

Modificação térmica e propriedades tecnológicas da madeira de *Eucalyptus cloeziana*

Lenon Augusto Simon Huller¹, Clóvis Roberto Haselein¹, Amanda Grassmann da Silveira¹, Walmir Marques de Menezes¹, Maiara Talgatti¹, Joel Telles de Souza¹, Elio José Santini¹

¹Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima, 1000, Camobi, CEP 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil

*Autor correspondente:
amandagrassmann@gmail.com

Termos para indexação:

Estabilidade dimensional
Termorretificação
Qualidade da madeira

Index terms:

Dimensional stability
Thermal treatment
Wood quality

Histórico do artigo:

Recebido em 06/06/2016
Aprovado em 09/06/2017
Publicado em 30/06/2017

doi: 10.4336/2017.pfb.37.90.1288

Resumo - O gênero *Eucalyptus* é utilizado para o abastecimento da maior parte da indústria de base florestal no Brasil, mas existem diversos questionamentos acerca da qualidade do material. O tratamento térmico está sendo difundido no Brasil, visando melhorar as propriedades iniciais da madeira. O objetivo desta pesquisa foi estudar o efeito do tratamento térmico nas propriedades físicas e na resistência mecânica de *Eucalyptus cloeziana*. Foram amostradas cinco árvores, com aproximadamente 21 anos, sendo seccionadas as duas primeiras toras com comprimento de 3 m cada. Para o tratamento térmico foram aplicadas temperaturas finais de 160 °C e 210 °C, durante 1 h. As propriedades físicas avaliadas foram: umidade de equilíbrio, redução de massa, perda de massa específica, coeficiente de inchamento total e coeficiente de anisotropia. A determinação da resistência mecânica deu-se por meio do teste de resistência máxima ao impacto. Houve redução na massa do material após a aplicação das temperaturas. As demais propriedades físicas avaliadas indicaram que o tratamento térmico foi eficiente no aumento da estabilidade dimensional da espécie, principalmente com a temperatura de 210 °C. No entanto, verificou-se que a resistência ao impacto foi drasticamente afetada pelo aumento da temperatura.

Thermal modification and technological characteristics of wood of *Eucalyptus cloeziana*

Abstract - The genera *Eucalyptus* is widely used by Brazilian industries. Nonetheless some concerns still persist regarding some of its technological properties. Aiming the improvement of the wood properties the heat treatment is being largely employed in Brazil. The objective of this research was to study the effect of heat treatment on physical and mechanical properties of *Eucalyptus cloeziana*. We sampled 5 trees with 21 years from which we used the first two logs with length of 3 m each. Heat treatment of 160 and 210 °C were applied for 1 h. The evaluate physical properties were equilibrium moisture content, mass reduction, loss of density, total swelling coefficient (linear and volumetric) and coefficient of anisotropy. The determination of the mechanical strength came through the test of maximum resistance to impact. There was a reduction of the material mass after application of the temperatures. The other evaluated physical properties indicate that the heat treatment was effective in increasing dimensional stability of species, especially under the temperature of 210 °C. However, the resistance to impact was drastically affected by temperature increasing.

Introdução

Existe uma grande demanda por madeiras de qualidade para atender as indústrias de produtos de base madeireira. Devido a isso, ganham espaço as espécies de rápido crescimento, as quais têm-se mostrado como uma alternativa para assistir ao segmento do mercado madeireiro. No Brasil, as espécies com maior amplitude de plantio são as dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*. Em 2012 esses plantios ocupavam aproximadamente 6,66 milhões de ha, sendo 76,6% de *Eucalyptus* (Anuário..., 2013). Estas espécies são fontes de madeiras com utilização diversificada que abastecem a maior parte do setor florestal, apresentando desta forma grande importância econômica.

Buscando melhorar aspectos tecnológicos destas madeiras (características físico-mecânicas, químicas e biológicas), principalmente em sua estabilidade dimensional e durabilidade, pode-se usar tratamentos térmicos (Navi & Sandberg, 2012) como a retificação térmica ou termorretificação, geralmente conduzido em altas temperaturas (variando de 100 a 220 °C, conforme Conte et al., 2014).

A modificação térmica é um processo em que o calor é aplicado à madeira em temperaturas que provocam o início da degradação de seus componentes químicos fundamentais, sobretudo as hemiceluloses, que são os mais sensíveis à ação do calor (Dubey et al., 2012).

