

Propriedades de madeiras termorretificadas de *Eucalyptus grandis* e SPProperties of thermorectificated wood of *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus*Solange de Oliveira Araújo¹, Benedito Rocha Vital²,
Zaíra Morais dos Santos Hurtado de Mendoza³,
Túlio Anselmo Vieira⁴ e Angélica de Cássia Oliveira Carneiro²**Resumo**

Tratamento térmico aplicado na madeira provoca a sua degradação e/ou rearranjo dos seus principais constituintes químicos, principalmente celulose, hemiceluloses e lignina, melhorando algumas propriedades, tais como estabilidade dimensional, resistência ao ataque de organismos xilófagos e a diminuição da higroscopicidade. Isto ocorre principalmente pela degradação dos grupos OH presentes nas hemiceluloses, constituinte mais hidrófilo da madeira. O presente trabalho teve por objetivos determinar o efeito da termorretificação no equilíbrio higroscópico, densidade, retratibilidade da madeira, dureza Janka, módulo de ruptura e elasticidade a flexão estática nas madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus* sp. As madeiras foram aquecidas entre os pratos de uma prensa, em uma estufa a vácuo e em uma estufa em meio com nitrogênio. Os tratamentos foram realizados na temperatura ambiente, 180, 200 e 220 °C, por uma hora, após atingir a temperatura estipulada. Os resultados indicaram grande potencial do tratamento térmico, uma vez que para todas as madeiras termorretificadas foi observada uma redução no equilíbrio higroscópico, principalmente para o tratamento térmico na estufa com nitrogênio. A densidade básica, de um modo geral, foi afetada apenas nas temperaturas de 200 e 220 °C independentemente do método utilizado. As contrações volumétricas tenderam a diminuir com o aumento da temperatura, no entanto, em algumas situações essas contrações foram aumentadas, como nos tratamentos da estufa a vácuo. As propriedades mecânicas foram afetadas de diversas formas. Observou-se que o aumento da dureza Janka não foi tão expressivo. Observou-se que o MOR e MOE da madeira termorretificada de *Eucalyptus grandis* diferiram significativamente entre os métodos, no entanto, foram iguais para a termorretificação realizada na prensa e estufa a vácuo. Madeiras termorretificadas na presença de nitrogênio apresentaram os maiores valores de MOE. Para o *Eucalyptus* sp. a termorretificação na estufa com nitrogênio resultou em maiores valores de MOR, quando comparado com a testemunha. Neste método, de modo geral, não foi encontrada influência da temperatura no MOR, contudo para a temperatura de 220 °C, foi obtida a maior resistência à ruptura.

Palavras-chave: Termorretificação, *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus* sp., propriedades físicas e mecânicas.

Abstract

Heat treatment applied to wood causes its degradation and / or rearrangement of its chemical constituents, especially cellulose, hemicellulose and lignin, improving some properties such as dimensional stability, resistance to attack by organisms xylophagous and decreased hygroscopicity. This is due mainly to the hemicelluloses OH groups degradation. Hemicelluloses are the more hydrophilic woodconstituent. This work aimed to determine the effect of thermorectification in hygroscopic equilibrium, density, shrinkage of the wood, Janka hardness, modulus of resistance to bending, modulus of elasticity in static bending in the woods of *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus* sp.. Woods were heated between the plates of a press or in a vacuum oven or in a oven filled with nitrogen. Treatments were performed at room temperature, 180, 200 and 220 ° C for one hour after reaching the stipulated temperature. The results indicate a great potential of thermal treatment, since in all thermorectified woods was observed a reduction in equilibrium moisture content, mainly for those heated in the oven with nitrogen. Wood density, in general, was affected only at temperatures of 200 and 220 ° C regardless of the method used. The volumetric contractions tended to decrease with increasing temperature, however, in some cases these contractions were increased, as

¹Engenheira Florestal, Dsc. Ciência Florestal, Pós-doutoranda em Ciência Florestal. UFV – Universidade Federal de Viçosa - Departamento de Engenharia Florestal, CEP: 36570-000, Viçosa – MG. E-mail: solangeeoa@yahoo.com.br

²Engenheiro(a) Florestal, Dsc. em Ciência Florestal. Professor(a) do Dep. Eng. Florestal – UFV - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, CEP: 36570-000. E-mail: bvital@ufv.br, cassiacarneiro@ufv.br

³Engenheira Florestal, Dsc. em Ciência Florestal. Professora do Departamento de Engenharia Florestal. Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá-MT, CEP: 78060-900. E-mail: zaira@ufmt.br

⁴Estudante de Pós Graduação em Ciência Florestal. UFV – Universidade Federal de Viçosa - Departamento de Engenharia Florestal, Viçosa-MG, CEP: 36570-000. - E-mail: tuliovieira19@hotmail.com

in woods heated in the vacuum oven. The mechanical properties were affected in different ways. It was a small Janka hardness increase that was not significant. But it was observed significant differences between *Eucalyptus grandis* wood MOR and MOE due to thermorectification methods. However the difference was not significant for wood thermorectified in the press or under the vacuum. Wood thermorectified in the presence of nitrogen showed higher MOE. For *Eucalyptus* sp wood thermorectified in the oven with nitrogen resulted in higher values of MOR compared with the control. In this method, in general, there was no influence of temperature on MOR, however at temperature of 220°C, was observed the highest tensile strength.

