

## Análise Termomecânica da Madeira de *Corymbia citriodora* Submetida a Gradientes Térmicos

Marcos Oliveira de Paula<sup>1</sup>, Pedro Licio Loiola<sup>2</sup>, Gisele Rodrigues Moreira<sup>1</sup>,  
Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Rural, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, Alegre/ES, Brasil

<sup>2</sup>Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, Jerônimo Monteiro/ES, Brasil

### RESUMO

A madeira, quando exposta a condições de estresse, como no caso de um gradiente de temperatura, pode levar a estrutura de uma determinada instalação ao desmoronamento. A taxa na qual a madeira se converte em carvão é determinante, em função da redução da seção resistente. A presente investigação teve como objetivo avaliar o comportamento termomecânico da madeira de *Corymbia citriodora* submetida a gradientes de temperatura e diferentes tempos de exposição, com diferentes tratamentos (Verniz e CCB), com o intuito de minimizar o processo de carbonização. No que diz respeito aos ensaios mecânicos, pode-se afirmar que o aumento da temperatura de carbonização e do tempo de exposição das amostras ocasionou um decréscimo da resistência à compressão paralelamente às fibras do material, ocasionado fragilidade de carregamento. Os tratamentos testados (CCB e Verniz) não apresentaram resultados satisfatórios no que diz respeito ao retardo da combustão, não sendo, portanto, recomendáveis para esses fins.

**Palavras-chave:** resistência dos materiais, estruturas de madeira, temperatura.

## Thermo-mechanical Analysis of *Corymbia citriodora* Wood Subjected to Thermal Gradients

### ABSTRACT

Wood exposed to stress conditions, such as temperature gradients, may lead to collapse of installation structure. The rate at which wood becomes charcoal is crucial because of the reduction of the resistant section. This research aimed to evaluate the thermo-mechanical behavior of *Corymbia citriodora* wood subjected to temperature gradients and different exposure times, under different treatments (Varnish and CCB), in order to minimize the carbonization process. With respect to mechanical tests, it is possible to affirm that the increase in carbonization temperature and time of exposure of the samples resulted in a decrease in the compression strength parallel to the fibers of the material, causing brittleness. The treatments (Varnish and CCB) tested did not present satisfactory results with respect to combustion delay; therefore, they are not recommended for such purposes.

**Keywords:** resistance of materials, wooden structure, temperature.

179-8087.032613

-0980 (impresso)

179-8087 (online)

## 1. INTRODUÇÃO

A madeira é um dos materiais mais antigos usados na construção, possuindo enormes potencialidades na construção civil e/ou rural. Apresenta bom desempenho quando aplicada em estruturas, construídas e mantidas de forma adequada. Porém, seu uso como material de construção vem sendo limitado, devido ao preconceito relativo à sua resistência mecânica residual dos elementos anatômicos estruturais em situação de incêndio (Figuerola & Moraes, 2009).

Sendo a madeira um material combustível e, como os demais materiais combustíveis sólidos, quando submetidos a gradientes térmicos, libera gases combustíveis que, por sua vez, queimam e produzem chamas. Tais gases promovem a transferência de calor para o interior da seção de madeira, promovendo a liberação de mais gases inflamáveis, gerando uma reação em cadeia que alimenta a combustão da peça estrutural, ocasionando, assim, uma queda significativa na resistência do material (Leal, 2010).

De acordo com Figuerola & Moraes (2009), a influência da temperatura nos polímeros da madeira, principalmente sobre seu amolecimento, caracterizado pela temperatura de transição vítrea (passagem de um estado desordenado rígido – vítreo – do polímero para um estado desordenado maior), conferindo, às cadeias poliméricas, maior mobilidade. Essa mobilidade, no caso de algumas classes de polímeros naturais, como a hemicelulose, a celulose e a lignina, proporciona um comportamento menos rígido à madeira. A lignina e a hemicelulose são polímeros amorfos e essencialmente termoplásticos, para os quais o principal ponto de amolecimento é aquele da transição vítrea. As transições vítreas da madeira estão ligadas à temperatura, ao teor de umidade, ao peso molecular do polímero e à natureza do material, na forma isolada ou forma de madeira, e na forma cristalina ou amorfa.

A transição vítrea a seco dos polímeros da madeira ocorre preferencialmente a altas temperaturas, quando a taxa de degradação dos polímeros é significativa. Para as hemiceluloses, a transição vítrea é observada na faixa de 150 a 220 °C. Já para a celulose, a temperatura de transição situa-

se entre 200 e 250 °C. Segundo Salmén (1982), a amplitude da faixa de temperatura é, em parte, devida a diferenças na composição química e no teor de umidade, e à existência de grupos flexíveis que reduzem o empacotamento das fibras do polímero. Para a lignina *in situ*, a transição vítrea ocorre a temperaturas superiores a 205 °C, sendo influenciada pelo peso molecular do polímero, em decorrência do aumento do grau de ligações cruzadas (Goring, 1963; Zeronian & Menefee, 1976; Back & Salmén, 1982).

