

Tipos de Ruptura em Madeira de *Eucalyptus grandis* Modificada Termicamente

***Fred Willians Calonego, **Elias Taylor Durgante Severo e ***Aline Fernanda de Brito**

Sumário. O presente estudo teve como objetivo verificar os tipos de ruptura durante os ensaios mecânicos 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 nesse estudo. As tábuas foram secas até 10% de umidade, aplainadas com 32 mm de espessura e seccionadas em peças com 0,60 m de comprimento. Posteriormente, uma das peças foi mantida em seu estado original e as demais foram modificadas termicamente à 140°C, 160°C, 180°C, 200°C e 220°C por 2,5 horas. De cada peça foram produzidos corpos-de-prova para os ensaios de compressão paralela às fibras e de flexão estática. O material foi aclimatizado em câmara climática com 21°C e 65% de umidade relativa, no Laboratório de Secagem e Preservação da Madeira da FCA, UNESP, de Botucatu, SP, Brasil. Após os ensaios mecânicos, os tipos de ruptura foram caracterizados pela norma ASTM D-143 (2007). Os resultados mostraram que: (1) existe uma relação direta, pelo teste qui-quadrado, entre a temperatura do tratamento térmico e a ruptura frágil da madeira de *E. grandis*; e (2) a madeira dessa espécie quando modificada termicamente à 220°C apresentou 100% de ruptura caracterizada como frágil.

Palavras-chave: madeira termorretificada; Eucalipto; ruptura frágil; compressão paralela às fibras; flexão estática.

* Engenheiro Florestal Dr.

** Professor Adjunto

*** Engenheira Agrônoma

Universidade Estadual Paulista – UNESP, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Departamento de Ciência Florestal, Fazenda Experimental Lageado, Caixa Postal 237, CEP: 18610-307, Botucatu, SP, BRASIL

1º Autor E-mail: fwcalonego@fca.unesp.br

Types of Failures in Thermally-Modified *Eucalyptus grandis* Wood

Abstract. This study aimed to evaluate the types of failures after the mechanical tests of thermally-modified *Eucalyptus grandis* wood. The present study utilized boards that contained the pith from 5 years and 11 months old *Eucalyptus 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 140°C, 160°C, 180°C, 200°C and 220°C over a period of 2.5 hours. Specimens were obtained for the compression-parallel-to-grain and static-bending tests. All of the specimens were placed in a climatic chamber (21°C and 65% relative humidity) in the Laboratory of Wood Drying and Preservation in the Department of Natural Resources/Forest Sciences, FCA-UNESP, Botucatu-SP, in Brazil. After the mechanical tests the types of failures were classified as recommended by ASTM D-143 (2007). The results show that: (1) there is a direct relationship between the heat treatment temperature and brittle wood by chi-square test; and (2) the *E. grandis* wood when thermally-modified at 220°C presented 100% of fragile failure.

Keywords: thermally-modified wood; Eucalypts; fragile failures; compression parallel to grain; static bending.

1 - Introdução

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 (CALONEGO *et al.*, 2010, 2012; HOMAN *et al.*, 2000; METSÄ-KORTELAJINEN *et al.*, 2005; SEVERO *et al.*, 2012; WASKETT e SELMES, 2001).

O aquecimento da madeira em altas temperaturas ocasiona a degradação das hemiceluloses e das regiões amorfas da celulose, contribuindo com o aumento do grau de cristalinidade desse polímero e melhorar a sua estabilidade dimensional. Concomitantemente, a reticulação entre a lignina e os polímeros resultantes da degradação térmica da madeira dificulta o reconhecimento do substrato pelos fungos e aumenta a resistência natural da madeira aos agentes xilófagos (BHUIYAN *et al.*, 2000, 2001; CALONEGO *et al.*, 2010, 2012; METSÄ-KORTELAJINEN *et al.*, 2005; WASKETT e SELMES, 2001; SEVERO *et al.*, 2012; WEILAND e GUYONNET 2003; WIKBERG E MAUNU, 2004).

Contudo, em geral, as propriedades mecânicas da madeira diminuem com o aquecimento (BODIG e JAYNE, 1982; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999; HAYGREEN e BOWYER, 1996). Quando a madeira é modificada termicamente, ocorre a degradação térmica do material, resultando em perda de massa (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999; HAYGREEN e BOWYER, 1996; HOMAN, *et al.*, 2000; WASKETT e SELMES, 2001). Assim, a resistência mecânica da madeira é reduzida em cerca de 30% (HOMAN *et al.*, 2000; WASKETT e SELMES, 2001).

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 (ESTEVES *et al.*, 2007).

