

CORRELAÇÃO ENTRE DUREZA JANKA E OUTRAS PROPRIEDADES DA MADEIRA DE *Eucalyptus grandis* MODIFICADA TERMICAMENTE

CORRELATIONS BETWEEN JANKA HARDNESS AND OTHERS PROPERTIES IN THERMALLY-MODIFIED *Eucalyptus grandis* WOOD

Fred W. Calonego ⁽¹⁾, Elias T. D. Severo ⁽²⁾, Aline F. de Brito ⁽³⁾, Paula L. M. Rodrigues ⁽⁴⁾, Melany M. A. Pelozzi ⁽⁵⁾

(1) Pós Dr., UNESP, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, Brasil.

(2) Prof. Dr., UNESP, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, Brasil.

(3) Doutoranda em Agronomia, UNESP, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, Brasil.

(4) e (5) Mestre em Ciência Florestal, UNESP, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, Brasil.

Endereço de contato: fwcalonego@ig.com.br

Código de identificação: T3-06

Resumo

A madeira de Eucalipto possui baixa estabilidade dimensional e durabilidade natural. A modificação térmica é uma solução para esses problemas. Contudo, esse tratamento altera as propriedades mecânicas do material. A dureza Janka é um ensaio simples e apresenta correlações com a massa específica e a resistência à compressão paralela às fibras da madeira. Assim, o presente estudo teve como objetivo verificar as correlações entre a dureza Janka e outras propriedades físico-mecânicas da madeira de *Eucalyptus grandis* modificada termicamente. Para tanto, tábuas centrais de 19 árvores de *E. grandis* com 5,9 anos de idade foram utilizadas. As tábuas foram secas até 10% de umidade, aplainadas com 32 mm de espessura e cortadas com 0,60 m de comprimento. Uma das peças, de cada tábua, foi mantida em seu estado original (controle) e as demais foram modificadas termicamente à 180°C, 200°C e 220°C. Corpos-de-prova foram produzidos para os ensaios de dureza Janka, compressão paralela às fibras e flexão estática. O material foi aclimatizado em câmara climática até a madeira controle atingir 12% de umidade. Os ensaios mecânicos foram realizados em uma máquina universal de ensaios com capacidade de 100 kN. Os resultados mostraram que: (1) existe correlação (Pearson) direta entre a dureza Janka e a massa específica e as resistências em flexão e em compressão paralela da madeira; e (2) a modificação térmica com 180°C e 220°C elimina as correlações entre a dureza Janka e as respectivas resistências à flexão e compressão paralela às fibras da madeira.

Palavras chave: madeira termorretificada; eucalipto; propriedades mecânicas; densidade da madeira

Abstract

*Eucalypts wood has low dimensional stability and natural durability. Thermal modification solves these problems. However, this thermal treatment changes the mechanical properties of the wood. Janka hardness is a simple test and presents correlations with density and compressive strength parallel to grain. This study aimed to evaluate the correlations between Janka hardness and other physical-mechanical properties of thermally-modified *Eucalyptus grandis* wood. The present study utilized boards that contained the pith from 5.9 years old *E. grandis* trees. The boards were dried up to 10.0% moisture content, planing to 32-mm thick, and cutted into smaller pieces measuring 0.60 m in length. Subsequently, one piece was kept in its original condition and others pieces were thermally-modified at 180°C, 200°C and 220°C. Specimens were obtained for the Janka hardness, compression-parallel-to-grain and static-bending tests. All of the specimens were placed in a climatic chamber (21°C and 65% relative humidity) until the untreated wood reaches 12% moisture content. The mechanical tests were performed in a universal test machine with a capacity of 100 kN. The results showed that: (1) there is a direct correlation (Pearson test) between Janka hardness and density at 12% moisture content and compressive strength parallel to grain and strength at static bending of wood; and (2) thermal modification at 180°C and 220°C eliminates the correlations between Janka hardness and compressive strengths parallel to grain and strength at static bending.*

Keywords: thermally-modified wood; eucalypts; mechanical properties; density of wood

1. INTRODUÇÃO

Dureza é a capacidade de um corpo de resistir à deformação. Durante esse teste, um objeto de geometria conhecida é forçado para dentro de um corpo, e a dureza é definida como a relação da força aplicada ao tamanho da indentação [1, 2]. A dureza da madeira é uma propriedade importante para pisos de madeira, laminados e para mobiliário de cozinha e escritório [3].

