial de painéis aglomerados/MDP.

Na literatura já é relatada a potencialidade de uso do bagaço de cana-de-açúcar (MENDES et al., 2010a; MENDES et al., 2012; FIORELLI et al., 2013) e de outros materiais lignocelulósicos (MENDES et al., 2010b; IWAKIRI et al., 2012; SCATOLINO et al., 2013; MENDES et al., 2013; TRIANOSKI et al., 2013; GUIMARÃES et al., 2014;) na manufatura de painéis aglomerados. Isso poderá impactar positivamente o mercado de painéis reconstituídos, pois segundo Mendes et al. (2012) o bagaço de cana utilizado na produção de painéis aglomerados (convencional ou MDP), além de sofrer uma agregação de valor, pode ajudar a atender à demanda da indústria de painéis. Os autores ainda afirmaram que isso poderá causar uma redução nos custos de produção e, conseqüentemente, tornar o setor mais competitivo no cenário econômico nacional e internacional.

Contudo, apesar dessa potencialidade do uso do bagaço de cana na manufatura de painéis reconstituídos, ainda são escassas as pesquisas que avaliam o efeito da associação desse resíduo lignocelulósico com a madeira de *Pinus* na estabilidade térmica dos painéis aglomerados e isso limita a aplicação dessa matéria-prima pela indústria. Provavelmente, as diferenças químicas

moleculares entre a madeira de *Pinus* e o bagaço de cana (PAULA et al., 2011; SANTOS et al., 2011; PROTÁSIO et al., 2013a) poderão afetar, consideravelmente, o comportamento dos painéis durante a combustão e pirólise; visto que, esses processos termoquímicos podem ocorrer durante um incêndio residencial.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a estabilidade térmica de painéis aglomerados produzidos com distintas porcentagens de bagaço de cana-de-açúcar em associação com a madeira de *Pinus* spp. e, diferentes teores de adesivo ureia-formaldeído, visando compreender melhor a degradação térmica dessas chapas quando submetidas a situações de calor intenso.

MATERIAL E MÉTODOS

Os painéis aglomerados foram produzidos com a associação de bagaço de cana (*Saccharum officinarum* L.) com a madeira de *Pinus* spp. O bagaço de cana foi obtido de um alambique de produção artesanal de cachaça, localizado na cidade de Lavras, sul do estado de Minas Gerais. Já a madeira de *Pinus* spp., foi proveniente de plantios experimentais localizados no câmpus da Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG.

O bagaço de cana foi utilizado da mesma forma em que foi coletado no alambique, ou seja, sem que houvesse a retirada da medula. As toras de madeira de *Pinus* spp., por sua vez, foram desdobradas em tábuas, com espessura nominal de 25 mm, mediante a utilização de uma serra de fita e, então, com o auxílio de uma serra circular, transformadas em blocos de 90 x 200 x 25 mm. Posteriormente, os blocos foram transformados manualmente em cavacos com, aproximadamente, 10 – 12 mm de espessura por meio de um facão. Os cavacos de madeira e o bagaço de cana foram, na sequência, triturados em um moinho

de martelos, com uma peneira de abertura de 6 mm, para a geração das partículas do tipo *sliver*.

Com as partículas prontas, as mesmas foram secas até atingirem 3% de umidade, com a utilização de uma estufa de circulação forçada de ar a 103±2 °C. A umidade das partículas foi monitorada por meio de retiradas periódicas de amostras de, aproximadamente, 5 g e obtida utilizando-se um medidor automático de infravermelho da marca Gehaka® modelo IV200. Este material seco, em seguida, foi encaminhado para uma encoladeira, onde foi aplicado o adesivo ureia-formaldeído, na porcentagem de acordo com o delineamento experimental, demonstrado na Tabela 1 e, também, 1% de parafina (base massa seca das partículas) para todos os tratamentos. Para cada tratamento foram produzidos três painéis com densidade nominal de 0,70 g/cm³.

Após encoladas, as partículas foram depositadas em uma caixa formadora de colchão, com dimensões de 48 cm x 48 cm, para a realização da pré-prensagem, a qual ocorreu em uma prensa manual a 0,8 MPa. Posteriormente, o colchão foi levado para uma prensagem a quente, com temperatura de 160 °C, pressão de 4 MPa e por um intervalo de tempo de 8 minutos.

