



Alterações físico-mecânicas na madeira de cambará (*Qualea paraensis*) termorretificada

Physical-mechanical alterations in *Qualea paraensis* wood after heat treatment

Dayane Targino de Medeiros¹, Felipe Gomes Batista¹, Rafael Rodolfo de Melo^{2*},

Adriano Reis Prazeres Mascarenhas¹ e Talita Dantas Pedrosa³

¹ Universidade Federal de Lavras. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira. Lavras, Minas Gerais, Brasil.

dayanemedeiros@gmail.com
felipejp.gomes@gmail.com
adriano.mascarenhas@unir.br

² Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Departamento de Ciências Agrônômicas e Florestais. Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil

³ Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Departamento de Engenharia e Ciências Ambientais. Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil. talita.pedrosa@ufersa.edu.br

* Autor de correspondência.
rafael.melo@ufersa.edu.br

RESUMO

Objetivou-se analisar o efeito do tempo e da temperatura de tratamentos térmicos nas propriedades físico-mecânicas da madeira de cambará (*Qualea paraensis* Ducke). Foram confeccionados corpos de prova de 5 lotes da madeira de cambará submetidos ao tratamento térmico em estufa sob temperaturas de 180 °C e 200 °C e períodos de 2 h e 4 h. Determinou-se densidade aparente ($\rho_{12\%}$), perda de massa (PM), umidade de equilíbrio (UE), contrações nos eixos longitudinal (β_l), radial (β_r) e tangencial (β_t), contração volumétrica (β_v) e fator anisotrópico (f_a). Mecanicamente, a madeira foi avaliada quanto à resistência e rigidez nos ensaios de flexão estática (f_M e E_M) e compressão paralela às fibras (f_d e E_d). Após os tratamentos térmicos, os valores de $\rho_{12\%}$ aumentaram, em média, 7,72% e a UE foi reduzida em 24,3%. Os maiores valores de PM (3,67%) foram observados para o tempo de exposição de 2 h em temperatura de 200 °C. Com este tratamento, obteve-se também os menores valores de β_l (5,73%) e β_r (9,69%). Os tratamentos térmicos aumentaram a densidade aparente, reduziram a umidade de equilíbrio e aumentaram a estabilidade dimensional da madeira. Na maioria dos tratamentos térmicos, observou-se redução da resistência e aumento da rigidez à flexão estática. Ocorreu aumento da resistência e da rigidez à compressão paralela à grã em todas as combinações de tempo e temperatura. De modo geral, a maior estabilidade dimensional com menores perdas da resistência à flexão estática e compressão paralela foram obtidas com o tratamento de 200 °C e tempo de 2 h.

PALAVRAS CHAVE: densidade da madeira, madeira tropical, perda de massa, módulo de ruptura, tratamento térmico.

ABSTRACT

The objective was to analyze the effect of heat treatments on the physical and mechanical properties of *Qualea paraensis* wood. Test specimens from 5 lots of wood were submitted to heat treatments using temperatures of 180 °C and 200 °C with periods of 2 h and 4 h. Density (ρ), mass loss (PM), equilibrium moisture content (UE), longitudinal (β_l), radial (β_r) and tangential (β_t) shrinkage, volumetric shrinkage (β_v) and anisotropic factor (f_a) were determined. Mechanically, the wood was evaluated for strength and stiffness in the tests of static bending (f_M and E_M) and compression parallel to the fibers (f_d and E_d). After the heat treatments, the values of $\rho_{12\%}$ increased, on average, by 7.72% and the UE was reduced by 24.3%. The highest values of PM (3.67%) were observed for the exposure time of 2 hours at a temperature of 200 °C. With this treatment, the lowest values of β_l (5.73%) and β_r (9.69%) were obtained. The thermal treatments increased the bulk density, reduced the equilibrium moisture content, and increased the dimensional stability of the wood. In most heat treatments, a reduction in strength and an increase in stiffness to static bending was observed. There was an increase in strength and stiffness to compression parallel to the grain in all combinations of time and temperature. The greatest dimensional stability with less loss of strength to static bending and parallel compression were obtained with the treatment at 200 °C and time of 2 h.