Nas caracterizações físico-mecânicas das madeiras de 30 espécies ficou constatado que a dureza Janka apresenta correlações significativas com a massa específica básica ($r = 0,91$) e com as resistências à compressão paralela ($r = 0,86$) e em flexão ($r = 0,86$) [4].

DUMAIL *et al.* [5] concluíram que a dureza Janka apresenta alta correlação ($r = 0,94$) com a massa específica básica da madeira de *Pinus pinaster*. Em estudo semelhante HERÄJÄRVI [3] constatou que a dureza Brinell é altamente correlacionada com a massa específica básica da madeira de *Betula pendula* ($r = 0,787$) e de *Betula pubescens* ($r = 0,737$).

DICKSON *et al.* [6] caracterizaram as madeiras provenientes de *Eucalyptus dunnii*, com 9 e 25 anos, e concluíram que a massa específica é a melhor propriedade preditiva da dureza Janka, pois essas propriedades apresentam correlação de 0,61 e 0,60 nas respectivas idades estudadas.

Muitos processos de modificação térmica da madeira são descritos na literatura. Em geral, eles apresentam em comum o fato da madeira ser exposta a temperaturas próximas a 200°C durante várias horas. Esses tratamentos melhoram a estabilidade dimensional e a resistência natural da madeira aos agentes xilófagos [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13].

Contudo, em geral, as propriedades mecânicas da madeira diminuem com o aquecimento [1, 14, 15]. Quando a madeira é modificada termicamente, ocorre a degradação térmica do material, resultando em perda de massa [9, 12, 14, 15]. Assim, a resistência mecânica da madeira é reduzida, geralmente, em cerca de 30% [9, 12].

O tratamento térmico da madeira de *Eucalyptus globulus* entre 190°C e 210°C ocasionou a diminuição nos módulos de ruptura e de elasticidade em flexão estática na ordem de 50,0% e 15,0%, respectivamente [16]. A madeira de *Eucalyptus camaldulensis*, quando modificada termicamente com 150°C por 2 a 10 horas, apresentou diminuição significativa de 4,4% a 7,4% e de 9,9% a 38,1% na massa específica a 0% de umidade e na dureza Janka, respectivamente. Quando essa madeira foi modificada termicamente a 180°C, durante 2 a 10 horas, houve diminuição significativa de 9,9% a 38,1% e de 14,6% a 44,2% nas respectivas propriedades [17].

Já, a madeira de *Eucalyptus grandis*, quando modificada termicamente entre 180°C e 220°C, apresentou diminuição significativa de 21,5% a 49,3% na massa específica a 12% de umidade e de 12,1% a 20,7% na dureza Janka. Contudo, segundo esse trabalho, os módulos de elasticidade e de ruptura em compressão paralela às fibras e o módulo de elasticidade em flexão estática não foram alterados com o tratamento térmico [8].

Todavia, a correlação entre as propriedades mecânicas e a massa específica da madeira pode servir de subsídio para a indicação de uso de peças, pois não necessita de equipamentos onerosos e de difícil manuseio [4].

Assim, o objetivo desse trabalho foi verificar as correlações entre a dureza Janka e outras propriedades físico-mecânicas da madeira de *Eucalyptus grandis* modificada termicamente.

2. MATERIAL E MÉTODOS

No presente estudo foi utilizada madeira proveniente de árvores de *Eucalyptus grandis* com 5,9 anos de idade da fazenda Rio Claro, da empresa Duratex S.A., localizada em Lençóis Paulista, São Paulo, Brasil. Dezenove árvores foram aleatoriamente selecionadas de um talhão com 2,2 ha. Após a derrubada, as árvores foram traçadas em toras com 6,0 m de comprimento. A primeira tora de cada árvore com 20 a 22 cm de diâmetro foi processada mecanicamente em serra de fita dupla. Posteriormente, as tábuas centrais foram secas de 75,7% a 10,0% de umidade em uma estufa de

secagem com capacidade de 2,5 m³ de madeira. As tábuas secas e com aproximadamente 34 mm de espessura foram utilizadas nesse estudo.