Keywords: Thermorectification, *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus* sp., physical and mechanical properties.

INTRODUÇÃO

A madeira é composta principalmente por celulose, hemiceluloses e lignina e as suas propriedades influenciadas por eles. Apesar das suas propriedades, que permitem a uma ampla utilização, ainda existem algumas limitações no uso da madeira, como, por exemplo, a instabilidade dimensional, a inflamabilidade, a degradação devido à radiação UV e a biodeterioração, dentre outros. Por isso, diferentes processos têm sido utilizadas para melhorar essas propriedades, tais como, preservativos, pesticidas, tintas UV-absorvente. No entanto, muitos deles têm impactos ambientais e suas aplicações estão sendo restringidas em diferentes países devido às leis e às pressões da mídia (MOHEBBY, 2003a).

Dentre as novas tecnologias para melhorar a qualidade e o uso da madeira, encontra-se o tratamento térmico, também conhecido como termorretificação, retificação térmica ou madeira termotratada, processo em que o aquecimento é aplicado à madeira. Consiste na termo decomposição parcial da celulose, hemiceluloses e lignina, geralmente na ausência de oxigênio ou na deficiência de ar. A termorretificação causa alterações químicas, físicas e mecânicas na madeira (RODRIGUES, 2009) e traz algumas vantagens para as suas propriedades tecnológicas. O efeito da termorretificação varia em função da temperatura final do processo, do tempo de tratamento, da velocidade de aquecimento e das propriedades iniciais da madeira.

As principais alterações nas propriedades são o aumento da estabilidade dimensional, o aumento da resistência ao ataque de organismos xilófagos e a diminuição da higroscopicidade. Porém, as propriedades mecânicas, podem ser afetadas de forma negativa, observando-se algumas discrepâncias entre os resultados encontrados por alguns autores. Estas divergências levam a acreditar que estas alterações, variam entre espécies de madeiras além dos parâmetros usados no tratamento térmico.

Uma vez tratada termicamente a madeira

pode ser usada para revestimentos, confecção de paredes à prova de som, assoalhos, terraços, decks de barcos, móveis para jardim, batentes de porta e janela, parques infantis, móveis externos e internos, portões, cercas, instrumentos musicais, dentre outros.

Reconhecendo a importância e a potencialidade da termorretificação, este estudo teve como objetivo avaliar o efeito de quatro temperaturas e três métodos de tratamento térmico nas propriedades das madeiras *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus* sp.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido nos Laboratórios de Painéis e Energia da Madeira (Lapem) e Propriedades da Madeira (LPM), da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais. Foram utilizadas madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus* sp. com idades desconhecidas, doadas pela empresa Indusparket.

As tábuas foram secas ao ar, até atingirem umidades entre 12 e 15 %, cortadas em peças de 60 x 7,5 x 2 cm, comprimento, largura e espessura respectivamente e entabacadas novamente até serem termorretificadas.

A termorretificação foi realizada durante uma hora, em uma prensa hidráulica ou uma estufa com capacidade de vácuo e pressão. Antecedendo cada tratamento térmico, as amostras foram pesadas e medidas (largura, comprimento e espessura), para futuro cálculo de perda de massa e volume. As temperaturas utilizadas foram de 180, 200 e 220 °C.

Os tratamentos térmicos na estufa foram realizados sob vácuo ou sob pressão. Na termorretificação sobre pressão, a câmara era inicialmente evacuada e posteriormente preenchida com nitrogênio até uma pressão máxima de 0,6 Kgf/cm².

Após a termorretificação, a madeira era acondicionada em sala climatizada para o seu resfriamento até a temperatura de ± 25 °C. Posteriormente, as peças foram pesadas, medidas e entabacadas ao ar livre, até atingirem umidade de equilíbrio higroscópico. A seguir foram pre-

parados os corpos de prova. Foram determinadas a umidade, massa específica, retratibilidade tangencial, radial e axial, coeficiente de anisotropia e dureza Janka, seguindo os procedimentos estabelecidos na norma NBR-7190 (ABNT, 1997).

A resistência a flexão estática foi determinada conforme estabelecido pela norma do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1956). Optou-se por esta norma, porque a espessura da madeira não permitia preparar corpos de prova nas dimensões especificadas na norma NBR 7190 (ABNT, 1997).

O experimento foi conduzido em Delineamento Inteiramente Casualizado, em um esquema fatorial incompleto, sendo 3 métodos de tratamento térmico, 4 temperaturas, 2 espécies, 3 repetições e 7 amostras/repetição. Observando-se diferenças significativas, as médias foram comparadas entre si empregando-se o teste de Tukey a 5% de probabilidade. Os efeitos dos tratamentos foram avaliados com auxílio de análise de variância.

As análises estatísticas foram feitas no software SAEG.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 são apresentados os valores médios de umidade de equilíbrio higroscópico das madeiras termorretificadas, bem como das testemunhas. A análise de variância indicou que as umidades de equilíbrio higroscópico das madeiras foram afetadas pelos tratamentos, ocorrendo interações significativas entre o método e a temperatura de termorretificação. Verificou-se que a testemunha apresentou significativamente a maior umidade de equilíbrio quando comparada com a madeira termorretificada, independentemente do método ou temperatura, evidenciando que os tratamentos térmicos reduzem a higroscopicidade da madeira.