KEYWORDS: wood density, tropical wood, mass loss, modulus of rupture, heat treatment.

INTRODUÇÃO

A Amazônia é um dos principais complexos ecossistêmicos do planeta, dada a extensão territorial e diversidade de espécies vegetais e animais. Isso representa grande importância socioeconômica, pois diversas cadeias produtivas na Amazônia são baseadas no setor madeireiro e extrativismo vegetal (Silva, Gomide, Figueiredo, Carvalho e Ferraz-Filho, 2018; Gaui *et al.*, 2019).

É importante que essas atividades econômicas sejam realizadas a partir de planos de manejo florestal sustentável (PMFS). Assim, é possível conservar os mecanismos ecossistêmicos, obter produtos não-madeireiros e utilizar múltiplas espécies madeireiras. Também se garante que a madeira foi explorada com menor impacto à floresta, tem-se rastreabilidade da madeira e o atendimento aos requisitos legais de comercialização (Faggin e Behagel, 2017; Silva *et al.*, 2020).

As madeiras amazônicas são comercializadas ao redor do mundo com finalidades direcionadas à construção civil, indústria moveleira e painéis de madeira (Reis *et al.*, 2019, Araujo *et al.*, 2020). O cambará (*Qualea paraensis* Ducke) destaca-se entre as principais espécies tropicais madeireiras exploradas da Amazônia. No mercado florestal de Mato Grosso, Brasil, registrou-se entre 2004 e 2010 o consumo de 1 milhão de metros cúbicos, comercializados ao valor médio de USD 68,00 por metro cúbico (Ribeiro *et al.*, 2016; Soares-Filho *et al.*, 2017).

A madeira de cambará tem sido estudada quanto ao seu processamento (Melo, Dacroce, Rodolfo Jr, Lisboa e França, 2019a), sobre suas propriedades físicas (Christoforo, Almeida, Varanda, Panzera e Lahr, 2020) e propriedades mecânicas (Wolenski, Peixoto, Fedotova, Christoforo e Lahr, 2020; Wolenski, Almeida, Christoforo, Lahr e Peixoto, 2020). De modo geral, a madeira de cambará possui média densidade, boa resistência mecânica e durabilidade moderada (Cerre, Gérard, Guibal e Paradis, 2017).

Seguindo a classificação apresentada por Pereira (2013), a madeira de cambará possui baixa estabilidade dimensional. Isso pode inviabilizar sua aplicação em

produtos que demandem alto padrão de qualidade, já que a madeira é higroscópica, anisotrópica e heterogênea (Patera, Bulcke, Boone, Derome e Carmeliet, 2018; Stragliotto, Freitas, Oliveira e Pereira, 2019).

Essas características estão relacionadas ao arranjo anatômico e constituintes químicos da madeira (celulose, hemiceluloses e lignina) (Menezes, Santini, Souza, Gatto e Haselein, 2014; Zanuncio *et al.*, 2018). As hemiceluloses favorecem trocas de vapor de água com o ar constantemente. Isso, por sua vez, ocasiona o fenômeno de retração e inchamento da madeira, afetando sua estabilidade dimensional (Sargent, 2019).

Agregar estabilidade dimensional em madeiras tropicais nativas é um grande desafio para os pesquisadores de tecnologia da madeira, devido à grande diversidade e distribuição geográfica das espécies. Por isso, vários estudos têm sido realizados em busca da melhoria das propriedades tecnológicas dessas madeiras.

O tratamento térmico, também conhecido como termorretificação, por ser uma técnica simples e viável, tem apresentado resultados promissores. O método consiste na aplicação de calor expondo a madeira a temperaturas acima daquelas usadas na secagem convencional, visando alterações em sua composição química, principalmente nas hemiceluloses (Hamada *et al.*, 2015; Batista, 2019; Kubovsky, Kaciková e Kacik, 2020).