O tratamento térmico da madeira vem sendo desenvolvido na Europa nos últimos 20 anos e já é um processo em escala industrial em vários países, como Finlândia, França, Alemanha e Holanda (Dubey, 2010). Como principais vantagens, apresenta a melhoraria da integridade física e das características estéticas da madeira e de seus subprodutos, permitindo maior vida útil (Dilik & Hiziroglu, 2012; Kasemsiri et al., 2012; Bakar et al., 2013). Sendo assim, o presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito da técnica de modificação térmica empregada às madeiras de uma procedência de *Eucalyptus cloeziana* instalada em Santa Maria, por meio da análise de propriedades físicas e mecânicas da espécie.

Material e métodos

Foram utilizadas amostras de árvores da espécie *Eucalyptus cloeziana*, obtidas de plantio situado na cidade de Santa Maria, RS (29°41'03"S

53°48'25W). Foram seccionadas 5 árvores seminais, com aproximadamente 20 anos de idade, das quais foram retiradas as duas primeiras toras de 3 m de comprimento a partir da base com 30 cm de diâmetro, em média. Em seguida, o material foi encaminhado para o Laboratório de Produtos Florestais, pertencente a Universidade Federal de Santa Maria, local onde foi conduzido e avaliado todo o experimento.

Primeiramente foi realizada a confecção de tábuas com aproximadamente 2,5 cm x 15 cm x 250 cm (espessura, largura e comprimento), sendo posteriormente confeccionados 90 corpos de prova, com 2 cm x 2 cm x 8 cm destinados aos ensaios físicos e 48 amostras com 2 cm x 2 cm x 30 cm para o ensaio mecânico. Estes foram acondicionados em câmara climatizada (20 °C de temperatura e 65% umidade relativa), para a estabilização do peso, sendo esta característica o ponto inicial para os tratamentos.

Os tratamentos térmicos foram conduzidos em estufa elétrica com circulação de ar, com temperatura inicial de 100 °C, período de pré-aquecimento de 60 min, período este para a estufa atingir a temperatura de cada tratamento com taxa de aquecimento de 1,6 °C. Em seguida, foram aquecidos por 45 min até que atingissem 160 °C. Seguiu-se o aquecimento por mais 1 h e 45 min até que os corpos de prova atingissem 210 °C. Os corpos de prova foram mantidos em cada uma das temperaturas finais por mais 60 min, conforme metodologia adaptada de Conte et al. (2014). Após, realizou-se condicionamento das amostras em câmara climatizada até atingirem equilíbrio higroscópico, para posterior avaliação física e mecânica.

Propriedades Físicas

Os ensaios físicos seguiram os procedimentos estabelecidos na norma ASTM D143-94 (American Society Testing and Materials, 2000), sendo avaliadas as seguintes propriedades: umidade de equilíbrio, redução de massa, perda de massa específica, coeficiente de inchamento total e coeficiente de anisotropia de inchamento (Equações 1 a 5, respectivamente). Foram utilizados 5 corpos de prova para avaliação de cada propriedade, equivalendo a 30 repetições por tratamento (controle, 160 °C, 210 °C).

$$UE = \frac{M_C - M_O}{M_O} \times 100 \quad (1)$$

$$R = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (2)$$

$$\rho = \frac{M_{12\%}}{V_{12\%}} \quad (3)$$

$$a_L = \frac{D_U - D_0}{D_0} \times 100 \quad (4)$$

$$a_V = \frac{V_U - V_0}{V_0} \times 100 \quad (5)$$

$$C.A = \frac{IT}{IR} \quad (6)$$

Onde: UE = umidade de equilíbrio na condição de 20 °C e 65% de umidade relativa (%); MC = massa constante na condição de equilíbrio higroscópico (g); M0 = massa constante na condição de secagem em estufa a 103 ± 2 °C (g); R = redução de massa (%); M1 e M2 = massa da madeira, respectivamente, antes e após o tratamento térmico (g); ρ = massa específica das amostras antes e após o tratamento térmico na umidade de equilíbrio de 12% (20 °C e 65% UR) (g cm⁻³); M12% = massa das amostras a 12% de umidade relativa (g); V12% = volume da amostra a 12% de umidade (cm³); αL - inchamento linear, (%); DU - dimensão linear na condição de umidade desejada (cm); D0 - dimensão linear na condição seca a 103 ± 2 °C, (cm); αv - inchamento volumétrico, (%); VU - volume na condição de umidade desejada (cm³); V0 - volume na condição seca a 103 ± 2 °C (cm³); C.A = coeficiente de anisotropia de inchamento; IT = inchamento tangencial (%); IR = inchamento radial (%).