Quando o teor de umidade aumenta, a temperatura da transição vítrea se desloca na direção das temperaturas inferiores, tendendo a uma temperatura-limite, na qual a umidade não exerce um efeito significativo. Para várias espécies, a transição vítrea da lignina *in situ*, no ponto de saturação das fibras, ocorre em zona compreendida entre 60 e 90 °C (Irvine, 1984).

O amolecimento dos polímeros é acompanhado de mudanças importantes nas propriedades mecânicas do material, principalmente do módulo de elasticidade (Back & Salmén, 1982; Irvine, 1984), influenciando no desempenho mecânico da madeira.

Segundo Leal (2010), a temperatura influencia nas propriedades mecânicas da madeira submetida a gradientes térmicos por efeitos temporários e/ou por efeitos permanentes, os quais dependem do grau de degradação do material causado pela exposição ao calor e pela temperatura.

Produtos ignífugos têm por finalidade reduzir a velocidade de queima de um polímero ou tornar o material autoextinguível, em caso de um aumento de temperatura do ambiente: esta é a finalidade dos produtos retardantes de chamas. Existem, basicamente, dois tipos de retardantes de chamas: os de ação física e os de ação química.

Os retardantes de chamas de ação física são os produtos à base de hidróxido de alumínio (alumina tri-hidratada), magnésio e alguns compostos de boro e fósforo. Têm ação/eficácia a temperaturas aproximadamente de 200 a 300 °C, em que absorvem grandes quantidades de calor do ambiente, evitando a formação de gases inflamáveis e tóxicos na atmosfera; conseqüentemente, evitam o processo de pirólise.

Já os retardantes de ação química são os compostos halogenados (à base de bromo e cloro)

e os não halogenados (fosforados). Os produtos de ação química têm por característica interromper a ação dos radicais livres, pelo fato de reagirem com estes radicais gerando substâncias menos energéticas, que são incapazes de desencadear as reações de combustão; são, dessa forma, mais eficientes em reduzir a inflamabilidade dos materiais. Tais produtos não absorvem calor e, conseqüentemente, o processo de pirólise irá acontecer, gerando gases tóxicos e fuligem enquanto existir calor suficiente.

O uso de produtos ignífugos no Brasil ainda está em fase embrionária, ou seja, algumas normas regulamentam o seu uso e não são fiscalizadas, ou mesmo não existem normas para algumas aplicações.

Diante do exposto, a presente investigação tem como objetivo avaliar o comportamento térmico e mecânico de corpos de prova da madeira de *Corymbia citriodora* impregnada com Borato de Cobre Cromatado (CCB) e impermeabilizada com Verniz, quando submetidos a gradientes térmicos por diferentes tempos de exposição. Simula-se, assim, uma situação de risco para as estruturas que têm por uso este material, podendo, com boa precisão, prever o tempo de resistência dos elementos estruturais; possibilita-se, dessa forma, que o fogo seja combatido sem que ocorra o colapso da estrutura. Tal informação certamente contribuirá para sanar, entre outros problemas, as restrições ainda existentes no que diz respeito à construção de edificações de madeiras.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido nos laboratórios do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo (DCFM/CCA/UFES), em Jerônimo Monteiro-ES e contou com a infraestrutura dos seguintes laboratórios: Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção (LEMAC/UFES), em Vitória-ES, e Laboratórios de Construções Rurais da Universidade Federal de Viçosa (DEA/UFV), em Viçosa-MG.

### 2.1. Espécie utilizada, procedência, coleta e amostragem

A espécie selecionada para as caracterizações físico-mecânicas foi *Corymbia citriodora*, em função

de sua disponibilidade e sua aplicação corrente na construção civil, e devido às suas propriedades físico-mecânicas. As árvores foram adquiridas de um plantio com idade de dez anos, sendo abatidas duas árvores aleatoriamente, levando em consideração seus aspectos fitossanitários. As árvores foram adquiridas no município Jerônimo Monteiro-ES, com altitude média de 120 m, temperatura anual média 23,2 °C e Coordenadas 20° 47' S e 41° 23' W. O clima da região é Cwa (clima de inverno seco e verão chuvoso), conforme classificação de Köppen.

### 2.2. Confeção dos corpos de prova

As toras correspondentes ao primeiro terço de cada árvore foram utilizadas para o desdobro em pranchas, de seção transversal retangular, com dimensões nominais de 0,21 × 0,08 m e comprimento, ao longo das fibras, de 4,00 m. Transportadas para o Laboratório de Usinagem e Beneficiamento da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo (LUMBER/UFES), passaram por um processo de redução de suas dimensões para a seção transversal quadrada de 0,06 m de lado e comprimento ao longo das fibras de 0,60 m. Posteriormente, foram submetidas à secagem por ventilação forçada em uma câmara climática durante um período de quatro semanas, para acelerar a retirada da água de capilaridade; assim, o teor médio de umidade era de 38,35% e foram obtidos os valores médios de 19,52% de umidade, com variações de ± 2%.