A redução da higroscopicidade com o aumento da temperatura era esperada, uma vez que foi observada por outros pesquisadores como Durlo (1991), Kozlik (1976) e Oliveira e Tomaselli (1981). Para os três métodos empregados, verificou-se que, para as duas espécies, a menor umidade de equilíbrio higroscópico foi observado para a temperatura de 220 °C corroborando os resultados dos autores citados acima. Observou-se também, que a magnitude da redução na umidade de equilíbrio higroscópico foi afetado em aproximadamente 50%. Assim a maior redução na umidade e equilíbrio higroscópico foi observado na madeiras termorretificadas na estufa à vácuo. Em média, para esse tratamento, a redução na higroscopicidade foi de 75%. O aquecimento na prensa e na estufa com nitrogênio em geral produziu resultados similares, não se diferenciando significativamente entre si.

Para a densidade básica da madeira, a análise da variância indicou que para as duas espécies houve uma redução pelos tratamentos, ocorrendo efeito isolado do método e da temperatura de tratamento térmico. Para *Eucalyptus* sp., observou-se que a densidade básica foi afetada pelos tratamentos, ocorrendo interação significativa entre o método e a temperatura de termorretificação. Na Tabela 2 são apresentados os valores médios da densidade básica da madeira das espécies tratadas termicamente em função das temperaturas.

Os valores de densidade básica encontrados neste trabalho para o *Eucalyptus grandis* variaram de 0,45 g/cm³ (prensa) a 0,53 g/cm³ esta variação está de acordo a literatura, que cita densidades variando entre 0,45 e 0,55 g/cm³ (FOELKEL, 1978; HASELEIN et. al., 2002; LATORRACA; ALBUQUERQUE, 2002; OLIVEIRA; TOMASELLI, 1981).

Tabela 1. Médias de umidade de equilíbrio higroscópico (%) das madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus* sp.
Table 1. Means of hygroscopic equilibrium moisture content (%) of *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus* sp wood.

Espécies	Temperatura (°C)	Métodos		
		Prensa	Estufa a vácuo	Estufa com N ₂
<i>Eucalyptus grandis</i>	Testemunha	15,54 Aa	15,54 Aa	15,54Aa
	180	11,02 Ab	3,09 Cb	10,11 Bb
	200	10,56 Ab	2,55 Bb	10,09Ab
	220	9,30 Ac	2,57 Bb	9,44Ab
<i>Eucalyptus</i> sp	Testemunha	16,70 Aa	16,70 Aa	16,70 Aa
	180	10,28 Bb	4,49 Cb	12,96 Ab
	200	9,45 Bc	3,33 Cc	12,73 Ab
	220	8,63Bd	2,78 Cd	12,50 Ac

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras maiúsculas e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras minúsculas, para a mesma espécie, não diferem significativamente entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 2. Médias da densidade (g/cm³) básica das madeiras termorretrificadas de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus* sp. em função da temperatura e dos métodos**Table 2.** Médium basic density (g/cm³) of *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus* sp thermorectificated wood as affected by temperature and methods

Espécies	Temperatura (°C)	Métodos			Média Geral
		Prensa	Estufa a vácuo	Estufa com N ₂	
<i>Eucalyptus grandis</i>	Testemunha	0,53	0,52	0,51	0,52 a
	180	0,53	0,51	0,52	0,52 a
	200	0,52	0,50	0,53	0,52 a
	220	0,45	0,49	0,51	0,48 b
<i>Eucalyptus</i> sp	Testemunha	0,63 Aa	0,63 Ab	0,63 Aa	0,63 c
	180	0,61 Aab	0,62 Ab	0,59 Ab	0,61 a
	200	0,60 Bb	0,66 Aa	0,61 Bab	0,62 a
	220	0,60 Ab	0,62 Ab	0,62 Aa	0,61 a

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras maiúsculas e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras minúsculas, para a mesma espécie, não diferem significativamente entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Observa-se na Tabela 2 para *Eucalyptus grandis* que apenas a densidade da madeira tratada a 220 °C foi significativamente menor do que a densidade da testemunha e dos demais tratamentos. Esta redução de densidade pode ter sido ocasionada pela perda de massa, decorrente da degradação de seus constituintes químicos, sobretudo as hemiceluloses que são menos estáveis termicamente e se degradam mais rapidamente em comparação com os outros constituintes primários (celulose e lignina). Conforme relatado por Duchez e Guyonnet (2002), Guedira (1998), Pincelliet et al. (2002), Volvelle e Mellottee (1982), as temperaturas de degradação variam entre 100 e 250 °C. Verificou-se (Tabela 2) que a madeira não tratada de *Eucalyptus* sp. apresentou em geral, de modo significativo, maior densidade quando comparada com os diferentes métodos e temperatura.

Para o *Eucalyptus* sp. de um modo geral, não houve efeito dos métodos na densidade, exceto para a densidade da madeira termorretrificada na estufa a vácuo na temperatura de 200 °C, que foi maior do que a densidade da madeira

termorretrificada na prensa e estufa com nitrogênio. É possível que essa diferença seja ocasionada pela própria característica da madeira (genótipo, idade etc.). Sendo uma madeira cuja espécie e idade é desconhecida esta diferença pode ter sido ocasionada por variações existentes nas amostras. Além disso, embora as médias sejam significativamente diferentes entre si, as diferenças numéricas são pequenas.

