

Influência do tempo e temperatura de retificação térmica na umidade de equilíbrio da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden

Effect of time and thermal correction temperature on moisture equilibrium of *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden wood

Djeison Cesar Batista¹ e Ricardo Jorge Klitzke²

Resumo

Este estudo teve por objetivo avaliar a influência da temperatura e do tempo de retificação térmica na umidade de equilíbrio da madeira de *Eucalyptus grandis* seca em câmara convencional. Foram realizados seis tratamentos utilizando duas temperaturas (200 e 230°C) e três tempos (1, 2 e 3 horas) e um tratamento testemunha. No total foram produzidos 84 corpos-de-prova, sendo 12 corpos-de-prova por tratamento. Os resultados comprovaram o efeito significativo da temperatura na retificação térmica e o efeito não significativo do tempo. Os tratamentos retificados termicamente a 230°C obtiveram umidade de equilíbrio média 2,2 vezes inferior aos tratados a 200°C. A retificação térmica reduziu a umidade de equilíbrio em 0,67 a 5,35 pontos percentuais, de acordo com a temperatura. O aumento da temperatura afetou a coloração da madeira, tornando-a mais escura.

Palavras-Chave: Retificação térmica, *Eucalyptus grandis*, Umidade de equilíbrio

Abstract

The aim of this work was to evaluate the influence of time and thermal correction temperature on the equilibrium moisture content of kiln dried *Eucalyptus grandis* wood. Six treatments were used, two temperatures (200 and 230°C), three time periods (1, 2 and 3 hours) and one control. 84 specimens were tested; 12 per treatment. The results indicated a significant effect of temperature on thermal correction, but non for time. Thermal corrected treatments at 230°C presented a mean equilibrium moisture content 2.2 times smaller than those at 200°C. Thermal correction reduced equilibrium moisture content from 0.67 to 5.35 percentage points, depending on temperature. Thermal correction treatments darkened wood color.

Keywords: Thermal correction, *Eucalyptus grandis*, Equilibrium moisture content

INTRODUÇÃO

A madeira na árvore viva tem sempre umidade igual ou superior a 30%. No entanto, quando toras são processadas em madeira serrada e expostas ao ambiente, a madeira começa a perder umidade para a atmosfera circundante (SKAAR, 1972).

A umidade está presente na madeira de duas formas, como água higroscópica ou de adesão e água livre ou de capilaridade. Acredita-se que a água de adesão encontra-se aderida por ligações de hidrogênio aos grupos hidroxílicos, primariamente nas cadeias de celulose e hemicelulose, e em menor extensão aos grupos hidroxílicos da lignina (SIAU, 1995).

Em resultado das variações de temperatura e umidade relativa do ar, a madeira pode doar ou receber umidade, e por consequência, contrair ou inchar. Assim, a madeira exposta às variações

da atmosfera estará constantemente ganhando ou perdendo moléculas de água, propriedade conhecida como higroscopicidade. Tsoumis (1991) afirma que a umidade de equilíbrio é uma medida da higroscopicidade da madeira, e é expressa como uma porcentagem da massa seca da madeira.

Denomina-se umidade de equilíbrio quando a madeira se encontra em equilíbrio higroscópico com o meio, isto é, não doa ou recebe umidade da atmosfera circundante (SKAAR, 1972). Tsoumis (1991) afirma, no entanto, que a madeira nunca atingirá a umidade de equilíbrio em um ambiente sem controle, porque tanto a temperatura quanto a umidade relativa do ar estão em constante mudança.