A biomassa lignocelulósica utilizada na manufatura dos painéis foi amostrada aleatoriamente e submetida à análise química, conforme consta na Tabela 2, sendo os ensaios realizados em triplicata. O teor de holocelulose foi obtido por diferença, conforme a Equação 1:

$$\text{Holocelulose (\%)} = 100\% - \text{Extrativos (\%)} - \text{Lignina (\%)} - \text{Cinzas (\%)} \quad (1)$$

Utilizaram-se amostras compostas por três repetições (painéis) para cada tratamento, para a realização dos ensaios de termogravimetria (TGA). As amostras dos painéis, obtidas por meio de uma plaina elétrica manual, foram reduzidas

Tabela 1. Delineamento experimental.

Table 1. Experimental design.

Tratamentos	Denominação	Associação de material		Adesivo (%)
		Bagaço de cana (%)	Pinus (%)	
1	BC75 - A6	75	25	
2	BC50 - A6	50	50	6
3	BC25 - A6	25	75	
4	BC75 - A9	75	25	
5	BC50 - A9	50	50	9
6	BC25 - A9	25	75	
7	BC75 - A12	75	25	
8	BC50 - A12	50	50	12
9	BC25 - A12	25	75	

Tabela 2. Normas utilizadas para as análises químicas.
Table 2. Standards used for chemical analysis.

Análise	Norma utilizada
Teor de extrativos totais	ABNT NBR 14853 (2010)
Teor de cinzas	ABNT NBR 13999 (2003)
Teor de lignina insolúvel	ABNT NBR 7989 (2010)
Teor de holocelulose	Equação 1

a pó em um moinho de facas. Após classificadas, utilizou-se, para o ensaio térmico, a fração granulométrica que passou pela peneira de 200 *mesh* e ficou retida na peneira de 270 *mesh*.

Para a análise termogravimétrica, foi utilizado o equipamento DTG-60H da marca SHIMADZU. As amostras de, aproximadamente, 5 mg, foram submetidas a um gradiente de temperatura variando da temperatura ambiente até 600°C, com taxa de aquecimento de 10°C min⁻¹ e fluxo de nitrogênio de 50 mL min⁻¹.

Utilizando-se a primeira derivada da curva TGA, que estabelece a perda de massa em função da temperatura, foi possível identificar a taxa de perda de massa por segundo e os picos característicos de degradação térmica dos painéis aglomerados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A perda de massa, em função da temperatura (curva TGA) dos painéis de bagaço de cana e madeira de *Pinus* spp., produzidos com 6, 9 e 12% de adesivo ureia-formaldeído, pode ser visualizada nas Figuras 1, 2 e 3, respectivamente.

Observa-se que, independentemente da quantidade de adesivo utilizada, o acréscimo de bagaço de cana e, conseqüentemente, o decréscimo da madeira de *Pinus* spp., resultaram na diminuição da estabilidade térmica dos painéis aglomerados. Com base nesses resultados pode-se compreender melhor a degradação térmica dos painéis aglomerados produzidos com bagaço de cana-de-açúcar e madeira de *Pinus* quando submetidos a situações de calor intenso e escassez de oxigênio, como num incêndio residencial em que ocorre, além da combustão, pirólise. Logo, nessas situações de intensa exposição ao calor, os painéis produzidos com maiores quantidades de bagaço de cana tendem a se degradar mais rapidamente.

A volatilização da biomassa e, conseqüentemente, a sua degradação térmica, depende da sua composição química molecular, ou seja, dos teores de holocelulose, lignina e extrativos (GANI; NARUSE, 2007). É relatada na literatura a menor estabilidade térmica dos carboidratos