Após a pré-secagem, as peças passaram novamente por um processo de usinagem, com obtenção de 162 corpos de prova de seção de 0,05 × 0,05 × 0,15 m (radial, tangencial e longitudinal), para a realização da caracterização mecânica (ensaio de compressão paralela às fibras), e 36 corpos de prova de seção 0,02 × 0,03 × 0,05 m (radial, tangencial e longitudinal), para a realização da caracterização física (densidade e umidade). Ambos os ensaios foram realizados conforme recomendações da Norma Brasileira Regulamentadora - NBR 7190 da Associação Brasileira de Normas Técnica - ABNT (1997).

No estudo em questão, foram adotados três tratamentos, cuja finalidade foi verificar sua eficiência no processo de retardar o efeito da

temperatura e do tempo de exposição na degradação térmica superficial das amostras:

- Tratamento 1 (T1) – Madeira de *C. citriodora* sem impermeabilização e/ou impregnação a fim de verificar o comportamento termomecânico da madeira a gradientes de temperaturas e tempos de exposição;
- Tratamento 2 (T2) – Madeira de *C. citriodora* impermeabilizadas com verniz incolor composto de copolímeros acrílicos em emulsão solúveis em água;
- Tratamento 3 (T3) – Madeira de *C. citriodora* impregnadas com Borato de Cobre Cromatado (CCB).

### 2.3. Caracterização física das madeiras

A caracterização física da madeira foi realizada por meio do ensaio de densidade básica e anidra, e umidade das amostras, conforme recomendações da NBR 7190 da ABNT (1997). A densidade básica foi determinada segundo o método de imersão em água, descrito por Vital (1984).

### 2.4. Impregnação e impermeabilização das amostras

Para impregnação da madeira, foi utilizado o Borato de Cobre Cromatado (CCB), tendo 3% de ingredientes ativos de CCB e sendo formulado segundo indicações da NBR 9480 da ABNT (2009), realizado pelo método de célula cheia por meio de uma autoclave-piloto, com dimensões internas de 19,5 cm de diâmetro e 53,0 cm de comprimento. No processo de impregnação, foi seguida a metodologia de Paes (1997) com modificações na pressão, no tempo de impregnação da solução e no tempo de aplicação do vácuo. Inicialmente, foi aplicado um vácuo com pressão nominal de 400 mmHg por um período de tempo de 15 min, com finalidade de retirada de todo o ar contido nos lumes celulares, possibilitando que a solução penetrasse em todo o interior das amostras. Posteriormente, foi aplicada a solução preservativa sob pressão nominal de 7 kgf/cm<sup>2</sup>, por um período de tempo igual a 40 min, finalizando com a aplicação do vácuo final de 400 mmHg por 5 min, com a finalidade de retirada do excesso de solução.

Para a retirada do excesso de produto nas madeiras, as mesmas foram mantidas ao ambiente

por 72 horas e, posteriormente, em estufa a 40 °C pelo mesmo período de tempo.

As demais madeiras foram impermeabilizadas com verniz, um produto comercial à base de água usualmente aplicado em estruturas de madeira, sendo utilizadas duas demãos aplicadas com o auxílio de uma trincha em intervalos de 36 horas.

### 2.5. Aquecimento das amostras

A carbonização das amostras foi realizada no forno vertical da marca Jung, modelo TB30013, com dimensões internas de 50 × 60 × 100 cm do Laboratório de Construções Rurais – DEA/UFV, Viçosa-MG, sendo todas as faces expostas aos gradientes de temperaturas.

Durante esta fase do experimento, foram carbonizados 108 corpos de prova, sendo seis repetições para cada temperatura e tempo de exposição (Tabela 1).

As amostras foram alocadas no equipamento à temperatura ambiente. Em seguida, o equipamento foi programado para permanecer nas temperaturas acima mencionadas por 15, 30 e 45 minutos.

A taxa de aquecimento do forno foi de 100 °C/min, com controle automatizado de elevação de temperatura. Após serem submetidos ao processo de aquecimento, os corpos de prova foram colocados em um dessecador para interromper o processo de carbonização, por meio de abafamento.

### 2.6. Ensaio mecânico

A caracterização mecânica da madeira foi determinada por meio do ensaio de compressão paralela às fibras, realizado nas dependências do Laboratório da Ciência da Madeira (LCM/UFES),

**Tabela 1.** Temperaturas e tempos de exposição aos quais os corpos de prova foram submetidos.

**Table 1.** Temperatures and exposure times in which the bodies of evidence were submitted.

Tratamentos	Temperatura		
	200 °C	300 °C	400 °C
Tempos de exposição (minutos)			
T1	15; 30; 45	15; 30; 45	15; 30; 45
T2	15; 30; 45	15; 30; 45	15; 30; 45
T3	15; 30; 45	15; 30; 45	15; 30; 45

em Jerônimo Monteiro, e do Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção (LEMAC/UFES), em Vitória, tendo como base a ABNT NBR 7190:1997. Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios da marca EMIC, na qual se determinou a resistência da madeira em (MPa), em função do efeito do gradiente de temperatura e do tempo de exposição aos quais foram submetidos os corpos de prova.