De acordo com Simpson e TenWolde (1999), a umidade de equilíbrio abaixo do ponto de saturação das fibras é uma função da umidade

¹Professor Assistente do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal do Espírito Santo - Avenida Governador Carlos Lindemberg, 316 - Centro - Jerônimo Monteiro, ES - 29550-000 - E-mail: djeison1984@gmail.com

²Professor Adjunto do Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da Universidade Federal do Paraná - Campus 3 - CIFLOMA - Av. Prefeito Lothário Meissner, 632 - Jardim Botânico - Curitiba, PR - 80210-170 - E-mail: rkklitzke@ufpr.br

relativa e da temperatura do ar circundante. Siau (1995) ressalta que a umidade relativa do ar é o principal fator na umidade de equilíbrio, porém outros fatores devem ser considerados, como a temperatura do ar, esforços mecânicos, espécie, densidade e teor de extrativos.

De acordo com Siau (1995) a quantidade de água higroscópica presente na madeira está limitada pelo número de sítios de sorção disponíveis e pelo número de moléculas de água que podem ser retidas em cada sítio de sorção. Uma das técnicas utilizadas para reduzir a higroscopicidade é a estabilização por aquecimento.

O tratamento térmico da madeira foi cientificamente estudado por Stamm e Hansen na década de 1930, na Alemanha, e por White na década de 1940, nos Estados Unidos. Na década de 1950 os alemães Bavendam, Runkel e Buro continuaram as pesquisas neste tema. Kollmann e Schneider publicaram suas descobertas na década de 1960 e Rusche e Burmester na de 1970. Recentemente, na década de 1990, trabalhos de pesquisa foram realizados na Finlândia, França e Holanda (FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION, 2003).

No Brasil, na década de 1980, Vital e Della Lucia (1982) abordaram a utilização desta técnica, com as temperaturas de 105, 130 e 155 °C, visando aumentar a estabilidade dimensional e reduzir a higroscopicidade da madeira de *Eucalyptus saligna*. Atualmente, esta técnica tem ganhado destaque na pesquisa nacional (Del Menezzi, 2004; Pincelli *et al.*, 2002; Borges e Quirino, 2004; Brito *et al.*, 2006).

De acordo com Shi *et al.* (2007) o tratamento térmico a altas temperaturas com o objetivo de reduzir a higroscopicidade da madeira tem sido estudado há anos na Europa, onde foram desenvolvidas diversas tecnologias. Poncsák *et al.* (2006), citando Militz (2002), afirmam que as tecnologias mais utilizadas na Europa são: PLATO Process (Holanda), Retification Process (França), Bois Perdre Process (França), OHT Process (Alemanha) e Thermo Wood Process (Finlândia).

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da utilização de duas temperaturas e três tempos de retificação térmica na redução da umidade de equilíbrio da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização do material e amostragem

Neste trabalho utilizou-se apenas a primeira tora (primeiros três metros) de uma árvore

de *Eucalyptus grandis* de 11 anos de idade. Desta tora, foram utilizadas tábuas tangenciais nas dimensões de 30 x 150 x 740 mm, secas em câmara convencional até a umidade de 10%. O esquema de amostragem das tábuas utilizadas encontra-se na Figura 1.

De cada tábua foram confeccionados de três a cinco corpos-de-prova orientados e livres de defeitos. Na Figura 2 encontra-se o esquema de amostragem dos corpos-de-prova, exemplificando-se as duas primeiras tábuas utilizadas. As tábuas seguintes obedeceram à mesma seqüência de amostragem.

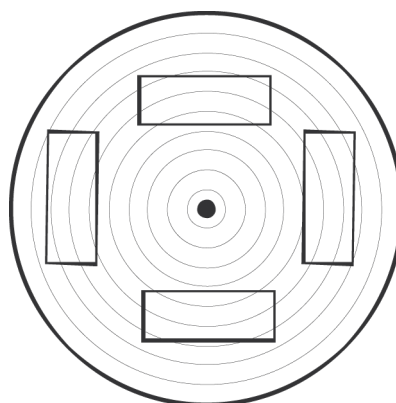


Figura 1. Esquema de amostragem das tábuas.
Figure 1. Board sampling scheme.