Os valores médios das retrações da madeira termorretrificada de *Eucalyptus grandis* são apresentados na Tabela 3, onde pode ser observado que a análise de variância indicou que a retratibilidade radial, tangencial e volumétrica da madeira de *Eucalyptus grandis* foi afetada (Tabela 3) pelo método e pela temperatura de termorretrificação. Além disso, observou-se interação significativa entre métodos e temperatura na retração volumétrica.

As menores retrações no plano radial, tangencial ou volumétrica foram observadas nas madeiras aquecidas na prensa. Não houve diferença significativa entre as contrações radial, tangencial e volumétrica para os tratamentos realizados na estufa com vácuo ou na presença

Tabela 3. Médias da retração radial, tangencial, coeficiente de anisotropia e retração volumétrica da madeira de *Eucalyptus grandis* em função do método e da temperatura de termorretrificação.**Table 3.** Means for radial, tangential, anisotropic coefficient and volumetric shrinkage of *Eucalyptus grandis* thermorectificated wood as affected by method and temperature.

Métodos	Retração radial (%)	Retração tangencial (%)	Coeficiente de anisotropia (adm) ¹
Prensa	5,87 b	6,59 b	1.15 a
Estufa a vácuo	7,00 ab	7,13 a	1.06 ab
Estufa com N ₂	7,51 a	7,14 a	1.04 b
Retração Volumétrica			
Temperatura °C	Métodos		
	Prensa	Estufa a vácuo	Estufa a vácuo com N ₂
Testemunha	13,00 Aa	13,00 Ab	13,00 Ab
180	12,76 Ba	14,34 Aa	14,81 Aa
200	12,53 Ba	14,67 Aa	14,04 Aa
220	11,31 Bb	13,79 Ab	13,83 Ab

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras maiúsculas para o método e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras minúsculas para a temperatura não diferem significativamente entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

de nitrogênio. Foi também inferior ao observado na testemunha. Por outro lado, a retração radial, embora tenha sido numericamente inferior na prensa, quando comparada com a estufa a vácuo, a diferença não foi significativa. No entanto, os métodos da estufa, apesar de apresentarem valores de contrações radiais e tangenciais maiores, apresentam um coeficiente de anisotropia menor do que as madeiras aquecidas na prensa, e um valor muito próximo de um, que é o desejado na fabricação de móveis, esquadrias, barcos, instrumentos musicais, aparelhos de esporte, assoalhos entre outros. Segundo USDA (1974), esses efeitos combinados da retração tangencial e radial ocasionam mudanças na forma das peças de madeira por causa das diferenças nas retrações e na curvatura dos anéis de crescimento. Desse modo, a retração e a deformação variam conforme a posição radial de onde a peça de madeira foi retirada.

Os menores valores foram encontrados para o método da prensa, independentemente da temperatura, que foi significativamente diferente dos métodos da estufa. Observa-se, na Tabela 3, no método da prensa, que apenas a retração volumétrica da madeira tratada a 220 °C foi significativamente afetada pela temperatura, obtendo-se a menor retração quando comparada com a testemunha e os demais tratamentos. Quanto menor for a retração volumétrica, melhor é a madeira, uma vez que haverá menor movimentação dimensional. Madeira com retração volumétrica entre 12,33 e 19,33 % é considerada de média retração. Retração volumétrica acima de 19,4% é considerada alta, conforme o IPT (1985). Diante dos resultados encontrados neste trabalho para as contrações volumétricas advindas dos seus respectivos tratamentos térmicos, foi observado que a madeira não mudou de classe, exceto para o método da prensa a 220 °C, em que foi encontrado um valor de 11,31% que reclassificaria essa madeira como de baixa contração volumétrica.

Para o *Eucalyptus* sp. as contrações médias radial, tangencial e volumétricas foram, respectivamente, iguais a 8,45, 7,55 e 15,70 %. O coeficiente de anisotropia foi igual a 0,93. Esses valores estão próximos aos encontrados por Santos (2008), Carmo (1996) e Moura *et al.* (2003), assim como no *Eucalyptus grandis* foi observado uma diminuição dos valores de contrações com o aumento da temperatura, independentemente do método. As médias das madeiras termorretificadas bem como das testemunhas não diferiram entre si. No en-

tanto, foram todos inferiores aos da testemunha, comprovando a influência do tratamento térmico na redução da estabilidade dimensional. Além disso observa-se que para a termorretificação na prensa, em média todas as contrações foram menores que os demais métodos.

Nota-se, também, que para a temperatura de 220 °C, foi encontrado o menor valor para todas as contrações.

Através da Tabela 4, observa-se que a termorretificação na prensa afetou significativamente a dureza Janka da madeira de *Eucalyptus grandis* (34,85 Mpa) quando comparada com a estufa a vácuo (42,08 Mpa) e com a estufa com nitrogênio (39,51 Mpa). Porém, quando comparada com a testemunha (36,97 MPa), observou-se diferença significativa.