Propriedade mecânica

A determinação da resistência máxima ao impacto, por meio do ensaio de flexão estática, baseou-se na norma NBR 7190 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1997). Foram utilizadas 16 amostras (8 radial e 8 tangencial) por tratamento (controle, 160 °C, 210 °C). Para esse ensaio foi utilizado o Pêndulo de Charpy, onde se obteve o trabalho absorvido (W) para romper o corpo-de-prova. Com isso, pode-se calcular a resistência ao impacto à flexão (Equação 7).

$$f_{bw} = \frac{w * 1000}{b * h} \quad (7)$$

Onde: fbw = resistência ao impacto à flexão (KJ mm⁻²); w = energia necessária para fratura do corpo-de-prova (J); b e h = dimensões transversais do corpo-de-prova (mm).

O conjunto de dados foi avaliado por meio do delineamento inteiramente casualizado e os dados analisados por análise de variância. Quando observada diferença significativa, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey com 5% de probabilidade de erro.

Resultados

Na Tabela 1 estão apresentadas as médias referentes à umidade de equilíbrio, redução de massa e massa específica aparente para as madeiras de *Eucalyptus cloeziana* submetidas aos tratamentos térmicos e controle. Observa-se que os valores de umidade de equilíbrio diminuíram com o aumento da temperatura para todos os tratamentos. O tratamento controle, com madeira não tratada termicamente, apresentou o maior valor de umidade de equilíbrio para essa espécie (17,48%), evidenciando que os tratamentos térmicos reduzem a higroscopicidade da madeira.

A menor perda de massa de *E. cloeziana* (7,37%) foi encontrada na madeira submetida a menor temperatura (160 °C). No entanto, a massa específica aparente reduziu para 0,87 g cm⁻³ e 0,85 g cm⁻³, com os tratamentos a 160 °C e 210 °C, respectivamente, diferindo do tratamento controle (Tabela 1).

Na Tabela 2 pode-se observar que os valores médios de inchamento total e o coeficiente de anisotropia, para as amostras modificadas termicamente, foram estatisticamente diferentes. Apenas o valor médio do inchamento longitudinal do tratamento a 210 °C não seguiu o mesmo padrão das outras variáveis avaliadas.

Na Tabela 3 encontram-se os valores médios do ensaio de resistência máxima ao impacto. Observa-se que as médias da resistência máxima ao impacto tanto no sentido radial como tangencial demonstraram um decréscimo acentuado com o aumento da temperatura.

Tabela 1. Médias de umidade de equilíbrio, redução de massa e massa específica aparente das madeiras de *Eucalyptus cloeziana* em função dos tratamentos térmicos.

Tratamentos	Média (%)	Redução em relação à média (%)	Coefficiente de variação (%)
Umidade Equilíbrio 12%			
Controle	17,48 a	---	10,14
160 °C	10,51 b	39,87	15,5
210 °C	5,11 c	70,76	15,0
Redução de massa			
160 °C	7,37 b		7,34
210 °C	13,73 a		13,23
Massa específica aparente			
Controle	0,97 a	---	7,27
160 °C	0,87b	10,31	6,43
210 °C	0,85 bc	12,37	5,83

Médias seguidas pela mesma letra, por parâmetro, não diferem estaticamente ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

Tabela 2. Médias do inchamento total e coeficiente de anisotropia das madeiras de *Eucalyptus cloeziana* em função dos tratamentos.

Tratamentos	Radial	Tangencial	Longitudinal	Volumétrico	Redução volumétrica	Coefficiente de anisotropia
Controle	8,84 a (8,02%)	14,79 a (5,06%)	0,54 a (8,54%)	25,65 a (3,89%)	---	1,75 a (3,83%)
160 °C	7,23 b (5,17%)	11,73 b (9,85%)	0,50 b (6,84%)	20,08 b (9,36%)	21,71	1,66 b (3,93%)
210 °C	6,78 c (5,61%)	9,52 c (8,56%)	0,48 bc (9,32%)	17,59 c (12,04%)	31,42	1,45 c (7,06%)

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estaticamente ao nível/ de 5% de significância pelo teste de Tukey. CV = Coeficiente de variação está apresentado entre parênteses.

Tabela 3. Médias do ensaio de resistência máxima ao impacto das madeiras de *Eucalyptus cloeziana* em função dos tratamentos e direção das peças.