Os critérios utilizados para a determinação das dimensões dos corpos de prova para os ensaios mecânicos foram as dimensões compatíveis com o equipamento disponível para os ensaios. Os valores de temperaturas de aquecimento e tempo de exposição da madeira foram baseados em ensaios preliminares.

### 2.7. Análise estatística

O experimento foi desenvolvido em um delineamento inteiramente casualizado, com arranjo fatorial, constituindo três tratamentos (sem impregnação e/ou impermeabilização, verniz e CCB), três temperaturas de aquecimento (200; 300 e 400 °C) e três tempos de exposição (15, 30 e 45 min), com seis repetições.

Os dados experimentais foram submetidos à análise de variância e, quando significativos, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância, utilizando o *software* estatístico SAEG.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os itens que se seguem apresentam os resultados da caracterização física e mecânica durante o período experimental.

### 3.1. Caracterização física das espécies estudadas

Na Tabela 2, constam os valores médios de densidade básica e anidra, e a umidade das

amostras antes dos processos de impregnação e impermeabilização das madeiras.

Em relação à densidade básica, os valores obtidos foram inferiores aos resultados apresentados por diversos autores, como Carmo (1996); Lima (1996); Oliveira et al. (2005), e Pinto (2005). Tal fato pode ser justificado pelo tipo de lenho avaliado, em função de as árvores abatidas serem jovens, com idade de dez anos, uma vez que a densidade básica da madeira tende a aumentar com a idade, em consequência do aumento da espessura da parede celular e da redução dos lúmens celulares.

### 3.2. Ensaio mecânico

A análise de variância (Tabela 3) evidencia a influência dos gradientes térmicos e dos tempos de exposições na redução da capacidade de carga da madeira.

Vários trabalhos foram realizados para determinar a influência da temperatura sobre as propriedades mecânicas da madeira submetida a altas temperaturas (Schaffer, 1967, 1973; Pinto, 2005; Figueroa & Moraes, 2009), mas todos analisaram somente a influência da temperatura sobre as propriedades mecânicas da madeira, diferentemente deste trabalho, que analisou a influência do gradiente de temperatura e do tempo de exposição ao calor sobre a perda de seção resistente da madeira submetida a diferentes métodos de retardar a propagação da combustão no interior da madeira. Os resultados médios dos ensaios de compressão paralela às fibras constam nas Tabelas 4, 5 e 6.

Para o aquecimento da madeira de *C. citriodora* na temperatura de 200 °C sob os diferentes tempos de exposição (15, 30 e 45 min), observa-se que o tratamento sem impregnação (Controle), assim como as amostras impermeabilizadas com verniz, não apresentaram diferenças estatísticas em nenhum dos tempos de exposição (15; 30 e 45 min) no nível de 5% de significância. Para as madeiras impregnadas com CCB, o tempo de aquecimento de 45 minutos não diferiu estatisticamente no nível de

**Tabela 2.** Densidades básica e anidra da madeira de *Corymbia citriodora*.

**Table 2.** Densities basic and anhydrous wood *Corymbia citriodora*.

Espécie	Densidade Básica (g.cm <sup>-3</sup> )	Densidade Anidra (g.cm <sup>-3</sup> )	Umidade (%)
<i>Corymbia torelliana</i>	0,59 ± 0,01	0,64 ± 0,01	19,52 ± 2,46

**Tabela 3.** Análise de variância da perda da capacidade resistente da madeira de *Corymbia citriodora* exposta a gradientes térmicos sob diferentes tempos de exposição.

**Table 3.** Analysis of variance of the loss of the ability of *Corymbia citriodora* resistant wood exposed to thermal gradients under different exposure times.

Fator de Variação	GL	SQ	QM	F
Fator 1 (F1)	2	263,95	131,98	17,98**
Fator 2 (F2)	2	34827,01	17413,50	2372,16**
Fator 3 (F3)	2	3116,67	1558,34	212,29**
Int. F1×F2	4	1737,35	434,34	59,17**
Int. F1×F3	4	16,94	4,24	0,58 <sup>ns</sup>
Int. F2×F3	4	85,59	21,39	2,91**
Int. F1×F2×F3	8	179,65	22,45	3,06**
Tratamentos	26	40227,19	1547,19	21,77**
Resíduo	81	594,60	7,34	
Total	107	40821,79		

\*\*significativo no nível de 5% de significância pelo teste de Tukey; <sup>ns</sup>: não significativo ( $p > 0,05$ ). Fator 1: Tratamento; Fator 2: Temperatura; Fator 3: Tempo.

**Tabela 4.** Influência do aquecimento da madeira de *C. citriodora* na temperatura de 200 °C e o tempo de exposição na perda de resistência mecânica (compressão paralela às fibras) para os diferentes tratamentos.

**Table 4.** Wood heating influence of *C. citriodora* at temperature of 200 °C and exposure time on the loss of mechanical (compression parallel to the fibres) strength for the different treatments.