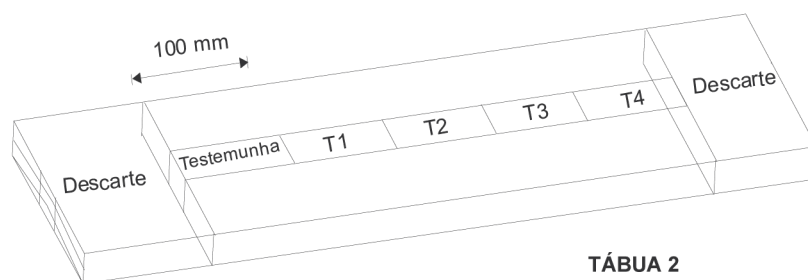
Como se pode observar na Figura 2, cada tratamento foi composto por corpos-de-prova representativos de toda a seção longitudinal de diferentes tábuas. A amostragem foi realizada desta maneira, visando minimizar o efeito da heterogeneidade da madeira, e assim, distribuir homogeneamente fontes de erro que pudessem ser superiores ao efeito dos tratamentos.

Tratamentos

Na Tabela 1 encontra-se a descrição dos tratamentos. Para estudar o efeito dos tratamentos de retificação térmica na redução da higroscopicidade da madeira utilizaram-se 12 corpos-de-prova de 25 x 25 x 100 mm por tratamento. Como não existe padronização na literatura sobre as dimensões dos corpos-de-prova para os estudos de retificação térmica em escala laboratorial, utilizaram-se as dimensões dos corpos-de-prova do ensaio de retratibilidade da norma COPANT (1972).

Inicialmente, todos os corpos-de-prova foram levados para a estufa com controlador digital (precisão de $\pm 2^\circ\text{C}$) de acordo com a programação: 60 °C por 2h; 80 °C por 2h e 120 °C por 20h. O objetivo desta etapa foi assegurar que todos os corpos-de-prova tivessem as mesmas condições de umidade inicial (0%).

TÁBUA 1



TÁBUA 2

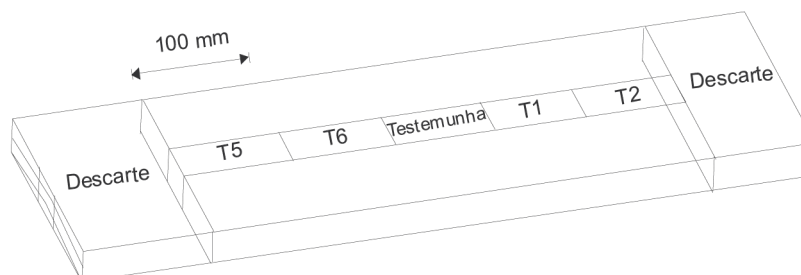


Figura 2. Esquema de amostragem dos corpos-de-prova.
Figure 2. Specimen sampling scheme.

Tabela 1. Tratamentos.
Table 1. Treatments.

Tratamento	Tempo (Horas)	Temperatura (°C)
Testemunha	-	-
1	1	200
2	2	
3	3	
4	1	230
5	2	
6	3	

Tratamento testemunha

Depois da etapa inicial de secagem, os corpos-de-prova do tratamento testemunha foram colocados em um dessecador para resfriamento e tiveram a massa seca (MS) determinada em balança digital (0,01 g de precisão). Em seguida, foram levados à câmara climática (65% ± 2% de umidade relativa do ar e 20°C ± 2°C de temperatura) e pesados diariamente em balança digital até atingirem massa constante (MC), indicando equilíbrio higroscópico com o ambiente.

Retificação térmica

As temperaturas de retificação térmica foram escolhidas com base no trabalho de Brito *et al.* (2006), no qual estes autores obtiveram resultados significativos de redução da reatibilidade a partir da temperatura de 200°C; os tempos utilizados foram escolhidos com base no trabalho de Shi *et al.* (2007).