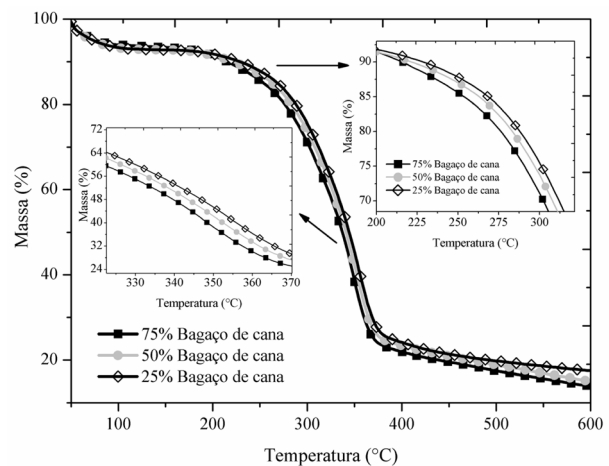


Figura 1. Curvas TGA dos painéis produzidos com bagaço de cana-de-açúcar e madeira de *Pinus* spp. com 6% de adesivo ureia-formaldeído.

Figure 1. TGA curves of the panels produced with sugar cane bagasse and *Pinus* spp. wood with 6% urea-formaldehyde adhesive.

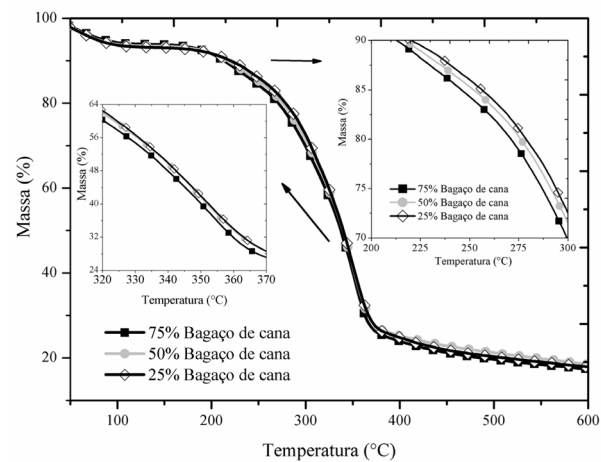


Figura 2. Curvas TGA dos painéis produzidos com bagaço de cana-de-açúcar e madeira de *Pinus* spp. com 9% de adesivo ureia-formaldeído.

Figure 2. TGA curves of the panels produced with sugar cane bagasse and *Pinus* spp. wood with 9% urea-formaldehyde adhesive.

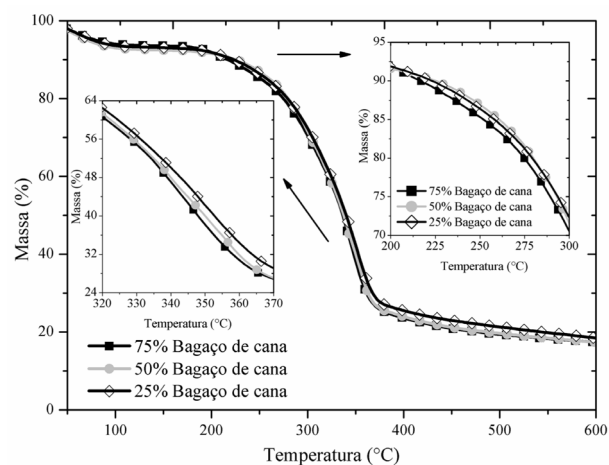


Figura 3. Curvas TGA dos painéis produzidos com bagaço de cana-de-açúcar e madeira de *Pinus* spp. com 12% de adesivo ureia-formaldeído.

Figure 3. TGA curves of the panels produced with sugar cane bagasse and *Pinus* spp. wood with 12% urea-formaldehyde adhesive.

presentes na biomassa lignocelulósica, ou seja, a holocelulose se degrada em baixas temperaturas (GANI; NARUSE, 2007; POLETTTO et al., 2012; CARNEIRO et al., 2013; PEREIRA et al., 2013; PROTÁSIO et al., 2013b).

Já a lignina apresenta maior estabilidade térmica, pois apresenta uma matriz predominantemente aromática e tridimensional, constituída de unidades de fenilpropano que conferem à molécula elevada resistência a degradação térmica (SHARMA et al., 2004; GANI; NARUSE, 2007; YANG et al., 2007; NAKAMURA et al., 2008; BURHENNE et al., 2013).