Tratamento	Radial (KJ mm ⁻²)	Variação	Tangencial (KJ mm ⁻²)	Variação
Controle	83,94 a	---	71,5 a	---
160 °C	52,27 b	37,55	48,74 b	31,83
210 °C	50,74 c	39,55	34,65 c	51,54

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estaticamente ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

Discussão

A maior redução da umidade de equilíbrio na espécie, em relação ao tratamento controle, foi verificado no tratamento de maior temperatura (210 °C) com reduções

de até 70,76% e a menor redução foi obtida com a temperatura de 160 °C, com reduções de umidade de equilíbrio de 39,87%. Menezes et al. (2014), estudando *Corymbia citriodora* a 180 °C, observaram reduções na umidade de equilíbrio de até 54,3%. Batista et al.

(2011) ao tratarem a madeira de *Eucalyptus grandis* a 180 °C, encontraram as maiores reduções de até 41,11%. Segundo Kocaefe et al. (2008), essa diminuição ocorre devido à perda de sítios de adsorção e à degradação parcial das hemiceluloses.

O maior valor médio de redução de massa encontrado neste trabalho foi o tratamento de maior temperatura (13,73%). Segundo Esteves et al. (2007), a perda de massa por ocasião da aplicação de altas temperaturas é explicada pela baixa estabilidade térmica das hemiceluloses e da região amorfa da celulose, que são despolimerizadas durante a termorreificação.

A maior redução verificada foi de 12,37% na temperatura de 210 °C, e a menor foi com o tratamento a 160 °C, com reduções de 10,31% em relação ao controle. De Moura et al. (2012), em estudo com madeira termorreifica de *E. grandis*, aferiram reduções de massa de 5,4% com a temperatura de 180 °C e 2,63% com 140 °C. Ainda, Unsal & Ayrilmis (2005), em estudo de redução da massa específica na madeira *E. camaldulensis* a temperaturas de 150 °C e 180 °C por 10 h, observaram reduções de 7,1% e 10,0% nas suas massas específicas a uma umidade de 12%. 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 (Araújo et al., 2012).

Em geral, foram obtidos para os tratamentos controle os maiores valores médios de inchamento com a temperatura de 210 °C, sendo observados 9,52%, 6,78% e 0,48% para a orientação tangencial, radial e longitudinal, respectivamente. Os resultados se assemelham aos aferidos por Oliveira & Silva (2003), onde os inchamentos lineares tangencial, radial e longitudinal variaram, respectivamente, entre 3,5 e 15,0%, entre 2,4 e 11,0% e entre 0,1 e 1,0%.

Os valores médios de inchamento volumétrico obtidos para o tratamento controle (25,65%) foram superiores aos 16,47% encontrados por Batista et al. (2011). Todas as médias de inchamento volumétrico para todos os tratamentos diferiram estatisticamente. Com relação às reduções no inchamento volumétrico, a menor variação na madeira ocorreu com o tratamento de 160 °C, com valores próximos de 27,71% e a maior redução encontrada foi na temperatura de 210 °C, com valores próximos a 31,42%.

Verificou-se que os tratamentos térmicos diminuíram significativamente o fator anisotrópico da madeira

de *E. cloeziana* (Tabela 2), quando comparados ao controle (1,75). O menor valor médio foi obtido com a temperatura de 210 °C. Para Poubel et al. (2013), este resultado vem associado à degradação dos grupos hidroxílicos acessíveis, responsáveis pela absorção de água nas paredes celulares da madeira e, com isso, torna a madeira menos higroscópica, resultando na redução do inchamento total e do coeficiente de anisotropia da madeira.

As maiores reduções em relação ao tratamento controle foram de 51,54% para o sentido tangencial e 39,55% para o sentido radial do ensaio, ambas no tratamento de 210 °C. As menores reduções foram de 31,83% no sentido tangencial, e 37,73% no sentido radial para 160 °C.

No que se refere à resistência ao impacto, dependendo da temperatura aplicada podem haver fortes reduções de resistência ao impacto da madeira, não ter qualquer efeito sobre essa propriedade ou os mesmos ocorrerem em pequenas extensões (Gündüz et al., 2008). De acordo com Modes et al. (2017), mesmo que o menor conteúdo de umidade de equilíbrio possa gerar um efeito positivo nas propriedades mecânicas da madeira tratada, esse efeito é muitas vezes superado pela degradação dos componentes químicos.

Conclusões

Os tratamentos térmicos apresentaram alterações nas propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus cloeziana* em todos os ensaios avaliados, sendo que a maior temperatura proporcionou maior influência. As modificações foram positivas no que tange o coeficiente anisotrópico e inchamentos, proporcionando melhores desempenhos. Porém, observou-se redução da resistência máxima ao impacto devido à ação do calor.