Decorrida a fase inicial de secagem, os corpos-de-prova foram retirados da estufa e acondicionados em diferentes dessecadores para resfriamento. Para a retificação térmica, utilizou-se a

mesma estufa da etapa de secagem, a qual foi pré-aquecida na temperatura desejada, e em seguida os corpos-de-prova foram mantidos pelo tempo estabelecido de acordo com cada tratamento.

Terminada a retificação térmica, os corpos-de-prova foram resfriados em dessecador e tiveram a massa seca (MS) determinada em balança digital (0,01g de precisão). Em seguida foram levados à câmara climática (65% ± 2% de umidade relativa do ar e 20°C ± 2°C de temperatura) e pesados diariamente em balança digital até atingirem massa constante (MC).

Determinação da umidade de equilíbrio

A umidade de equilíbrio foi calculada de acordo com a Equação 1 (SKAAR, 1972). Para o tratamento testemunha a massa seca (MS) correspondeu àquela determinada após o período de 24h em estufa a 103±2°C. Para os tratamentos que sofreram retificação térmica a massa seca (MS) correspondeu àquela determinada após a retificação térmica.

$$UE = [(MC - MS)/MS] \times 100 \quad (1)$$

onde:

UE: umidade de equilíbrio (%);

MC: massa estabilizada em câmara climática (g);

MS: massa seca (g).

Análise estatística

Inicialmente, aplicou-se a ANOVA (5% de significância) em delineamento inteiramente casualizado para observar a diferença entre as médias de todos os tratamentos. Havendo rejei-

ção da hipótese da nulidade, aplicou-se o teste de Tukey (5% de significância) para diferenciação das médias.

Em seguida, aplicou-se a análise de variância (ANOVA) em arranjo fatorial 2 x 3 x 12 (5% de significância) aos resultados dos tratamentos retificados termicamente para verificar a existência de interação entre os fatores temperatura e tempo. Havendo rejeição da hipótese da nulidade, aplicou-se o teste de Tukey (5% de significância) para diferenciação das médias.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 encontram-se as médias de umidade de equilíbrio por tratamento e o resultado do teste de diferenciação de médias. De acordo com a ANOVA (F calculado= 249,75**) aplicada em delineamento inteiramente casualizado as médias dos tratamentos não foram iguais estatisticamente a 1% de significância.

Tabela 2. Médias de umidade de equilíbrio por tratamento.

Table 2. Means of equilibrium moisture content per treatment.

Tratamento	Umidade de Equilíbrio Média (%)	Coefficiente de Variação (%)
Testemunha	8,74 a	6,81
1	8,03 b	7,90
2	7,74 b	6,41
3	8,07 b	9,29
4	3,39 c	6,75
5	3,60 c	5,11
6	3,65 c	4,82

Médias seguidas de uma mesma letra, em uma mesma coluna, não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey a 1% de significância.

O tratamento testemunha apresentou a maior média, revelando o efeito positivo da retificação térmica na redução da umidade de equilíbrio.

As médias dos tratamentos retificados termicamente distinguiram-se por temperatura, nos quais as médias dos tratamentos retificados a 230°C (4,5 e 6) não diferiram estatisticamente entre si e foram menores que as dos tratamentos a 200°C (1, 2 e 3), que também não distinguiram entre si.

Os resultados obtidos estão em desacordo com o proposto por Vital e Della Lucia (1982), que afirmaram que o efeito da temperatura sobre a umidade de equilíbrio depende do tempo de retificação térmica. Estes autores estudaram a retificação térmica de *Eucalyptus saligna*, utilizando cinco tempos diferentes (10, 20, 40, 80 e 160 horas), superiores aos deste estudo, porém,

com temperaturas inferiores (105, 130 e 155°C). Portanto, sugere-se que o efeito do tempo de retificação térmica seja significativo apenas a temperaturas inferiores a 200°C, perdendo a sua importância à medida que temperaturas superiores sejam utilizadas. A umidade de equilíbrio mais baixa que Vital e Della Lucia (1982) obtiveram foi de aproximadamente 7% para o tratamento a 155°C com duração de 160 horas.