Dessa forma, se pode constatar que o bagaço de cana apresenta maiores teores de hemiceluloses e de celulose (holocelulose), assim como de extrativos (Tabela 3), sendo que isso, provavelmente, resultou na diminuição da estabilidade térmica dos painéis. Logo, em uma situação de incêndio residencial ou de elevada exposição ao calor, painéis aglomerados, produzidos com maiores quantidades relativas de bagaço de cana, podem se degradar mais rapidamente, comparativamente aos painéis de madeira de *Pinus* spp.

Quanto à influência do teor de extrativos totais, Guo et al. (2010) afirmaram que essas substâncias decompõem-se entre as temperaturas de 150-600 °C, e diminuem a energia de ativação da pirólise da madeira. Logo, pode-se afirmar que, a presença de extrativos no bagaço de cana, componentes de baixa massa molecular, em quantidades superiores a madeira de *Pinus*, pode acelerar o processo de degradação térmica dos painéis (SHEBANI et al., 2008; GUO et al., 2010).

Nesse sentido, Paula et al. (2011) observaram baixo teor de lignina no bagaço de cana (20,9%) e um elevado teor de extrativos totais (31,8%). Protásio et al. (2013a) também observaram alto teor de extrativos totais para o bagaço de cana (16,6%). Os mesmos autores relataram, para a madeira de *Pinus*, 2,6% de extrativos totais e 28,8% de lignina. De forma análoga, Santos et al. (2011) relataram baixo teor de lignina no bagaço de cana (20%) e elevado teor de holocelulose (66%).

Esses resultados, reportados na literatura, aliados a composição química molecular das matérias-primas utilizadas (Tabela 3), confirmam a

hipótese da diminuição da estabilidade térmica, dos painéis aglomerados, com o aumento da associação de bagaço de cana e da diminuição da madeira de *Pinus* spp., em decorrência das diferenças na composição química molecular dos materiais lignocelulósicos utilizados, especialmente os teores de lignina e holocelulose.

Analisando-se as curvas DrTGA (Figuras 4, 5 e 6) pode-se constatar que os painéis apresentaram dois estágios característicos de degradação térmica. Inicialmente, observa-se um pico de perda de massa referente à secagem das amostras. Já no segundo estágio, a massa decresce rapidamente, principalmente devido à degradação térmica das hemiceluloses e da celulose (RAAD et al., 2006; GANI; NARUSE, 2007; PEREIRA et al., 2013). Cabe ressaltar que, a umidade das amostras eram similares (Tabela 4) e não influenciaram na obtenção das temperaturas *onset*, *endset* e de pico, no segundo estágio de decomposição térmica dos painéis.

A degradação das hemiceluloses pode ser constatada devido a formação de um ligeiro pico, em baixas temperaturas, nas curvas DrTGA das amostras dos painéis aglomerados produzidos com 6, 9 e 12% de adesivo. Resultados similares foram observados por Polleto et al. (2012), Pereira et al. (2013) e Protásio et al. (2013b) para a madeira de *Eucalyptus*.

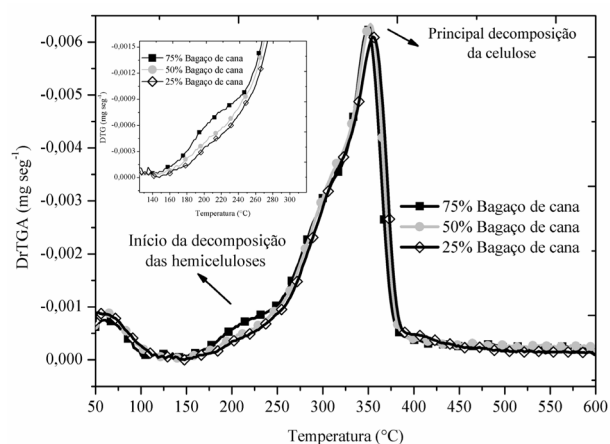


Figura 4. Curvas DrTGA dos painéis produzidos com bagaço de cana-de-açúcar e madeira de *Pinus* spp. com 6% de adesivo ureia-formaldeído.

Figure 4. DrTGA curves of the panels produced with sugar cane bagasse and *Pinus* spp. wood with 6% urea-formaldehyde adhesive.

Tabela 3. Análise química da matéria-prima lignocelulósica.

Table 3. Chemical analysis of lignocellulosic feedstock.