Temperatura (°C)	Tempo (minutos)	Tratamento		
		Sem Impregnação	Verniz	CCB
200	15	58,0160 Aa *(0,60) (1,04)	52,6052 Ab *(4,97) (9,57)	56,1122 Aab *(0,86) (1,54)
	30	57,8156 Aa *(1,15) (1,99)	52,3021 Ab *(4,39) (8,35)	53,8076 ABa *(8,67) (17,52)
	45	55,4108 Aa *(2,13) (3,84)	52,0040 Aa *(5,09) (9,79)	49,4990 Ba *(3,69) (6,86)

As médias seguidas pela mesma letra, maiúscula na vertical ou minúscula na horizontal, dentro de cada fator, não diferem entre si (Tukey,  $p > 0,05$ ). Valores das médias dados em MPa. \*Os valores entre parênteses são o desvio padrão e o coeficiente de variação (%), respectivamente.

5% significância dos demais tempos (15 e 30 min). As médias de resistência à compressão paralela às fibras mantiveram-se homogêneas entre os tratamentos; no entanto, as amostras sem impermeabilização apresentaram médias relativamente superiores.

Avaliando-se o tempo de aquecimento da madeira de *C. citriodora* por 15 minutos, os tratamentos controle e CCB não diferiram estatisticamente no nível de 5% de significância, fato este não observado para as amostras impermeabilizadas com verniz. Já em relação ao tempo de aquecimento da madeira por um período de 30 minutos, apenas as amostras impermeabilizadas com verniz diferiram-se estatisticamente dos demais tratamentos (Controle e CCB) no nível de 5% de significância pelo teste de Tukey. Tal fato pode ser explicado em função de a camada de verniz nas superfícies das amostras

manter aquecida a madeira por um tempo maior do que os demais tratamentos (controle e CCB), ocasionando a fragilidade dos elementos estruturais da madeira de *C. citriodora*.

Os valores médios de resistência à compressão paralela às fibras da madeira de *C. citriodora* submetidas à temperatura de 200 °C podem ser observados na Figura 1.

Os resultados obtidos para a resistência à compressão para a temperatura de 200 °C foram superiores aos obtidos por Schaffer (1973), Knudson & Schniewind (1975), que analisaram a influência da temperatura nas propriedades mecânicas para a espécie *Pseudotsuga menziesii*, e por Barreira (2008), para a espécie *Schizolobium amazonicum*.

Para a madeira de *C. citriodora* submetida ao aquecimento de 300 °C, sob os diferentes tempos de

**Tabela 5.** Influência da temperatura de 300 °C e do tempo de exposição (15, 30 e 45 min) na perda de resistência mecânica da madeira de *Corymbia citriodora* sob diferentes tratamentos.**Table 5.** Influence of temperature of 300 °C and the exposure time (15, 30 and 45 min) in the loss of mechanical strength of the wood of *Corymbia citriodora* under different treatments.

Temperatura (°C)	Tempo (minutos)	Tratamento		
		Sem Impregnação	Verniz	CCB
300	15	46,8938 Aa *(1,18) (2,51)	43,3868 Aa *(1,44) (3,32)	44,2886 Aa *(1,26) (2,81)
	30	28,5571 Ba *(1,83) (6,42)	28,9579 Ba *(3,12) (10,80)	26,3527 Ba *(1,51) (5,74)
	45	23,5471 Ca *(2,48) (10,85)	22,1443 Ca *(1,71) (7,73)	17,4349 Cb *(1,20) (6,89)

As médias seguidas pela mesma letra, maiúscula na vertical ou minúscula na horizontal, dentro de cada fator, não diferem entre si (Tukey,  $p > 0,05$ ). Valores das médias dados em MPa. \*Os valores entre parênteses são o desvio padrão e o coeficiente de variação (%), respectivamente.

**Tabela 6.** Influência da temperatura de 400 °C e do tempo de exposição (15, 30 e 45 min) na perda de resistência mecânica da madeira sob diferentes tratamentos.**Table 6.** Influence of temperature of 300 °C and exposure time (15, 30 and 45 min) in loss of mechanical strength of wood under different treatments.

Temperatura (°C)	Tempo (minutos)	Tratamento		
		Sem Impregnação	Verniz	CCB
400	15	18,24 Aa *(0,45) (2,49)	18,91 Aa *(0,50) (2,64)	11,12 Ab *(0,44) (4,04)
	30	14,23 Aa *(0,39) (2,74)	11,80 Ba *(0,42) (3,56)	10,49 Aa *(0,35) (3,34)
	45	2,23 Ba *(0,61) (27,54)	2,93 Ca *(0,52) (18,05)	1,55 Ba *(0,48) (30,96)