2.1 Modificação térmica das tábuas

Dezenove tábuas centrais foram aplainadas com 32 mm de espessura e cortadas em peças menores, com 0,60 m de comprimento. As regiões com nós e fendas foram descartadas. Uma das peças foi mantida em estado original (madeira controle) e as outras peças foram tratadas termicamente (madeira termicamente modificada).

O material foi colocado em uma estufa elétrica com controlador programável. O tratamento térmico (sem atmosfera inerte e por irradiação de calor) foi realizado em etapas, com uma temperatura inicial de 100°C até 180°C, 200°C e 220°C por um período de 2,5 horas, de acordo com a aplicação da patente desenvolvida por SEVERO e CALONEGO [18]. Após o término do tratamento térmico, a estufa elétrica foi desligada e as peças de madeira foram mantidas no seu interior sob resfriamento natural, até alcançarem 30°C.

2.2 Determinação das propriedades físico-mecânicas da madeira

De cada peça de madeira foram retirados corpos-de-prova perfeitamente orientados em relação às três direções estruturais (radial, tangencial e longitudinal), segundo a norma ABNT NBR-7190 [19], para a determinação da massa específica aparente e os ensaios de dureza Janka (50 mm x 32 mm x 75 mm), compressão paralela às fibras (29 mm x 29 mm x 87 mm) e flexão estática (25 mm x 25 mm x 575 mm).

O material foi aclimatizado até a madeira controle atingir 12% de umidade. Os ensaios foram realizados em uma máquina universal com capacidade de 100kN, na FCA, da UNESP de Botucatu-SP, Brasil.

A dureza e as resistências à compressão paralela e flexão da madeira controle foram 19,8 MPa, 39,8 MPa e 69,0 Mpa, respectivamente. A rigidez à compressão e flexão foram 12800 MPa e 10700 MPa. Apenas a dureza e o MOR em flexão foram reduzidos pelo tratamento térmico [8].

Posteriormente, as correlações entre a dureza Janka e as outras propriedades físico-mecânicas da madeira controle de *Eucalyptus grandis* e das modificadas termicamente foram determinadas por meio do teste correlação de Pearson, com 5% de significância.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme proposto no presente estudo, determinou-se correlação entre a dureza Janka e outras propriedades físico-mecânicas da madeira de *Eucalyptus grandis* e o efeito do tratamento de modificação térmica entre 180°C e 220°C nessas correlações (Tabela 1). Já, a Figura 1 mostra as equações das regressões que permitem fazer essas correlações.

Constata-se que na madeira não tratada, a dureza Janka apresenta correlações positivas com a massa específica a 12% e as resistências à compressão paralela e flexão estática ($p \leq 0,05$ pelo teste Pearson).

Esses resultados são coerentes com os apresentados por MELO *et al.* [4], que ao realizarem a caracterização físico-mecânica da madeira de 30 espécies concluíram que a dureza Janka apresenta correlações significativas com a massa específica básica e as resistências à compressão paralela e flexão. Também corroboram com as afirmações de que a dureza Janka apresenta correlação muito forte (0,94) com a massa específica de *Pinus pinaster* [5], de que a dureza Brinell é altamente correlacionada com a massa específica básica da madeira de *Betula pendula* (0,787) e de *Betula pubescens* (0,737) [3] e de que a correlação entre a dureza Janka e a massa específica da madeira foi de 0,91 [4].

Tabela 1: Correlação entre a dureza Janka e outras propriedades físico-mecânicas da madeira de *E. grandis* modificada termicamente.