Matéria-prima	Extrativos totais	Lignina		Holocelulose		Cinzas
		% em base seca				
Bagaço de cana-de-açúcar	12,46 (0,96)	15,72 (0,89)	71,11 (0,72)	0,71 (0,03)		
Madeira de <i>Pinus</i>	10,84 (0,76)	29,59 (0,33)	59,27 (0,88)	0,30 (0,02)		

*Valores entre parênteses referem-se ao desvio padrão amostral (%).

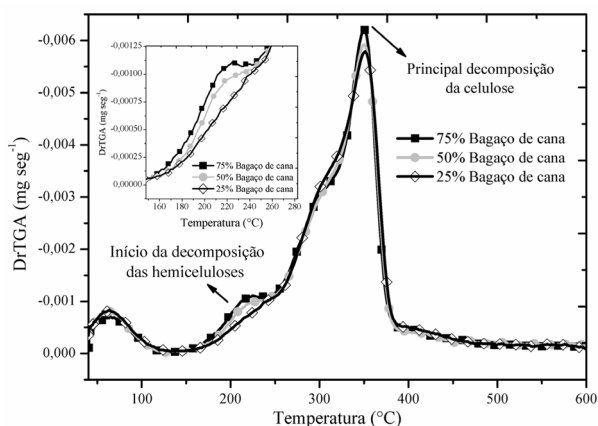


Figura 5. Curvas DrTGA dos painéis produzidos com bagaço de cana-de-açúcar e madeira de *Pinus* spp. com 9% de adesivo ureia-formaldeído.

Figure 5. DrTGA curves of the panels produced with sugar cane bagasse and *Pinus* spp. wood with 9% urea-formaldehyde adhesive.

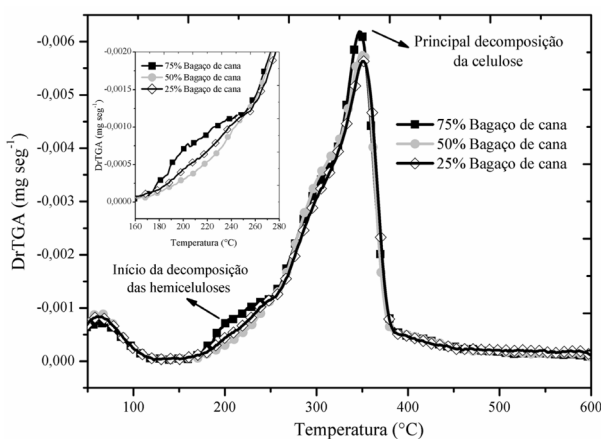


Figura 6. Curvas DrTGA dos painéis produzidos com bagaço de cana-de-açúcar e madeira de *Pinus* spp. com 12% de adesivo ureia-formaldeído.

Figure 6. DrTGA curves of the panels produced with sugar cane bagasse and *Pinus* spp. wood with 12% urea-formaldehyde adhesive.

Além disso, observa-se que a decomposição térmica das hemiceluloses dos painéis produzidos com 75% de bagaço de cana foi mais intensa. Isso sugere que esse resíduo lignocelulósico apresenta maior teor de hemiceluloses, comparativamente à madeira de *Pinus* spp., conforme discutido anteriormente.

A maior decomposição térmica das hemiceluloses deve-se a sua estrutura química amorfa, ramificada e facilmente hidrolisável (YANG et al., 2007; JOHN; THOMAS, 2008). Geralmente, as hemiceluloses são degradadas entre as temperaturas de 220°C e 315°C, a celulose entre 275°C e 350°C, a lignina entre 150°C e 900°C e os extrativos entre 150 e 600°C (GANI; NARUSE, 2007; YANG et al., 2007; GUO et al., 2010; POLETO et al., 2012; PEREIRA et al., 2013).

Cabe salientar ainda que, apesar da degradação da molécula de lignina ocorrer em ampla faixa de temperatura, a sua taxa de perda de massa é inferior aos demais componentes químicos moleculares (RAAD et al., 2006; BURHENNE et al., 2013).