Referências

- American Society for Testing and Materials. **ASTM D143**: Standard Test Methods for small clear specimens of timber. West Conshohocken, 2000.
- Anuário estatístico ABRAF 2013: ano base 2012. Brasília, DF, 2013. 148 p. Disponível em: <<http://www.ipef.br/estatisticas/relatorios/anuario-ABRAF13-BR.pdf>>. Acesso em: 26 dez. 2016.
- Araújo, S. O. et al. Propriedades de madeiras termorreificadas de *Eucalyptus grandis* e SP. **Scientia Forestalis**, v. 40, n. 95, p. 327-336, 2012.

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7190**: projetos de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.
- Bakar, B. F. A. et al. Properties of some thermally modified wood species. **Materials and Design**, v. 43, p. 348-355, 2013. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.06.054.
- Batista, D. C. et al. Efeito do tempo e temperatura de modificação térmica na redução do inchamento máximo da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 3, p. 533-540, 2011. DOI: 10.5902/198050983810.
- Conte, B. et al. Propriedades físicas e colorimétricas da madeira termorretificada de *Pinus elliottii* var. *elliottii*. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 104, p. 555-563, 2014.
- De Moura, L. F. et al. Efeitos da termorretificação na perda de massa e propriedades mecânicas de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Floresta**, v. 42, n. 2, p. 305-314, 2012. DOI: 10.5380/rf.v42i2.17635.
- Dilik, T. & Hiziroglu, S. Bending strength of heat treated compressed Eastern redcedar wood. **Materials and Design**, v. 42, p. 317-320, 2012. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.05.050.
- Dubey, M. K. et al. Changes in chemistry, color, dimensional stability and fungal resistance of *Pinus radiata* D. don wood with oil heat treatment. **Holzforschung**, v. 66, n. 1, p. 49, 2012. DOI: 10.1515/HF.2011.117.
- Dubey, M. K. **Improvements in stability, durability and mechanical properties of radiata pine wood after heat-treatment in a vegetable oil**. 2010. 211 f. (Doutorado) - Universidade de Canterbury, Canterbury.
- Esteves, B. et al. Influence of steam heating on the properties of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypto (*Eucalyptus globulus*) wood. **Wood Science and Technology**, v. 41, n. 3, p. 193-207, 2007. DOI: 10.1007/s00226-006-0099-0.
- Gündüz, G. et al. The effects of heat treatment on physical and technological properties and surface roughness of Camiyani Black Pine (*Pinus nigra* Arn. subsp. *pallasiana* var. *pallasiana*) wood. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 7, p. 2275-2280, 2008. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.05.015.
- Kasemsiri, P. et al. Characterization of heat treated Eastern red cedar (*Juniperus virginiana* L.). **Journal of Materials Processing Technology**, v. 212, p. 1324-1330, 2012. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.12.019.
- Kocaefe, D. et al. Effect of thermal treatment on the chemical composition and mechanical properties of birch and aspen. **BioResources**, v. 3, n. 2, p. 517-537, 2008.
- Menezes, W. M. et al. Modificação térmica nas propriedades físicas da madeira. **Ciência Rural**, v. 44, p. 1019-1024, 2014. DOI: 10.1590/S0103-84782014000600011.
- Modes, K. S. et al. Efeito da termorretificação nas propriedades mecânicas das madeiras de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 1, p. 291-302, 2017. DOI: 10.5902/1980509826467.
- Navi, P. & Sandberg, D. **Thermo-hydro-mechanical wood processing**. Boca Raton: CRC Press, 2012. 280 p.
- Oliveira, J. T. S. & Silva, J. C. Variação radial da retratibilidade e densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm. **Revista Árvore**, v. 27, n. 3, p. 381-385, 2003. DOI: 10.1590/S0100-67622003000300015.
- Poubel, D. D. S. et al. Efeito da termorretificação nas propriedades físicas e químicas da madeira de *Pinus caribaea*. **Cerne**, n. 3, p. 391-398, 2013. DOI: 10.1590/S0104-77602013000300005.
- Unsal, O. & Ayrilmis, N. Variations in compression strength and surface roughness of heat-treated Turkish river red gum (*Eucalyptus camaldulensis*) wood. **Journal Wood Science**, v. 51, n. 4, p. 405-409, 2005. DOI: 10.1007/s10086-004-0655-x.