Tratamento	ρ_{12}	f_{c0}	E_{c0}	f_M	E_M
Controle	0,838 * (19)	0,550 * (19)	0,377 ^{NS} (19)	0,571 * (17)	0,471 ^{NS} (17)
180°C	0,489 * (19)	0,461 * (19)	0,002 ^{NS} (19)	0,309 ^{NS} (19)	0,268 ^{NS} (19)
200°C	0,770 * (19)	0,576 * (19)	-0,320 ^{NS} (19)	-0,346 ^{NS} (18)	0,131 ^{NS} (18)
220°C	0,807 * (19)	-0,005 ^{NS} (19)	0,329 ^{NS} (19)	0,263 ^{NS} (16)	0,290 ^{NS} (16)

sendo: ρ_{12} - massa específica a 12%; f_{c0} - resistência à compressão paralela às fibras; E_{c0} - rigidez à compressão paralela às fibras; f_M - resistência à flexão estática; E_M - rigidez à flexão estática; * - correlação de Pearson a 5% de significância; ^{NS} - correlação não significativa; () - número de repetições.

Resultados semelhantes foram encontrados por DICKSON *et al.* [6] que ao caracterizarem a madeira de *Eucalyptus dunni*, concluíram que a massa específica é a melhor propriedade preditiva da dureza Janka, pois apresentou correlação de 0,61.

Verifica-se na Tabela 1 e Figura 1 que a dureza Janka da madeira modificada termicamente a 180°C já não apresenta interações com a resistência à flexão estática e que tratamentos de 220°C eliminam a correlação entre a dureza e resistência à compressão paralela às fibras da madeira. Salienta-se que os diversos níveis do tratamento térmico não interferem na correlação da dureza Janka com a massa específica da madeira de *E. grandis*

Esses resultados corroboram com os encontrados por CALONEGO *et al.* [8], que ao tratarem termicamente a madeira de *Eucalyptus grandis* concluíram que tanto a massa específica a 12% quanto a dureza Janka apresentaram decréscimos lineares crescentes com o aumento da temperatura do tratamento, e que a rigidez e a resistência à compressão paralela às fibras e à flexão estática da madeira não apresentaram variações com a temperatura de modificação térmica, quando comparadas com o material sem tratamento. Resultados semelhantes foram apontados por UNSAL *et al.* [17] que ao modificarem termicamente a madeira de *Eucalyptus camaldulensis*, com temperaturas de 150°C e 180°C por 2 a 10 horas, concluíram que houve diminuição significativa na massa específica a 0% de umidade e na dureza Janka com o aumento da temperatura e do tempo de exposição da madeira.

As mudanças na composição química da madeira durante o tratamento térmico podem ser responsáveis por esse comportamento. Vários autores [10, 11, 12, 13, 20, 21] afirmaram que a reticulação entre a lignina e os polímeros resultantes da degradação térmica da madeira é responsável pelas variações em diversas propriedades da madeira.