Borges e Quirino (2004) estudaram a retificação térmica de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* em meio oxidante, utilizando as temperaturas de 120, 140, 160 e 180°C, porém sem diferenciação de tempo. Estes autores obtiveram redução gradativa da umidade de equilíbrio com o aumento da temperatura, atingindo uma redução de até 3,46 pontos percentuais em relação ao tratamento testemunha.

Para os tratamentos retificados, o tratamento 3 (200°C e 3 horas) obteve a maior média, 8,07%, enquanto o tratamento 4 (230°C e 1 hora) obteve a menor média, 3,39%. Assim, comparando-se esses resultados à testemunha, atingiu-se a redução da umidade de equilíbrio da ordem de 0,67 a 5,35 pontos percentuais. Tais resultados significam que a umidade de equilíbrio foi reduzida de 1,1 a 2,6 vezes.

Ressalta-se que, somado ao efeito da retificação térmica encontra-se o efeito da histerese, que embora não tenha sido objetivo deste estudo merece investigação futura. Inicialmente os corpos-de-prova foram secos a 0% de umidade, representando um ciclo de dessorção. Em seguida foram levados à câmara climática e expostos a outro ciclo, dessa vez de adsorção. Tsoumis (1991) afirma que a madeira verde submetida à dessorção atinge maior umidade de equilíbrio do que a madeira seca exposta a adsorção. Kollmann e Côté Junior (1968) afirmam que a causa mais provável para este fenômeno seja o rearranjo das moléculas de celulose e lignina durante a etapa de dessorção, fazendo com que as hidroxilas tornem mais próximas entre si, estabelecendo ligações de hidrogênio e deixando de estar disponíveis para a adsorção de moléculas de água.

Batista e Klitzke, em trabalho não publicado desenvolvido no Laboratório de Secagem da Madeira da Universidade Federal do Paraná, expuseram corpos-de-prova de *Eucalyptus grandis* de umidade inicial média de 39,65% a um ciclo de dessorção em câmara climática (65% ± 2% de umidade relativa do ar e 20°C ± 2°C de temperatura) e obtiveram umidade de equilíbrio média de 15,49%. Dessa maneira, compa-

rando-se esse resultado à média do tratamento testemunha, o efeito da histerese na redução da umidade de equilíbrio foi de 6,75 pontos percentuais. Comparando-se essa média de 15,49% à menor média obtida pelos tratamentos retificados termicamente, atingiu-se uma redução de 12,1 pontos percentuais, ou seja, a umidade de equilíbrio foi reduzida em 4,6 vezes.

Salienta-se, no entanto, que fora da escala laboratorial a secagem da madeira a 0% de umidade não é prática corrente, devido a sua inviabilidade técnica e, principalmente, econômica.

ANOVA em arranjo fatorial

Na Tabela 3 encontram-se os valores de F calculado na ANOVA em arranjo fatorial, na qual se analisou a interação entre os fatores tempo e temperatura sobre as médias dos tratamentos retificados termicamente.

Tabela 3. Valores de F calculado da ANOVA em fatorial.
Table 3. Calculated F values of factorial ANOVA.

Fonte de Variação	F Calculado	Probabilidade
Temperatura	1269,72	0,0000 **
Tempo	0,91	0,4088 ns
Interação	1,38	0,2611 ns

**significativo a 1% de probabilidade; NS: não significativo a 5% de probabilidade

De acordo com a Tabela 3 a influência do fator tempo isoladamente não foi significativa na redução da umidade de equilíbrio. Da mesma maneira, não houve interação significativa entre os fatores tempo e temperatura. Somente o fator temperatura foi significativo a 1%, exercendo influência na redução da umidade de equilíbrio. Esse resultado pode ser observado na Tabela 2, no qual as médias dos tratamentos retificados termicamente se dividiram em dois grupos

distintos entre si: os tratamentos retificados a 200°C (1, 2 e 3) e os tratamentos retificados a 230°C (4, 5 e 6). Dentro dos grupos não houve diferença significativa entre as médias.