Gunduz *et al.* (2009), estudando a dureza Janka da madeira termicamente tratada, observaram que com o aumento da temperatura e do tempo de duração do tratamento térmico, a dureza Janka diminuía. Contradizendo o autor, em 2003, pesquisadores da Finnish Thermowood Association (FTA, 2003), estudando esta propriedade, indicaram que ela aumenta em função do aumento da temperatura, tendo sido os estudos realizados até a temperatura de 240 °C. Os diferentes resultados encontrados pelos autores podem ser explicados por diversas razões, dentre as quais se destacam os diferentes métodos de tratamento térmico, tempo e temperatura de exposição da madeira ao tratamento e diferenças entre espécies, dentre outros.

A análise de variância dos dados da Tabela 4 indicou também que a dureza Janka desta madeira de *Eucalyptus* sp foi afetada pelos tratamentos térmicos, ocorrendo interações significativas entre o método e a temperatura de tratamento térmico.

Observa-se na Tabela 4 que a termorretificação na prensa resultou em valores menores de dureza Janka. Esses valores, quando comparados a sua testemunha são menores, indicando efeito negativo sobre a resistência da madeira. Verificou-se que a madeira termorretificada na prensa foi significativamente menor do que a dureza da madeira termorretificada na estufa a vácuo.

De um modo geral, para *Eucalyptus* sp., a termorretificação na estufa vácuo ou com nitrogênio não ocasionou diferença significativa na dureza Janka.

No entanto, o tratamento térmico foi negativo para todos os métodos utilizados, uma vez que, independentemente da temperatura ou do

método, todos os valores encontrados de dureza Janka foram inferiores ao valor observado na testemunha, nota-se ainda que na termorretrificação na estufa houve uma tendência em aumentar a dureza com o aumento da temperatura. Este resultado pode ser um indicativo de que se o tempo de tratamento tivesse sido superior, é provável que o valor da dureza fosse maior, corroborando autores como Nuopponen *et al.* (2005); Poncsák *et al.* (2006), e Tsoumis (1991), que observaram que quanto maior a temperatura de termorretrificação maior a dureza da madeira. Entretanto, esses valores dependem de diversos fatores, tais como a espécie a ser tratada, a quantidade dos principais constituintes da madeira, a taxa de aquecimento, o tempo de exposição da madeira no tratamento, levando a combinação de todos esses fatores a um novo produto.

Portanto, em acordo com os autores citados, observa-se neste trabalho que o método utilizado, aliado à temperatura, ao tempo de exposição da madeira e à espécie a ser tratada, é um fator determinante para a resposta da madeira ao tratamento térmico. O resultado pode ser positivo ou negativo dependendo das interações entre todos esses parâmetros.

Muitos autores relacionam a dureza Janka à densidade. Kolman e Cote (1968) obser-

varam em diversas madeiras que a dureza é diretamente proporcional à densidade da madeira, no entanto, neste trabalho não se observou esta relação, uma vez que a densidade não foi afetada significativamente pelos tratamentos térmicos, contrariamente à dureza Janka, que foi ligeiramente reduzida. Entretanto, Bessa *et al.* (1990) revelam que diferentes espécies madeireiras, apresentando a mesma densidade, mostram valores diferentes em testes de dureza Janka.

Com relação ao aumento de algumas propriedades mecânicas verificadas na madeira, Sundqvist (2004) cita que parece possível aumentar ligeiramente a resistência e dureza da madeira em comparação com a madeira em condições normais dentro de certos domínios da relação tempo/temperatura. Segundo o mesmo autor, um aumento inicial na resistência e dureza pode ser devido aos processos de condensação da lignina e celulose como moléculas degradadas, podendo formar novas ligações químicas.

Os valores médios do módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) em flexão estática para a madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus* sp. termorretrificadas, bem como as interações entre métodos e temperaturas, estão sumarizados na Tabela 5.

Tabela 4. Valores médios de dureza Janka (MPa) das madeiras de *Eucalyptus* sp. em função do método e da temperatura de termorretrificação.

Table 4. Janka mean values (MPa) for *Eucalyptus* sp. thermorectificated wood as affected by method and temperature.

Espécies	Temperatura (°C)	Métodos		
		Prensa	Estufa a vácuo	Estufa com N ₂
<i>Eucalyptus</i> sp	Testemunha	62,70 Aa	62,70 Aa	62,70 Aa
	180	47,27 Bb	57,41 Aa	51,39 Ab
	200	41,09 Cc	62,07 Aa	52,20 Bb
	220	40,08 Bc	61,13 Aa	56,98 Aab

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras maiúsculas para o método e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras minúsculas para a temperatura não diferem significativamente entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 5. Valores médios do módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) em flexão estática, para a madeira termorretrificada de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus* sp.

Table 5. Mean values of modulus of rupture and modulus of elasticity for thermorectificated wood of *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus* sp.