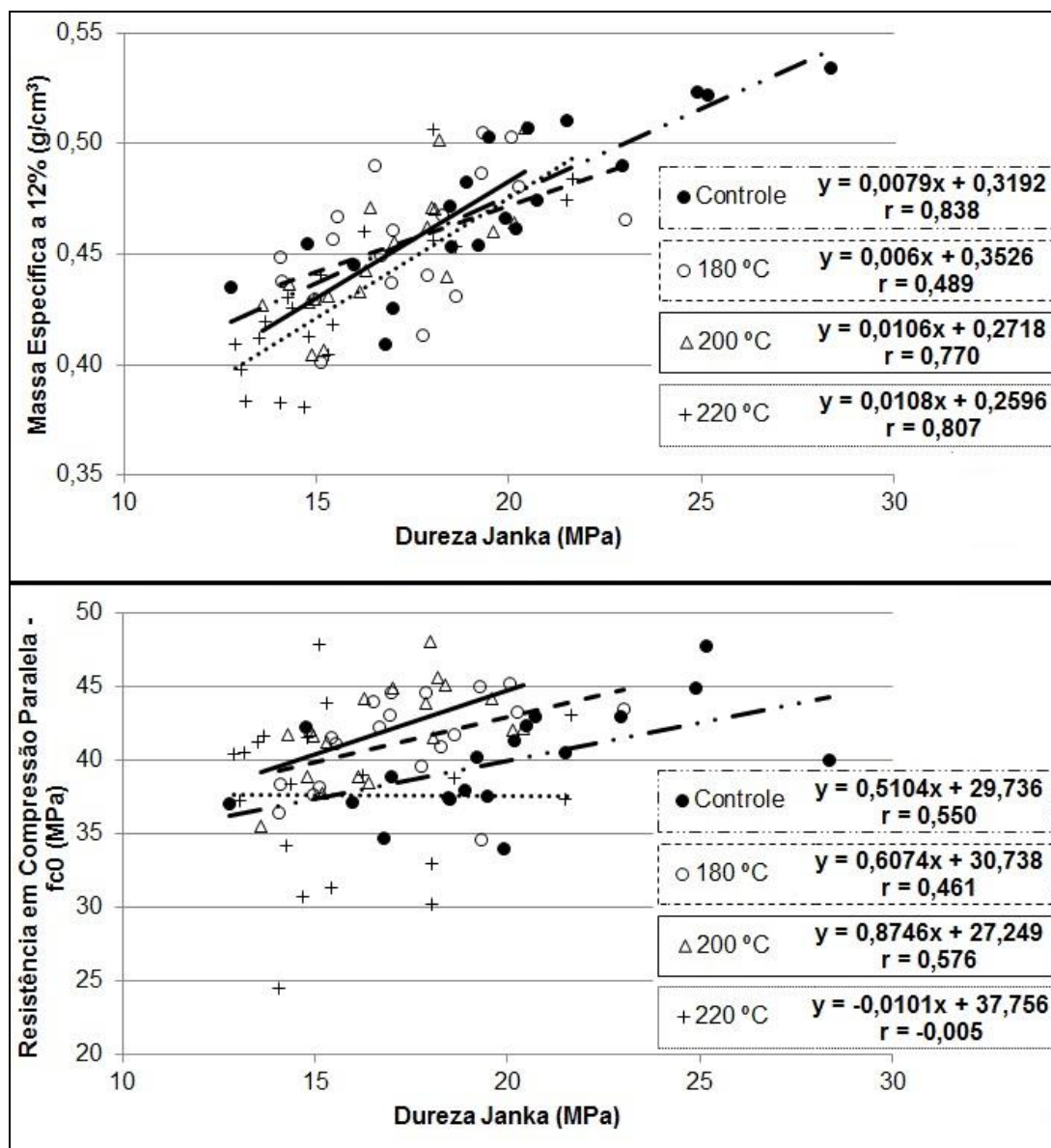


Figura 1: Relação entre a dureza Janka e a massa específica e a resistência em compressão paralela para a madeira de *E. grandis*.

4. CONCLUSÕES

Verificando as correlações entre a dureza Janka e outras propriedades físico-mecânicas da madeira de *E. grandis* modificada termicamente, conclui-se que: (1) existe uma correlação positiva entre a dureza Janka e a massa específica a 12% e as resistências à compressão paralela às fibras e flexão estática na madeira sem tratamento; (2) a modificação térmica elimina as correlações entre a dureza Janka e as resistências à flexão e compressão paralela às fibras, sem interferir na correlação com a massa específica da madeira de *E. grandis*.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil, pelo suporte financeiro através do processo 05/59074-7.