Observa-se ainda que, as temperaturas referentes às taxas máximas de perda de massa tenderam a diminuir com o acréscimo de bagaço de cana nos painéis aglomerados (Tabela 4). Apenas para os painéis produzidos com 9% de adesivo, as temperaturas de pico de degradação da celulose não variaram com a adição de bagaço de cana. Possivelmente, isso ocorreu devido ao caráter residual e heterogêneo do bagaço de cana utilizado na manufatura dos painéis, bem como a amostragem empregada para a realização das análises laboratoriais.

As taxas máximas de perda de massa encontradas por Pereira et al. (2013) e Protásio et al. (2013b) foram alcançadas em temperaturas próximas a 350°C, assemelhando-se ao observado

Tabela 4. Parâmetros característicos de cada estágio de degradação térmica dos painéis aglomerados de bagaço de cana e madeira de *Pinus* spp.

Table 4. Characteristic parameters for each thermal degradation stage of particleboards of sugar cane bagasse and *Pinus* spp. wood.

Painéis	I Estágio de degradação				II Estágio de degradação					PMT (%)
	Ton	Tend	Tm	P	Ton	Tend	Tm	Tp	P	
BC25 - A6	49,0	87,5	59,5	6,9	328,0	371,5	330,5	355	69,3	82,8
BC50 - A6	55,1	85,9	59,4	6,4	300,8	367,9	327,7	352	69,5	84,3
BC75 - A6	48,0	85,5	57,3	5,9	295,6	364,2	323,5	349	71,9	85,8
BC25 - A9	38,8	90,2	60,7	6,7	307,0	373,0	327,0	350	72,5	81,9
BC50 - A9	48,1	89,9	60,1	6,5	311,5	369,8	325,2	350	71,8	81,5
BC75 - A9	52,4	92,8	64,7	5,3	285,9	368,9	323,4	350	73,7	82,2
BC25 - A12	49,9	89,8	60,6	6,7	308,5	371,1	325,7	351	71,0	81,3
BC50 - A12	49,4	85,8	60,8	7,0	284,9	370,6	325,8	348	72,3	82,4
BC75 - A12	51,6	89,1	60,1	6,0	292,8	367,3	324,2	347	73,5	82,2

Ton: temperatura onset (°C); Tend: temperatura endset (°C); Tm: temperatura referente ao ponto médio de perda de massa em cada estágio considerado (°C); Tp: temperatura de máxima perda de massa (°C); P: perda de massa (%); PMT: perda de massa total.

nesse trabalho. Os autores atribuíram esse pico de degradação a decomposição térmica da molécula de celulose. O pico de perda de massa da celulose é posterior à degradação das hemiceluloses, uma vez que é necessária maior quantidade de energia para despolimerizar a cadeia de celulose.

Considerando o segundo estágio de degradação, pode-se observar que há uma tendência de diminuição das temperaturas em que se inicia a decomposição térmica (*onset*), e que se finaliza essa degradação (*endset*) para os painéis produzidos com maiores quantidades de bagaço de cana.

Quanto ao efeito do aumento do teor de adesivo na manufatura dos painéis, observa-se que há uma tendência de diminuição da temperatura *onset* e da temperatura de máxima perda de massa e, conseqüentemente, aumento da perda de massa para o principal estágio de degradação, principalmente quando se comparam os painéis produzidos com 6% e 12% de adesivo ureia-formaldeído.

CONCLUSÕES

Observou-se que, independentemente da quantidade de adesivo utilizada, o acréscimo de bagaço de cana e, conseqüentemente, o decréscimo da madeira de *Pinus* spp., que elevam os teores relativos de holocelulose e extrativos e diminuem o teor de lignina, resultaram na diminuição da estabilidade térmica dos painéis aglomerados. Dessa forma, em situações de intensa exposição ao calor, os painéis produzidos com maiores quantidades de bagaço de cana tendem a se degradar mais rapidamente.

Quanto ao efeito do aumento do teor de adesivo na manufatura dos painéis, observou-se que há uma tendência de diminuição da temperatura *onset* e de pico e aumento da perda de massa, para o principal estágio de degradação, principalmente quando se compararam os painéis produzidos com 6% e 12% de adesivo ureia-formaldeído.