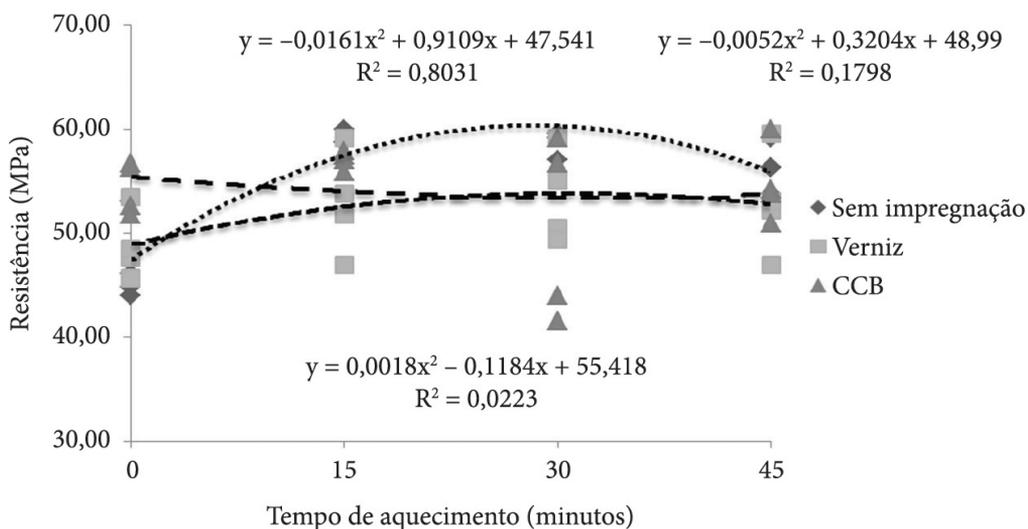
As médias seguidas pela mesma letra, maiúscula na vertical ou minúscula na horizontal, dentro de cada fator, não diferem entre si (Tukey,  $p > 0,05$ ). Valores das médias dados em MPa. \*Os valores entre parênteses são o desvio padrão e o coeficiente de variação (%), respectivamente.

exposição (15, 30 e 45 min), todos os tratamentos avaliados (Controle, impermeabilização com Verniz e impregnação com CCB) diferiram-se estatisticamente no nível de 5% de significância (Tabela 5). Pode-se considerar que, para esta temperatura de exposição, o fator tempo é um importante fator na perda da capacidade de carregamento de estruturas em madeiras.

Para o tempo de aquecimento da madeira por 15 minutos, não foi observada diferença estatística no nível de 5% de significância em nenhum dos tratamentos empregados. Fato este também observado para o tempo de aquecimento das amostras por 30 minutos. Em relação ao tempo de 45 minutos, apenas as madeiras impregnadas com CCB diferiram-se estatisticamente dos demais tratamentos (Controle e Verniz), avaliados pelo teste de Tukey no nível de 5% de significância. Tal fato

pode ser explicado em razão das características do tratamento de impregnação da madeira de *Corymbia citriodora* pelo método de célula-cheia, que pode causar rompimentos de estruturas submicroscópicas da madeira, ocasionando a sua fragilidade de carregamento, como demonstrado por Hosseini Hashemi et al. (2010) e Brocco et al. (2012). Outro fator relevante são as características do preservante de madeira utilizado como retardantes de chamas, cujo princípio ativo é de ação física, absorvendo grandes quantidades de calor do ambiente e evitando a formação de gases inflamáveis e tóxicos ao ambiente.

Para a temperatura de 300 °C, os tempos de aquecimento não exerceram influência significativa sobre a resistência mecânica à compressão paralela às fibras na madeira de *Corymbia citriodora* para os tratamentos Controle e Verniz.



**Figura 1.** Resistência da madeira de *C. citriodora* (MPa) submetida ao aquecimento de 200 °C, sob os diferentes tempos.

**Figure 1.** Resistance wood *C. citriodora* (MPa) subjected to heat 200 °C under different time.

Para esta mesma temperatura de irradiação, Schaffer (1973) e Knudsen & Schniewind (1975), analisando a espécie *Pseudotsuga menziesii*, também obtiveram valores de resistência à compressão paralela às fibras inferiores aos valores obtidos neste trabalho. Pinto (2005), adotando a metodologia de Schaffer (1967), que sugere a temperatura de 288 °C como sendo a temperatura característica da base carbonizada, obteve valores de resistência de compressão paralela às fibras para as espécies de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus grandis* inferiores aos obtidos neste trabalho.

Os valores médios de resistência à compressão paralela às fibras da madeira de *C. citriodora* submetida à temperatura de 300 °C podem ser observados na Figura 2.