REFERÊNCIAS

- [1] Bodig, J. and Jayne, B. A., 'Mechanics of wood and wood composites', Van Nostrand Reinhold, New York. (1982), 712 p.
- [2] Doyle, J. and Walker, J. C. F., 'Indentation hardness of wood', *Wood and Fiber Science* **17** (3) (1985) 369-376.
- [3] Heräjärvi, H., 'Variation of basic density and Brinell hardness within mature finnish *Betula pendula* and *B. pubescens* stems', *Wood and Fiber Science* **36** (2) (2004) 216-227.
- [4] Melo, R. R. de, Araldi, D. B.; Stangerlin, D. M., Müller, M.T. e Gatto, D.A. 'Uso das características tecnológicas da madeira para o agrupamento de espécies florestais', *Nativa* **1** (1) (2013) 1-7.
- [5] Dumail, J. F.; Castera, P. and Morlier, P., 'Hardness and basic density variation in the juvenile wood of maritime pine', *Annals of Science Forest* **55** (1998) 911-923.
- [6] Dickson, R. L.; Raymond, C. A.; Joe, W. and Wilkinson, C. A., 'Segregation of *Eucalyptus dunnii* logs using acoustics', *Forest Ecology and Management* **179** (2003) 243-251.
- [7] Calonego, F. W., Severo, E. T. D. and Furtado, E. L., 'Decay resistance of thermally-modified *Eucalyptus grandis* wood at 140°C, 160°C, 180°C, 200°C and 220°C', *Bioresource Technology* **101** (23) (2010) 9391-9394.
- [8] Calonego, F. W., Severo, E. T. D. and Ballarin, A. W., 'Physical and mechanical properties of thermally-modified wood from *E. grandis*', *Holz als Roh- und Werkstoff / European Journal of Wood and Wood Products* **70** (4) (2012) 453-460.
- [9] Homan, W., Tjeerdsma, B., Beckers, E. and Jorissen, A., 'Structural and other properties of modified wood', In *Proceedings of World Conference on Timber Engineering*, (British Columbia, 2000), 8p.
- [10] Metsä-kortelainen, S., Anitkainen, T. and Viitaniemi, P., 'The water absorption of sapwood and heartwood of Scots pines and Norway spruce heat-treated at 170°C, 190°C, 210°C and 230°C', *Holz als Roh- und Werkstoff / European Journal of Wood and Wood Products* **64** (3) (2005) 192-197.
- [11] Severo, E. T. D., Calonego, F. W. and Sansígolo, C. A., 'Physical and chemical changes in juvenile and mature woods of *Pinus elliottii* var. *elliottii* by thermal modification', *Holz als Roh- und Werkstoff / European Journal of Wood and Wood Products* **70** (5) (2012) 741-747.
- [12] Waskett, P. and Selmes, R.E., 'Opportunities for UK grown timber: wood modification state of the art review', Building Research Establishment LTD, proj n° 203-343. (2001), 83p.
- [13] Weiland, J. J. and Guyonnet, R., 'Study of chemical modifications and fungi degradation of thermally-modified wood using DRIFT spectroscopy', *Holz als Roh- und Werkstoff / European Journal of Wood and Wood Products* **61** (2) (2003) 216-220.
- [14] Forest Products Laboratory, 'Wood handbook: wood as an engineering material' USDA, Washington. (1999) 463p.
- [15] Haygreen, J. G. and Bowyer, J. L., 'Forest products and wood science: an introduction', University Press/AMES, Iowa State. (1996), 484p.
- [16] Esteves, B., Marques, A. V., Domingos, I., Pereira, H., 2007. 'Influence of steam heating on the properties of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypt (*Eucalyptus globulos*) wood', *Wood Science and Technology* **41** (3) (2007) 193-207.
- [17] Unsal, O., Korkut, S. y Atik, C., 'The effect of heat treatment on some properties and colour in eucalyptus (*Eucalyptus camaldulensis* dehn.) wood', *Maderas, Ciencia y tecnología*, **5** (2) (2003) 145-152.
- [18] Severo, E. T. D. e Calonego, F. W., 'Processo de modificação térmica, por irradiação de calor, para a melhora da estabilidade dimensional e da durabilidade biológica de madeira sólida', *INPI PI0902/38-8A2*, (2009).
- [19] ABNT NBR 7190, 'Projeto de estruturas de madeira', ABNT, Rio de Janeiro. (1997).
- [20] Bhuiyan, T. R., Hirai, N. and Sobue, N., 'Effect of intermittent heat treatment on crystallinity in wood cellulose', *Journal of Wood Science* **47** (5) (2001) 336-341.
- [21] Wikberg, H. and Maunu, S. L., 'Characterization of thermally-modified hard- and softwoods by ¹³C CPMAS NMR', *Carbohydrate Polymers* **58** (2004), 461-466.