Na Tabela 4 encontra-se o resultado do teste de diferenciação de médias por temperatura, que foi o único fator estatisticamente significativo.

Tabela 4. Médias de umidade de equilíbrio por temperatura.

Table 4. Means of equilibrium moisture content by temperature.

Temperatura	Umidade de Equilíbrio Média (%)
200°C	7,95 a
230°C	3,55 b

Médias seguidas de uma mesma letra, em uma mesma coluna, não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey a 1% de significância.

A média da umidade de equilíbrio dos tratamentos retificados termicamente a 200°C foi cerca de 2,2 vezes superior à dos tratamentos retificados a 230°C. Este resultado, aliado aos resultados da ANOVA, expressa que esta diferença de 30°C nas temperaturas dos tratamentos foi significativa, servindo de base para pesquisas futuras. Como o fator tempo não foi estatisticamente significativo (Tabela 3), significa que a duração da retificação térmica de 1h foi tão eficiente quanto a de 3h. Menor duração de retificação térmica resulta em economia de energia e tempo, resultando em redução de custos do processo e aumento da capacidade produtiva. As temperaturas utilizadas causaram o escurecimento na madeira, no qual este efeito foi mais pronunciado à temperatura de 230°C, adquirindo coloração marrom escuro.

Na Figura 3 pode ser observado o comportamento higroscópico dos tratamentos.

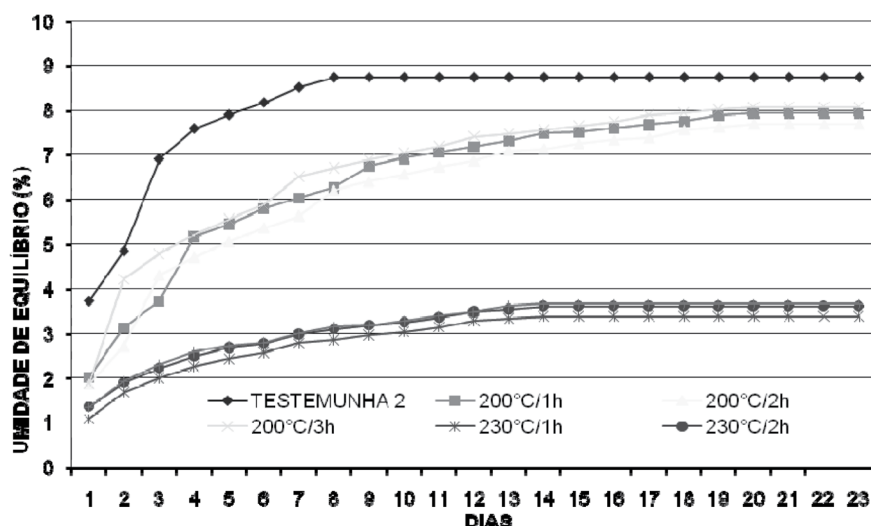


Figura 3. Comportamento higroscópico dos tratamentos em câmara climática (20 + 2°C e 65 + 3% UR).
Figure 3. Hygroscopic behavior of the treatments in climatic chamber (20 + 2°C e 65 + 3% RU).

Na Figura 3 observa-se a influência da temperatura e do tempo de retificação térmica na redução da higroscopicidade da madeira, bem como a influência no tempo de estabilização dos tratamentos em câmara climática. Nota-se claramente a distinção de três grupos bem definidos de umidade de equilíbrio: os tratamentos retificados termicamente a 230°C, os retificados termicamente a 200°C e o tratamento testemunha. Assim, mais uma vez, comprova-se o efeito da temperatura em detrimento ao efeito do tempo de retificação térmica na redução da umidade de equilíbrio.