Já, a madeira de *Eucalyptus grandis*, quando modificada termicamente entre 180°C e 220°C, apresentou diminuição significativa de 24,0% a 52,3% no módulo de ruptura em flexão estática, sem alterar o seu módulo de elasticidade. Contudo, segundo esse trabalho, os módulos de elasticidade e de ruptura em compressão paralela às fibras não foram alterados com o tratamento térmico (CALONEGO *et al.*, 2012).

Entretanto, geralmente, a literatura sobre modificação térmica da madeira não mostra o comportamento da ruptura nos ensaios mecânicos. Todavia, qualquer elemento estrutural estará em situação de segurança quando apresenta ruptura dúctil, que é acompanhada por grandes deformações até a ruína do material. Segundo ASTM D-143 (2007), a forma de ruptura em compressão paralela às fibras denominada “fendilhamento” e a superfície de ruptura em flexão estática

denominada “tração com ruptura” são indícios de estrutura molecular modificada e/ou de defeitos internos na madeira.

A realização de cortes longitudinais ao longo de tábuas de *Eucalyptus grandis* tratadas termicamente a 200°C, durante 3 a 4 horas, evidenciou que o material apresentava fendas internas visíveis (CALONEGO e SEVERO, 2010). ZICHERMAN e WILLIAMSON (1982) verificaram que durante a pirólise das madeiras de *Pseudotsuga menziesii* e *Tsuga heterophylla* surgiram micro-fissuras internas devido ao estresse desenvolvido na matriz ligno-celulósica com a degradação térmica da celulose.

Assim, o objetivo desse trabalho foi caracterizar os tipos de ruptura após os ensaios mecânicos 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 SA, localizada em Lençóis Paulista, São Paulo, Brasil. Dezenove árvores foram aleatoriamente selecionadas de um talhão com 2,2 ha. Após o abate, 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 numa 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 e preparo dos corpos-de-prova

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 não tratada) e as outras peças foram tratadas termicamente (madeira termicamente modificada).

O material foi colocado numa 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 140°C, 160°C, 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 (2009). 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.

De cada peça de madeira foram retirados corpos-de-prova perfeitamente orientados em relação aos três planos anatômicos (radial, tangencial e longitudinal), a partir de 40 mm da medula. Os corpos-de-prova de compressão paralela às fibras tinham dimensões de 29 mm x 29 mm x 87 mm, sendo a maior aresta lateral orientada na direção longitudinal. As respectivas dimensões dos corpos-de-prova de flexão estática foram 25 mm x 25 mm x 575 mm.

2.2 - Caracterização das rupturas da madeira de *Eucalyptus grandis*

Todos os corpos-de-prova foram aclimatizados (21°C e 65% de umidade relativa) numa câmara climática, no Laboratório de Secagem e Preservação de Madeiras, da FCA, UNESP, Botucatu-SP, Brasil.

Posteriormente, ensaios de compressão paralela às fibras e de flexão estática da madeira de *Eucalyptus grandis* foram realizados. Os módulos de ruptura em compressão paralela às fibras e em flexão estática da madeira controle foram 39,8 MPa e 69,0 MPa, e apenas a resistência em flexão foi reduzida (até 52,3%) pelo tratamento térmico (CALONEGO *et al.*, 2012).

Após os ensaios mecânicos, todos os corpos-de-prova da madeira não tratada e das termicamente modificadas tiveram as suas formas de ruptura classificadas pela norma técnica ASTM D-143 (2007), conforme mostra a Figura 1. As associações entre as variáveis (temperatura do tratamento e tipo de ruptura) foram determinadas por meio do teste do qui-quadrado.

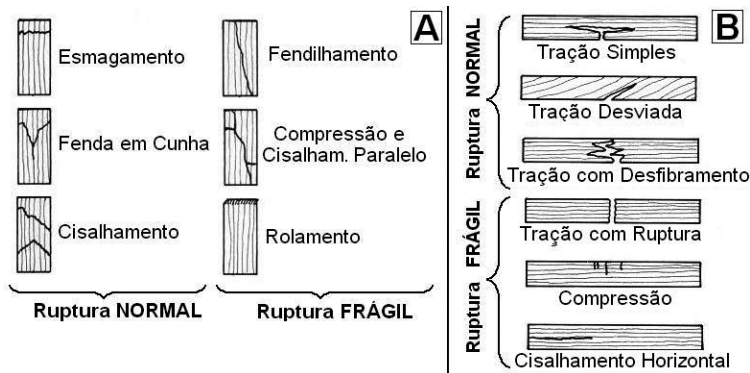


Figura 1 - Formas de ruptura em compressão paralela às fibras (A) e tipos de superfícies de ruptura em flexão estática (B) pela norma técnica ASTM D-143 (2007).