Espécie	Temperatura (°C)	Métodos					
		Prensa		Estufa a vácuo		Estufa a vácuo com N ₂	
		MOR (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)
<i>Eucalyptus grandis</i>	Testemunha	76,44 Aa	7495,9 Aa	76,44 Ac	7495,9 Aa	76,44 Ac	7495,9 Ac
	180	76,68 Ca	7517,0 Ba	84,87 Bb	7063,7 Ba	103,99 Ab	9635,1Aa
	200	77,10 Ca	7560,8 Ba	91,66 Ba	6971,4 Ba	101,38 Ab	9242,9Ab
	220	63,87 Cb	6263,8 Bb	85,93 Bb	6976,4 Ba	114,15 Aa	10.028,8Aa
<i>Eucalyptus</i> sp.	Testemunha	111,26 Aa	10120Aa	111,26 Aa	10120 Aa	111,26 Ab	10120 Ab
	180	103,99 Bb	9897 Aa	99,08 Bc	7488 Bb	118,68 Ab	11513 Aa
	200	87,01 Cc	9693 Aa	105,99 Ba	7773 Bb	113,55 Ab	11135 Aa
	220	88,66 Cc	9799 Aa	101,30 Bb	7632 Bb	123,57 Aa	11831 Aa

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras maiúsculas para o método e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras minúsculas para a temperatura não diferem significativamente entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Observou-se que o MOR e MOE da madeira termorretificada de *Eucalyptus grandis* diferiram significativamente entre os métodos, no entanto, foram iguais para a termorretificação realizada na prensa e estufa a vácuo. Comparando o efeito do acréscimo da temperatura de termorretificação com a testemunha observa-se que as madeiras termorretificadas na prensa tiveram o MOR e MOE reduzidos significativamente apenas para a temperatura de 220 °C. Na estufa e na presença de nitrogênio, observou-se aumento significativo no MOR da madeira termorretificada quando comparado com a testemunha. O MOE também foi afetado, sendo, contudo, maior que o MOE da testemunha apenas na estufa com nitrogênio.

Para Yildiz *et al.* (2006), o aquecimento da madeira na presença de ar tende a promover reações de decomposição, sendo este efeito dependente da atmosfera circundante, especialmente com relação à presença ou ausência de oxigênio. Corroborando este autor, Stamm (1956) mostrou que a madeira aquecida em atmosfera com a presença de oxigênio é decomposta mais rapidamente do que a madeira aquecida em atmosfera, devido às reações de oxidação. Essa decomposição ocorre porque o tratamento térmico, quando executado num ambiente oxidante, libera ácido acético, que atua como um catalisador das reações de despolimerização (ESTEVES; PEREIRA, 2008). Essa decomposição se reflete diretamente na densidade da madeira, resultando em perda direta da sua resistência.

Avaliando o efeito da temperatura na resistência, a ruptura obtida pela termorretificação na prensa, observou-se que não diferiram significativamente em relação à testemunha, exceto para a temperatura de 220 °C, quando se observou menor resistência.

A redução do módulo de ruptura pode ter sido ocasionado pelo aumento da friabilidade da madeira decorrente do tratamento térmico. O fato de a madeira tornar-se mais friável quando submetida ao tratamento térmico indica que ela ficou mais quebradiça, conforme observado por Arias *et al.* (2008).

Quando comparado os dois métodos de termorretificação na estufa, nota-se que, no geral, houve um aumento no módulo de ruptura em função do aumento da temperatura. Este aumento foi mais acentuado na estufa com nitrogênio, com ganho de 22%. Estes resultados não são compatíveis com os relatados por Mouras *et al.* (2002), que observaram perdas de 15 a 20

% no MOR, para tratamentos a partir de 220 °C e 60 minutos e por Almeida (2007) com queda de 40% para os tratamentos entre 230 e 240 °C. Esta diferença entre os resultados encontrados pelos autores acima e os obtidos neste trabalho deve-se provavelmente à diferença de métodos empregados. Fica evidenciado que o meio deficiente em oxigênio ou com a presença de nitrogênio afeta de forma positiva a resistência (MOR) da madeira de *Eucalyptus grandis*.

O ganho no módulo de ruptura também pode ser explicado pela presença de vapor que se forma no interior da estufa a vácuo, criando mudanças químicas que resultam num material menos quebradiço e mais resistente. Vale ressaltar que durante o tratamento na presença de nitrogênio observou-se maior quantidade de vapor e água formados no interior da estufa.

Os resultados observados para o módulo de elasticidade mostraram na estufa com nitrogênio madeiras com maior rigidez, diferindo dos demais, que foram iguais entre si.

Não foi observada perda de rigidez para as madeiras termorretificadas na prensa e estufa a vácuo, com o aumento da temperatura de termorretificação, exceto para as madeiras tratadas a 220 °C. Esteves e Pereira (2008), apesar de condições diferentes de tratamentos desta pesquisa, estudando o efeito da temperatura de 180 °C por 2 h sobre o MOE da madeira de *Pinus pinaster* Aiton em flexão estática, observaram uma redução de 2%; e Santos (2000) verificou um aumento no módulo de elasticidade da madeira de eucalipto tratada a 180 °C.

As madeiras termorretificadas na estufa a vácuo tiveram maior módulo de elasticidade em relação à testemunha. Estudando a madeira de *Picea abies* Karst, tratada na presença de vapor e pressão a 165 °C por 30 min, seguido de tratamento de calor em condições secas e à pressão atmosférica a 180 °C por 6 h, também encontrou um acréscimo no MOE da madeira tratada, mas em 5,21%, um pouco inferiores aos aqui registrados (BOONSTRA *et al.*, 2007).