Com base nos resultados alcançados pode-se compreender melhor a degradação térmica dos painéis aglomerados produzidos com bagaço de cana-de-açúcar e madeira de *Pinus* quando submetidos a situações de calor intenso e escassez de oxigênio, como num incêndio residencial em que ocorre, além da combustão, pirólise. Os resultados encontrados poderão subsidiar novas pesquisas relacionadas ao uso do bagaço de cana-de-açúcar como matéria-prima para a indústria de painéis reconstituídos.

Recomendam-se mais estudos sobre a combustibilidade dos painéis aglomerados, ou seja, utilizando-se atmosfera de ar sintético ou oxigênio durante as análises de TGA ou empregando-se um aparato de combustão apropriado que permita o monitoramento da temperatura e da massa do painel.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, Capes e à Fapemig pelo auxílio financeiro.

À equipe do Laboratório Multiusuário de Biomateriais da Universidade Federal de Lavras (UFLA).

Aos avaliadores e editores científicos pela ajuda na correção do manuscrito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7989: pasta celulósica e madeira: determinação de lignina insolúvel em ácido. Rio de Janeiro, 2010. 6 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13999: papel, cartão, pastas celulósicas e madeira: determinação do resíduo (cinza) após a incineração a 525 °C. Rio de Janeiro, 2003. 4 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14853: madeira: determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano e em acetona. Rio de Janeiro, 2010. 3 p.

ABRAF - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. Anuário estatístico da ABRAF 2013: ano base 2012. Brasília: 2013. 148 p.

BURHENNE, L.; MESSMER, J.; AICHER, T.; LABORIE, M. P. The effect of the biomass components lignin, cellulose and hemicellulose on TGA and fixed bed pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Amsterdam, v. 101, p. 177–184, 2013.

CARNEIRO, A. C. O.; SANTOS, R. C.; CASTRO, R. V. O.; CASTRO, A. F. M.; PIMENTA, A. S.; PINTO, E. M.; ALVES, I. C. N. Estudo da decomposição térmica da madeira de oito espécies da região do seridó, Rio Grande do Norte. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 37, n. 6, p. 1153-1163, 2013.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, Terceiro Levantamento, Dezembro/2013**. Brasília, 2013. 15 p.

DIAS, J. M. C. S.; SOUZA, D. T.; BRAGA, M.; ONOYOMA, M. M.; MIRANDA, C. H. B.; BARBOSA, P. F. D.; ROCHA, J. D. **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. Brasília: Embrapa Agroenergia, 2012. 130 p.

FIORELLI, J.; SARTORI, D. L.; CRAVO, J. C. M.; SAVASTANO JR., H.; ROSSIGNOLO, J. A.; NASCIMENTO, M. F.; LAHR, F. A. R. Sugarcane bagasse and castor oil polyurethane adhesive-based particulate composite. **Materials Research**, São Carlos, v. 16, n. 2, p. 439-446, 2013.

GANI, A.; NARUSE, I. Effect of cellulose and lignin content on pyrolysis and combustion characteristics for several types of biomass. **Renewable Energy**, Oxford, v. 32, n. 4, p. 649-661, 2007.

GUIMARÃES, B. M. R.; MENDES, L. M.; TONOLI, G. H. D.; BUFALINO, L.; MENDES, R. F.; GUIMARÃES JR., J. B. Chemical treatment of banana tree pseudostem particles aiming the production of particleboards. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 38, n. 1, p. 43-49, 2014.

GUO, X.; WANG, S.; WANG, K.; LIU, Q.; LUO, Z. Influence of extractives on mechanism of biomass pyrolysis. **Journal of Fuel Chemistry and Technology**, Shanxi, v. 38, n. 1, p. 42-46, 2010.

IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Indicadores de desempenho do setor nacional de árvores plantadas referentes ao ano de 2013**. Brasília, 2014. 100 p.

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

JOHN, M. J.; THOMAS, S. Biofibres and biocomposites. **Carbohydrate Polymers**, Amsterdam, v. 71, n. 3, p. 343-364, 2008.

MENDES, R. F.; BALEEIRO, N. S.; MENDES, L. M.; SCATOLINO, M. V.; OLIVEIRA, S. L.; PROTÁSIO, T. P. Propriedades físico-mecânicas de painéis aglomerados produzidos com a madeira de *Eucalyptus grandis* em diferentes posições radiais. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 99, p. 417-423, 2013.