3 - Resultados e discussão

Conforme proposto no presente estudo, determinou-se o efeito de diferentes temperaturas de modificação térmica sobre as formas de ruptura e os tipos de superfícies de ruptura dos corpos-de-prova de *Eucalyptus grandis*, após os ensaios de compressão paralela às fibras e de flexão estática. A Tabela 1 mostra a classificação das formas e dos tipos de superfície de ruptura, conforme o estabelecido pela norma ASTM D-143 (2007), em função do número de corpos-de-prova provenientes tanto de madeira não tratada como das termicamente modificadas.

Constata-se que 100% dos corpos-de-prova da madeira não tratada e das termicamente modificadas entre 140°C e 160°C apresentaram tipos de ruptura classificados como normais, após os ensaios de compressão paralela às fibras e de flexão estática. Aproximadamente 89,5% e 26,3% das madeiras tratadas com 180°C e 200°C apresentaram forma normal de ruptura, no ensaio de compressão paralela às fibras. Em torno de 84,2% e 55,6% do número de peças desse material apresentaram superfície de rupturas classificadas como normais após os ensaios de flexão estática.

Tabela 1 - Efeito da termorretificação no tipo de ruptura dos corpos-de-prova de compressão paralela às fibras e de flexão estática da madeira de *E. grandis*.

Forma de Ruptura pela ASTM D-143 (2007)	Ensaio de Compressão Paralela às Fibras											
	N total: 19		N total: 19		N total: 19		N total: 19		N total: 19		N total: 19	
	Controle		140°C		160°C		180°C		200°C		220°C	
	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%
Esmagamento	15	78,9	17	89,5	14	73,7	13	68,4	2	10,5	0	0,0
Fenda em Cunha	4	21,1	2	10,5	5	26,3	4	21,1	3	15,8	0	0,0
Total (Ruptura Normal)	19	100	19	100	19	100	17	89,5	5	26,3	0	0
Fendilhamento	0	0,0	0	0,0	0	0,0	1	5,3	5	26,3	11	57,9
Compressão e cisalhamento paralelo	0	0,0	0	0,0	0	0,0	1	5,3	9	47,4	8	42,1
Total (Ruptura Frágil)	0	0	0	0	0	0	2	10,5	14	73,7	19	100

Ensaio de Flexão Estática												
Tipo de Superfície de Ruptura pela ASTM D-143 (2007)	N total: 17		N total: 18		N total: 18		N total: 19		N total: 18		N total: 16	
	Controle		140°C		160°C		180°C		200°C		220°C	
	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%
Tração Simples	7	41,2	6	33,3	5	27,8	1	5,3	0	0,0	0	0,0
Tração Desviada	3	17,6	5	27,8	4	22,2	6	31,6	4	22,2	0	0,0
Tração com Desfibramento	7	41,2	7	38,9	9	50,0	9	47,4	6	33,3	0	0,0
Total (Ruptura Normal)	17	100	18	100	18	100	16	84,2	10	55,6	0	0
Tração com Ruptura	0	0,0	0	0,0	0	0,0	3	15,8	8	44,4	11	68,8
Compressão	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	1	6,3
Cisalhamento Horizontal	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	4	25,0
Total (Ruptura Frágil)	0	0	0	0	0	0	3	15,8	8	44,4	16	100

sendo: N - número de corpos-de-prova; Compressão paralela às fibras - qui-quadrado = 88,273 com 12 graus de liberdade e $p \leq 0,001$; Flexão estática - qui-quadrado = 69,280 com 12 graus de liberdade e $p \leq 0,001$.

Ficou constatado que existe uma relação direta entre a temperatura do tratamento térmico e o número de corpos-de-prova com rupturas caracterizadas como frágeis ($p \leq 0,001$ pelo teste qui-quadrado), de modo que 100% da madeira de *Eucalyptus grandis* termicamente modificada a 220°C apresenta ruptura frágil após ensaios de sollicitação mecânica.

Esses resultados são coerentes com as conclusões de ROUSSET *et al.* (2004), ZICHERMAN e WILLIAMSON (1982) e CALONEGO e SEVERO (2010), que ao tratarem termicamente as madeiras de *Populus robusta*, *Pseudotsuga menziesii*, *Tsuga heterophylla* e *Eucalyptus grandis* encontraram micro-fendas internas originadas durante os tratamentos térmicos, e com a explicação da norma técnica da ASTM D-143 (2007), na qual as rupturas caracterizadas como frágeis podem ocorrer devido a fendas internas na madeira e à estrutura molecular modificada do material.