Para o *Eucalyptus* sp. a termorretificação na estufa com nitrogênio resultou em maiores valores de MOR, quando comparado com a testemunha. Neste método, de modo geral, não foi encontrada influência da temperatura no MOR, contudo para a temperatura de 220 °C, foi obtida a maior resistência à ruptura.

Menores valores do módulo de ruptura foram encontrados na madeira termorretificada na prensa. Foi observada uma tendência na per-

da de resistência à ruptura em função da temperatura. A termorretrificação na prensa produziu um efeito indesejável para madeira, pois o tratamento térmico diminuiu de forma significativa o MOR. O mesmo comportamento da madeira foi notado para o método da estufa a vácuo.

Boonstra *et al.* (2007) elucidam este fato devido ao aumento da temperatura e/ou do tempo de tratamento, o que causa uma redução mais acentuada das hemiceluloses com correspondente perda da resistência, fato este relatado por diversos autores (ESTEVEZ; PEREIRA, 2008; YILDIZ *et al.*, 2006), que consideram a degradação das hemiceluloses principal responsável pelas alterações sofridas pelas madeiras quando tratadas termicamente.

De acordo com Winandy e Rowell (2005), durante a degradação térmica a madeira perde resistência mecânica pela diminuição de componentes como a xilose, a galactose e a arabinose.

Considerando que a resistência à flexão é uma combinação das tensões, de tração, compressão e cisalhamento, deve-se analisar como essas forças são afetadas pela degradação das hemiceluloses.

CONCLUSÕES

A termorretrificação reduziu o equilíbrio higroscópico e melhorou a estabilidade dimensional.

Cada espécie reagiu de forma diferenciada para cada tratamento térmico, sugerindo estudo mais completo para cada espécie, para uma otimização dos parâmetros do tratamento térmico.

As madeiras termorretrificadas quando comparada com as testemunhas não empenaram e nem torceram, contudo, foi notada a presença de pequenas fissuras nas madeiras de *Eucalyptus grandis*, quando submetidas ao método da prensa e em temperaturas de 200 e 220 °C, em algumas peças.

A termorretrificação, sobretudo na prensa e nas temperaturas de 200 e 220 °C ocasionou diferenças entre as cores (ou tons de cores) das madeiras, algumas em menor e outras em maior intensidade. Essa modificação na tonalidade da madeira permite uma ampliação do seu uso principalmente, na indústria de piso e moveleira.

Os tratamentos térmicos na estufa a vácuo aumentaram a dureza Janka para o *Eucalyptus grandis*. Houve um aumento significativo na resistência à flexão e módulo de elasticidade.

A termorretrificação na presença de nitrogênio foi o mais eficiente para aprimorar as proprieda-

des da flexão estática. Os outros dois métodos afetaram de forma negativa nestas propriedades, principalmente para as temperaturas mais altas. Em relação à dureza Janka, os métodos da prensa e da estufa com nitrogênio diminuíram os valores desta propriedade.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a empresa de pisos de madeira maciça IndusParquet, Fapemig (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais), à Universidade Federal de Viçosa.

REFERÊNCIAS

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

ALMEIDA, G. **Valorização energética de resíduos madeireiros mediante a termorretrificação**. Relatório de atividades (bolsa de pós-doutorado) N° 1. FAPESP. 57p. 2007.

ARIAS, B., PEVIDA, C., FERMOSSO, J., PLAZA, M. G., RUBIERA, F., PIS, J. J. Influence of Torrefaction on the Grindability and Reactivity of Wood Biomass. **Fuel Processing Technology**, v.89, n.2, p.169-175. 2008.

BESSA, M.T.F., NASCIMENTO, C.C., SILVA, A.C. Estrutura da madeira e sua correlação com propriedades mecânicas. **Acta Amazônica**, Manaus, v.20, 1990.

BOONSTRA, M.J.; ACKER, J.; KEGEL, E.; STEVENS, E. Optimization of a two-stage heat treatment process: durability aspects. **Wood Science and Technology**, New York, v.41, n.1, p.31-57p, 2007.

CARMO, A.P.T. **Avaliação de algumas propriedades da madeira de seis espécies de eucalipto**. 74p. 1996. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1996.

DUCHEZ, L., GUYONNET, R. **Principles and applications of wood rectification**, 2002. Disponível em: <<http://techtp.com/twppapers/fao>>. Acesso em: 08 jan. 2010.

DURLO, M.A.; MARCHIORI, J.N.C. **Tecnologia da madeira: retratibilidade**. Santa Maria: UFSM/CEPEF, 1991, 33p. (Série Técnica, n.10).