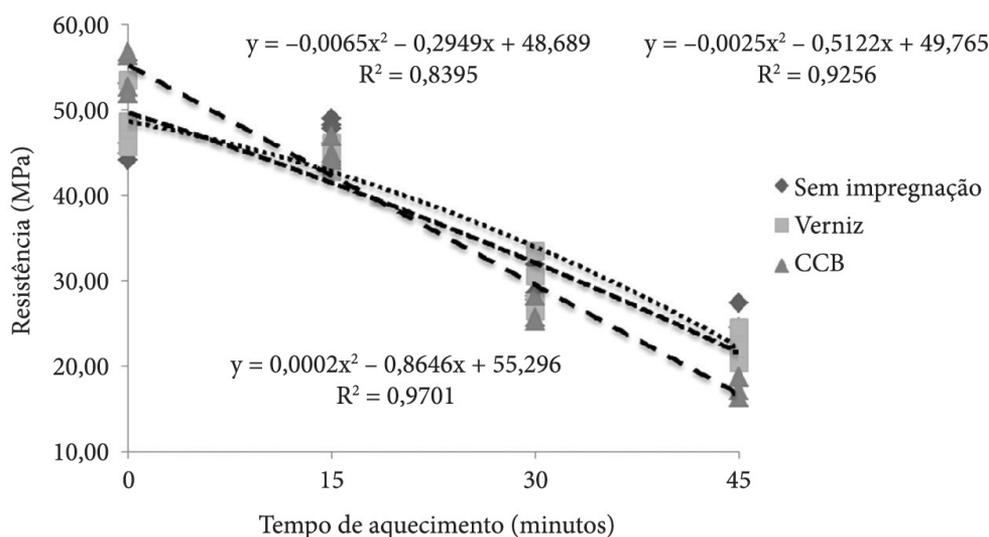
Para a temperatura de 400 °C, as madeiras que não foram impermeabilizadas com Verniz ou impregnadas com CCB não diferiram estatisticamente no nível de 5% de significância para os tempos de exposição de 15 e 30 minutos. Já com relação ao tempo de exposição de 45 minutos, pode-se observar diferença estatística no nível de 5% de significância com os demais tempos de exposição (Tabela 6).

Analisando-se o comportamento mecânico da madeira de *C. citriodora* impermeabilizada com

verniz, foi evidenciada diferença estatística em todos os tempos de exposição das amostras (15, 30 e 45 min) no nível de 5% de significância. As amostras impregnadas com CCB foram as que obtiveram os menores valores médios de resistência mecânica à compressão paralela às fibras e apenas os corpos de prova expostos por 45 minutos à fonte de calor incidente diferiram estatisticamente dos demais tempos no nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

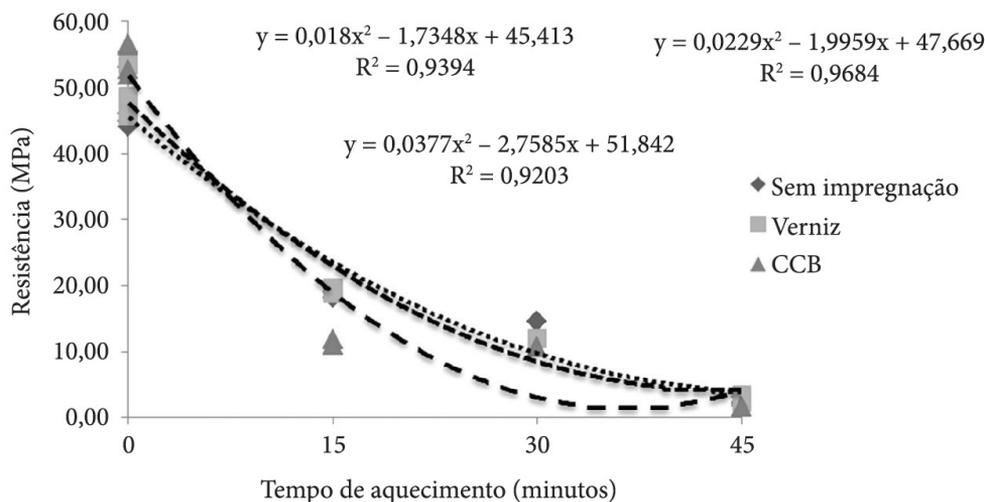
Analisando-se o tempo de aquecimento de 15 minutos, os tratamentos testemunha e com verniz não diferem estatisticamente entre si no nível de 5% de significância, tendo as médias de resistência à compressão paralela às fibras semelhantes entre estes tratamentos. Analisando-se os tempos de aquecimento de 30 e 45 minutos, os tratamentos não diferiram estatisticamente entre si pelo teste de Tukey no nível de 5% de significância. No entanto, o tratamento com CCB foi a situação em que se foram verificados os menores valores de resistência nas amostras (Figura 3).

Os diferentes tempos de aquecimento para as temperaturas de 300 e 400 °C exerceram influência significativa na perda de seção resistente da madeira sob os diferentes tratamentos, o que certamente contribui para que ocorra a ruptura da estrutura.



**Figura 2.** Resistência das amostras (MPa) submetidas ao aquecimento na temperatura de 300 °C, sob os diferentes tempos.

**Figure 2.** Resistance of the samples (MPa) subjected to heating temperature of 300 °C under the different times.



**Figura 3.** Resistência das amostras (MPa) submetidas ao aquecimento na temperatura de 400 °C, sob os diferentes tempos.

**Figure 3.** Resistance of the samples (MPa) subjected to heating temperature of 400 °C under the different times.

Com base nos resultados encontrados, podemos afirmar que os tratamentos testados (CCB e Verniz) não apresentaram resultados satisfatórios no que diz respeito ao retardo da combustão.