As mudanças na composição química da madeira durante o tratamento térmico podem ser responsáveis por esse comportamento. Vários autores, dentre os quais: BHUIYAN *et al.* (2000, 2001), METSÄ-KORTELAJINEN *et al.* (2005), SEVERO *et al.* (2012), WASKETT e SELMES (2001), WEILANDE GUYONNET (2003) e WIKBERG e MAUNU (2004) afirmaram que a reticulação entre a lignina e os polímeros resultantes da degradação térmica da madeira é responsável pela mudança em diversas propriedades.

As prováveis alterações nas propriedades químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus grandis*, durante os tratamentos térmicos, deverão ser em trabalhos futuros melhores elucidadas, pois poderão explicar com melhor exatidão os tipos de ruptura dos corpos-de-prova do material modificado termicamente. Contudo, precauções devem ser tomadas quanto ao uso da madeira de *Eucalyptus grandis* que tenham sido submetidas ao processo de modificação térmica com temperaturas acima de 180°C, no que se refere ao seu uso estrutural.

4 - Conclusões

Verificando o efeito da modificação térmica sobre os tipos de ruptura da madeira de *E. grandis*, conclui-se que: (1) existe uma relação direta entre a temperatura do tratamento térmico e a ruptura frágil da madeira; (2) a madeira de *E. grandis* modificada termicamente a 220°C apresentou 100% de ruptura frágil após ensaios de compressão paralela às fibras e de flexão estática.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Brasil, pelo suporte financeiro através dos processos 05/59074-7 e PNPD-02405/09-1.

Referências bibliográficas

- ASTM D-143 – American Society for Testing and Materials, 2007. *Standard methods of testing small clear specimens of timber*. Annual Book of ASTM Standard, West Conshohocken, 32pp.
- BHUIYAN, T.R., HIRAI, N., SOBUE, N., 2000. Changes of crystallinity in wood cellulose by heat treatment under dried and moist conditions. *Journal of Wood Science* **46**(6):431-436
- BHUIYAN, T.R., HIRAI, N., SOBUE, N., 2001. Effect of intermittent heat treatment on crystallinity in wood cellulose. *Journal of Wood Science* **47**(5):336-341.
- BODIG, J., JAYNE, B.A., 1982. *Mechanics of wood and wood composites*. Van Nostrand Reinhold, New York, 712pp.
- CALONEGO, F.W., SEVERO, E.T.D., 2010. Variação dimensional das tábuas de *Eucalyptus grandis* durante alguns níveis de tempo e temperatura de termorreificação. *Energia na Agricultura* **5**(3):58-67.

- CALONEGO, F.W., SEVERO, E.T.D., BALLARIN, A.W., 2012. 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):453-460.
- CALONEGO, F.W., SEVERO, E.T.D., FURTADO, E.L., 2010. Decay resistance of thermally-modified *Eucalyptus grandis* wood at 140°C, 160°C, 180°C, 200°C and 220°C. *Bioresource Technology* **101**(23):9391-9394.
- 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):193-207
- FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999. *Wood handbook: wood as an engineering material*. USDA, Washington, 463pp.
- HAYGREEN, J.G., BOWYER, J.L., 1996. *Forest products and wood science: an introduction*. University Press/ AMES, Iowa State, 484pp.
- HOMAN, W., TJEERDSMA, B., BECKERS, E., JORISSEN, A., 2000. Structural and other properties of modified wood. In *Proceedings of World Conference on Timber Engineering*, British Columbia, 8pp.
- METSÄ-KORTELAJAINEN, S., ANITIKAINEN, T., VIITANIEMI, P., 2005. 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):192-197.
- ROUSSET, P., PERRÉ, P., GIRARD, P., 2004. Modification of mass transfer properties in poplar wood (*P. robusta*) by thermal treatment at high temperature. *Holz als Roh- und Werkstoff/ European Journal of Wood and Wood Products* **62**(2):113-119.
- SEVERO, E.T.D., CALONEGO, F.W., 2009. 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
- SEVERO, E.T.D., CALONEGO, F.W., SANSÍGOLO, C.A., 2012. 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):741-747.
- WASKETT, P., SELMES, R.E., 2001. *Opportunities for UK grown timber: wood modification state of the art review*. Building Research Establishment LTD, proj n° 203-343, 83pp.
- WEILAND, J.J., GUYONNET, R., 2003. 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):216-220.
- WIKBERG, H., MAUNU, S.L., 2004. Characterization of thermally-modified hard- and softwoods by ¹³C CPMAS NMR. *Carbohydrate Polymers* **58**:461-466
- ZICHERMAN, J.B., WILLIAMSON, R.B., 1982. Microstructure of wood char - Part 2: Fire retardant treated wood. *Wood Science and Technology* **16**(1):19-34.