MENDES, R. F.; MENDES, L. M.; ABRANCHES, R. A. S.; SANTOS, R. C.; GUIMARÃES JR., J. B. Painéis aglomerados produzidos com bagaço de cana em associação com madeira de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 285-295, 2010a.

MENDES, R. F.; MENDES, L. M.; GUIMARÃES JR., J. B.; MORI, F. A.; CÉSAR, A. A. S. Efeito da incorporação de casca de café nas propriedades físico mecânicas de painéis aglomerados de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 3, p. 610-617, 2010b.

MENDES, R. F.; MENDES, L. M.; GUIMARÃES JR., J. B.; SANTOS, R. C.; CÉSAR, A. A. S. Efeito da associação de bagaço de cana, do tipo e do teor de adesivo na produção de painéis aglomerados. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 1, p. 161-170, 2012.

NAKAMURA, T.; KAWAMOTO, H.; SAKA, S. Pyrolysis behavior of Japanese cedar wood lignin studied with various model dimers. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Amsterdam, v. 81, n. 2, p. 173-182, 2008.

PAULA, L. E. R.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; BIANCHI, M. L. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 2, p. 237-246, 2011.

PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; TRUGILHO, P. F.; MELO, I. C. N. A.; OLIVEIRA, A. C. Estudo da degradação térmica da madeira de *Eucalyptus* através de termogravimetria e calorimetria. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 3, p. 567-576, 2013.

POLETTI, M.; ZATTERA, A. J.; FORTE, M. M. C.; SANTANA, R. M. C. Thermal decomposition of wood: influence of wood components and cellulose crystallite size. **Bioresource Technology**, Essex, v. 109, p. 148-153, 2012.

- PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; TONOLI, G. H. D.; GUIMARÃES JR., M.; TRUGILHO, P. F.; MENDES, L. M. Brazilian lignocellulosic wastes for bioenergy production: characterization and comparison with fossil fuels. *BioResources*, Raleigh, v. 8, n. 1, p. 1166-1185, 2013a.
- PROTÁSIO, T. P.; MELO, I. C. N. A.; GUIMARÃES JR., M.; MENDES, R. F.; TRUGILHO, P. F. Thermal decomposition of torrefied and carbonized briquettes of residues from coffee grain processing. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 37, n. 3, p. 221-228, 2013b.
- RAAD, T. J.; PINHEIRO, P. C. C.; YOSHIDA, M. I. Equação geral de mecanismos cinéticos da carbonização do *Eucalyptus* spp. *Cerne*, Lavras, v. 12, n. 2, p. 93-106, 2006.
- SANTOS, M. L.; LIMA, O. J.; NASSAR, E. J.; CIUFFI, K. J.; CALEFI, P. S. Estudo das condições de estocagem do bagaço de cana-de-açúcar por análise térmica. *Química Nova*, São Paulo, v. 34, n. 3, p. 507-511, 2011.
- SCATOLINO, M. V.; SILVA, D. W.; MENDES, R. F.; MENDES, L. M. Use of maize cob for production of particleboard. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 37, n. 4, p. 330-337, 2013.
- SHARMA, R. K.; WOOTEN, J. B.; BALIGA, V. L.; LIN, X.; CHAN, W. G.; HAJALIGOL, M. R. Characterization of chars from pyrolysis of lignin. *Fuel*, London, v. 83, n. 11-12, p. 1469-82, 2004.
- SHEBANI, A. N.; VAN REENEN, A. J.; MEINCKEN, M. The effect of wood extractives on the thermal stability of different wood species. *Thermochimica Acta*, Amsterdam, v. 471, n. 1-2, p. 43-50, 2008.
- TRIANOSKI, R.; IWAKIRI, S.; MATOS, J. L. M.; PRATA, J. G. Propriedades físicas e mecânicas de painéis de madeira aglomerada de *Acrocarpus fraxinifolius*, compostos com diferentes percentuais de casca. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 23, n. 4, p. 761-769, 2013.
- YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D. H.; ZHENG, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, London, v. 86, n. 12-13, p. 1781-1788, 2007.

Recebido em 03/06/2014

Aceito para publicação em 02/04/2015