- ESTEVEES, B.M.; PEREIRA, H.M. Wood modification by heat treatment: a review. **BioResources**, Raleigh, v.4, n.1, p.370-404, 2008.
- FOELKEL, C.E.B. Madeira de eucalipto: da floresta ao digestor. **Boletim Informativo IPEF**, Piracicaba, v.6, n.20, p.1-25, 1978.
- FTA - FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION. **ThermoWood® Handbook**, FIN-00171, Helsinki, Finland: FTA, 2003. 90p.
- GUEDIRA, F. **Pyrolise lente de La biomasse: comportement comparé de sturteux d'olives, de bagasse de canne à sucre et sciure de bois (Pin maritime)**. 1988, 122p. Tese (Doutorado) – Université Mohamed, Maroc, 1988.
- GUNDUZ, G.; KORKUT, S.; AYDEMIR, D.; BEKAR, I. The density, compression strength and surface hardness of heat treated hornbeam (*Carpinus betulus*) wood: Maderas. **Maderas Ciencia y Tecnología**, Concepción, v.11, n.1, p.61-70, 2009.
- HASELEIN, C.R.; BERGER, R.; GOULART, M.; STHAL, M.; TREVISAN, R. SANTINI, E.J.; LOPES, M. C. Propriedades de flexão estática da madeira úmida e a 12 % de umidade de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith sob o efeito do espaçamento e da adubação. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.12, n.2, p.147-152, 2002.
- IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Métodos de ensaios adotados no IPT para estudos de madeiras nacionais**. 2ed. 1956. 60p. (Boletim IPT, 31)
- KOLMANN, F.P.P., COTÉ, W.A.J. **Principles of wood science and technology**. New York: Springer – Verlag, 1968. 592p. (Solid Wood, 1).
- KOZLIK, C.J. Kiln-drying of western juniper. **Forest Products Journal**, Madison, v.26, n.8, p.73-76, 1976.
- LATORRACA, J.V.F.; ALBUQUERQUE, C.E.C. Efeito do rápido crescimento sobre as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v.7, n.1, p.279-291, 2002.
- MOHEBBY, B. **Biological attack of acetylated wood**. 2003. 147p. Tese (Doutorado em Wood Biology and Wood Technology) Göttingen University; Göttingen, 2003a.
- MOURA, M.C.O., ROSADO, S.C.S., TRUGILHO, P.F., CARVALHO, D. Variações genéticas e herdabilidade da estabilidade dimensional da madeira de *Eucalyptus*. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 8., 2003, São Paulo, SP. **Anais... São Paulo: Sociedade Brasileira de Engenheiros Florestais**, 2003. p.242-249.
- MOURAS, S., GIRARD, P., ROUSSET, P., PERMADI, P., DIROL, D., LABAT, G. Propriétés physiques de bois peu durables soumis a un traitement de pyrolyse ménagée. **Annal of Forest Science**, Nancy, v.59, p.317-326, 2002.
- NUOPPONEN, M., VUORINEN, T., JAMA, S., VIITANIEMI, P. Thermal modifications in softwood studied by FT-IR and resonant Raman Spectroscopies. **Journal of wood Chemistry and Technology**, Philadelphia, v.24, p.13-26, 2005.
- OLIVEIRA, V.S.; TOMASELLI, I. Efeito da secagem a altas temperaturas em algumas propriedades físicas e mecânicas da madeira jovem de *Araucaria Angustifolia* (Bert.) O. Ktze. **Revista Floresta**, Santa Maria, v.2, n.1, p.17-25, 1981.
- PINCELLIET, A.L.P.S., BRITO, J.O., CORRENTE, J.E. Avaliação da termorreificação sobre colagem na madeira de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.61, p.122-132, 2002.
- PONCSÁK, S.; KOCAEFE, D.; BOUAZARA, M.; PICHETTE, A. Effect of high temperature treatment on the mechanical properties of birch (*Betula papyrifera*). **Wood Science Technology**, New York, v.1, n.40, p.647-663, 2006.
- RODRIGUES, T.O. Efeito da Torrefação no Condicionamento de Biomassa para Fins Energéticos. 2009. 71p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Universidade de Brasília, Brasília, 2009.
- SANTOS, I.S. **Avaliação da madeira de *Eucalyptus* sp. para a produção de pisos a partir de toras de pequenos diâmetros**. 66p. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira/Processamento e Utilização da Madeira), Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.
- SANTOS, J. A. Mechanical behaviour of *Eucalyptus* wood modified by heat. **Wood Science and Technology**, New York, v.34, n.1, p.39-43, 2000.

- STAMM, A.J. Thermal degradation of wood and cellulose. **Industrial and Engineering Chemistry**, Washington, v.48, n.3, p.413-417, 1956.
- SUNDQVIST, B. **Colour changes and acid formation in wood during heating**. 2004. 154p. Tese (Doutorado em Wood Material Science) – Lulea University of Technology, Sweden, 2004.
- TSOUMIS, G. **Science and technology of Wood: structure, properties and utilization**. New York: Van Nostrand Reinold, 1991. 494p.
- USDA – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook: Wood as an engineering material**. Madison: FPL, 1974.
- VOLVELLE, C.; MELLOOTTEE, H. Modelisation de l'apérolyseoxydante ou noxydante de bois ou de déchetsvégetaux à partir de leurscomposants. In: PALZ, W.; CHARTIER, P. (Eds.). **Energy from biomass**. 2ed. London: Applied Sciences, 1982. p.925-929
- WINANDY, J. ROWLL, R.M. Chemistry of Wood Strength. In: ROWELL, R.M. (Ed.). **Handbook of wood chemistry and wood composites**. Boca Ration, Florida: CRC, 2005. p.303-347.
- YILDIZ, S.; GEZER, E.D.; YILDIZ, U.C. Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat. **Building and Environment**, Oxford, v.41, n.1, p.1762-1766, 2006.

Recebido em 28/07/2011
Aceito para publicação em 15/06/2012