Esperava-se que os tratamentos retificados termicamente atingissem equilíbrio com o ambiente primeiro em relação ao tratamento testemunha, uma vez que a madeira tornou-se menos higroscópica. Porém, de acordo com a Figura 1, não foi isso o observado, mas esse resultado pode ser explicado, uma vez que o controle da umidade de equilíbrio foi feito por verificações diárias de massa. Os corpos-de-prova dos tratamentos retificados termicamente obtiveram massas inferiores ao tratamento testemunha ao final do ensaio, devido à menor capacidade de absorverem água. Assim, pequenas variações de massa obtidas na balança digital tiveram maior representatividade no cálculo da umidade de equilíbrio do que aquelas observadas para o tratamento testemunha, resultando em uma aparente demora em atingir a umidade de equilíbrio.

CONCLUSÕES

Na redução da umidade de equilíbrio da madeira de *Eucalyptus grandis* retificada termicamente, o efeito dos tempos utilizados (1, 2 e 3 horas) não foi significativo, enquanto o efeito da temperatura foi positivo. Assim, o melhor desempenho foi obtido utilizando-se o tratamento térmico a 230°C por 1 hora. No entanto, a retificação térmica alterou a coloração da madeira, tornando-a mais escura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BATISTA, D.C.; KLITZKE, R.J. **Umidade de equilíbrio da madeira de *Eucalyptus grandis* submetidas a diferentes condições ambientais.** (Não publicado).

BORGES, L.M.; QUIRINO, W.F. Higroscopicidade da madeira de *Pinus caribaea* var *hondurensis* tratado termicamente. **Biomassa & Energia**, Viçosa, v.1, n.2, p.173-182, 2004.

BRITO, J.O.; GARCIA, J.N.; BORTOLETTO JÚNIOR, G.; PESSOA, A.M.C.; SILVA, P.H.M. Densidade básica e retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis*, submetida a diferentes temperaturas de termoretificação. **Cerne**, Lavras, v.12, n.2, p.182-188, 2006.

COPANT – COMISSIÓN PANAMERICANA DE NORMASTÉCNICAS. **462:Método de determinación de la contracción.** Buenos Aires, 1972.

DEL MENEZZI, C.H.S. **Estabilização dimensional por meio de tratamento térmico e seus efeitos sobre as propriedades de painéis de partículas orientadas (OSB).** 2004. 226p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION. **Thermowood handbook.** Helsinki, Finland, 2003. 66p.

KOLLMANN, F.F.P.; CÔTÉ JUNIOR, W.A. **Principles of wood science and technology.** Berlin: Springer-Verlag, 1968. 592p.

PINCELLI, A.L.P.S.M.; BRITO, J.O.; CORRENTE, J.E. Avaliação da termoretificação sobre a 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 and Technology**, Berlin, n.40, p.647-663, 2006.

SHI, J.L.; KOCAEFE, D.; ZHANG, J. Mechanical behaviour of Québec wood species heat-treated using thermo wood process. **Wood Science and Technology**, Berlin, n.65, p.255-259, 2007.

SIAU, J.F. **Wood: influence of moisture on physical properties.** Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University. Department of Wood Science and Forest Products, 1995. 227p.

SIMPSON, W.T.; TENWOLDE, A. Physical properties and moisture relations of wood. In: USDA FOREST SERVICE. **Wood handbook: wood as an engineering material**. Madison: Forest Products Laboratory, 1999. Cap.3.

SKAAR, C. **Water in wood**. Syracuse: Syracuse University Press, 1972. 218p.

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

VITAL, B.R.; DELLA LUCIA, R.M. Efeito do aquecimento na estabilidade dimensional e na higroscopicidade da madeira. *Revista Árvore*, Viçosa, v.6, n.2, p.150-161, 1982.

Recebido em 05/10/2009

Aceito para publicação em 16/04/2010