#### 4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados e discutidos com relação à madeira de *Corymbia*

*citriodora*, em relação à retratibilidade, conclui-se que:

- A espécie em estudo apresentou uma retratibilidade inferior aos valores encontrados na literatura; mesmo assim, mostrou-se dentro dos limites aceitáveis;
- Em relação aos resultados apresentados, relativos à densidade básica e à densidade aparente da madeira para a espécie de *Corymbia citriodora*, os

valores foram inferiores aos descritos em outros trabalhos. Tal fato é justificado pela idade da árvore e pela possível retirada das amostras, para este ensaio, ter sido próxima à medula;

- No que diz respeito aos ensaios mecânicos, pode-se afirmar que o aumento da temperatura de carbonização e do tempo de exposição das amostras ocasionou um decréscimo da resistência à compressão paralela às fibras do material, provocando fragilidade de carregamento;
- Os tratamentos testados (CCB e Verniz) não apresentaram resultados satisfatórios no que diz respeito ao retardo da combustão, não sendo, portanto, recomendáveis para esse fim.

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, pela Bolsa de Iniciação Científica concedida. Ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira/UFES, ao Departamento de Engenharia Civil/UFES e ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa – UFV.

## STATUS DA SUBMISSÃO

Recebido: 1 mar., 2013

Aceito: 29 mar., 2014

Publicado: 28 ago., 2014

## AUTOR(ES) PARA CORRESPONDÊNCIA

### Marcos Oliveira de Paula

Departamento de Engenharia Rural,  
Universidade Federal do Espírito Santo – UFES,  
CEP 29500-000, Alegre, ES, Brasil  
e-mail: modep@bol.com.br

## REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. *NBR 7190*: projeto de estruturas de madeira. Anexo B - Ensaio de caracterização. Rio de Janeiro; 1997. 107 p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. *NBR 9480*: peças roliças preservadas de eucalipto para construções rurais: requisitos. Rio de Janeiro; 2009. 12 p.

Back EL, Salmén NL. Glass transition of wood components hold implications for molding and pulping processes. *Tappi Journal* 1982; 65(7): 107-110.

Barreira LMS. *Estudo numérico do comportamento térmico e mecânico de estruturas em madeira* [dissertação]. Bragança: Escola Superior de Tecnologia e de Gestão, Instituto Politécnico de Bragança; 2008.

Brocco VF, Loiola PL, Paes JB, Oliveira JTS. Efeito do tempo e pressão de tratamento nas propriedades mecânicas das madeiras de eucalipto. *Enciclopédia Biosfera* 2012; 8(15): 779.

Carmo APT. *Avaliação de algumas propriedades da madeira de seis espécies de eucalipto* [dissertação]. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa; 1996.

Figuroa MJM, Moraes PD. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. *Ambiente Construído* 2009; 9(4): 157-174.

Goring DAI. Thermal softening of lignin, hemicelulose and cellulose. *Pulp and Paper Magazine of Canada* 1963; 64(12): 517-527.

Hosseini Hashemi SK, Latibari AJ, Khademi-Eslam H, Alamuti RF. Effect of boric acid treatment on decay resistance and mechanical properties of poplar wood. *BioResources* 2010; 5(2): 690-698.

Irvine G. The glass transitions of lignin and hemicellulose and their measurement by differential thermal analysis. *Journal Tappi* 1984; 67(5): 116-121.

Knudson RM, Schniewind AP. Performance of structural wood members exposed to fire. *Forest Products* 1975; 25(2): 23-32.

Leal SCS. *Avaliação do comportamento mecânico de madeira antiga de carvalho proveniente de incêndio* [dissertação]. Porto: Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto; 2010.

Lima TG. *Variações no sentido radial e longitudinal de algumas propriedades das madeiras de Eucalyptus microcorys F. Muell e Eucalyptus pilularis Sm.* [dissertação]. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa; 1996.

Oliveira JTS, Hellmeister JC, Tomazello Filho M. Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. *Revista Árvore* 2005; 29(1): 115-127. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622005000100013>

Paes JB. *Efeitos da purificação e do enriquecimento do creosoto vegetal em suas propriedades preservativas* [tese]. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa; 1997.

Pinto EM. *Determinação de um modelo pra taxa de carbonização transversal a grã para a madeira de E. citriodora e E. grandis* [tese]. São Paulo: Universidade de São Paulo; 2005.

Salmén L. Temperature and Water Induced Softening Behaviour of Wood Fiber Based Material [Dissertação]. Estocolmo: Royal Institute of Technology; 1982.

Schaffer EL. *Charring rate of selected woods-transverse to grain*. Madison: US. Department of Agriculture; 1967. 29 p. (Forest Products Laboratory, n. 69).

Schaffer EL. Effect of pyrolytic temperatures on the longitudinal strenght of dry douglas fir. *Journal of*

*Testing and Evaluation* 1973; 1(4): 319-329. <http://dx.doi.org/10.1520/JTE10025>

Vital BR. Métodos de determinação da densidade da madeira. Viçosa, SIF, 1984. 21 p. (Boletim Técnico, n. 1).

Zeronian SH, Menefee E. Thermally-induced changes in the mechanical properties of ramie and chemically-modified ramie. *Journal Applied Polymer Science* 1976; 28: 869.