Em estudos focados no tema, observou-se que o tratamento térmico resultou em melhoria das propriedades acústicas, estabilidade dimensional e durabilidade natural da madeira (Palermo *et al.*, 2014; Gérardin, 2016; Shukla, 2019; Mania, Molinski, Roszyk e Górka, 2020). Verificou-se também, que há favorecimento dos acabamentos superficiais dos produtos confeccionados com madeira, como: móveis, *decks*, esquadrias, pisos e painéis (Dias Júnior, 2015). Uma desvantagem deste método é a diminuição da resistência mecânica da madeira (Candelier *et al.*, 2016; Amirou, Pizzi e Delmotte, 2020).

Com os aspectos apresentados, verifica-se a necessidade da realização de pesquisas direcionadas ao estudo do desempenho de madeiras tropicais termorretificadas. De posse dessas informações, é possível



reposicionar espécies madeireiras no mercado para mais aplicações, agregando valor aos produtos e evitando a superexploração das espécies tradicionalmente comercializadas (Reis *et al.*, 2019).

OBJETIVOS

Objetivou-se analisar o efeito do tempo e da temperatura de tratamentos térmicos nas propriedades físico-mecânicas da madeira de cambará (*Qualea paraensis* Ducke).

MATERIAIS E MÉTODOS

Amostragem da madeira

A madeira de cambará (*Qualea paraensis* Ducke) utilizada nesse estudo, foi fornecida por uma fonte comercial do Centro-Oeste do Brasil que atua em conformidade aos termos de gestão sustentável da Amazônia estabelecidos pela legislação.

Após o desdobro, o material foi organizado em cinco lotes. Para cada lote, selecionou-se aleatoriamente 10 peças com dimensões de 250 mm × 90 mm × 17 mm (comprimento × largura × espessura) livres de defeitos como: presença de nós, medula, rachaduras e grã irregular.

Propriedades Físicas

A madeira de cada lote, foi transformada em corpos de prova dimensionados e avaliados de acordo com as normas da Comisión Panamericana de Normas Técnicas [COPANT] 460, 461 e 462 (COPANT, 1972 a; 1972b;

1972c). Os ensaios físicos foram realizados após a execução de cada tratamento térmico em estufa de circulação forçada de ar, conforme os parâmetros apresentados na tabela 1. Em cada tratamento utilizou-se 20 corpos de prova para realização de cada ensaio físico.

Após o tratamento térmico da madeira, obteve-se a densidade aparente ($\rho_{12\%}$) em umidade de 12%, umidade de equilíbrio (UE), contrações nos eixos longitudinal (β_l), radial (β_r) e tangencial (β_t), contração volumétrica (β_v) e o fator anisotrópico (f_a), obtido pela razão entre a contração tangencial e radial. A perda de massa da madeira (PM) foi determinada por meio da razão entre a diferença de massas antes e após o tratamento térmico em relação a massa inicial dos corpos de prova. Esses parâmetros também foram obtidos para a madeira não tratada (controle).

Propriedades Mecânicas

A caracterização mecânica da madeira de cambará foi conduzida conforme as normas COPANT 464 e 555 (COPANT, 1972 d, e), utilizando-se a mesma quantidade de corpos de prova nos ensaios físicos. Essas amostras foram mantidas em câmara climatizada sob temperatura de 20 °C e umidade relativa de 65% até atingirem massa constante e umidade em torno de 12%. Na sequência, obteve-se a resistência (f_{d0}) e rigidez (E_{d0}) à compressão paralela à grã e resistência (f_M) e rigidez (E_M) à flexão estática. Para isso, empregou-se máquina universal de ensaios com célula de carga de 300 kN.

Tabela 1. Período de exposição (h) e temperaturas (°C) dos tratamentos térmicos aplicados à madeira de cambará (*Qualea paraensis* Ducke).

Tratamentos	Tempo (h)	Temperatura (°C)
Controle	-	-
2/180	2	180
2/200	2	200
4/180	4	180
4/200	4	200

Análises estatísticas

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado em arranjo fatorial 2×2 (tempo $\times$ temperatura). Os dados foram submetidos ao teste de Fisher ($p < 0,01$), e quando significativo, aplicou-se o teste de Scott-Knott ($p < 0,01$).

RESULTADOS

Na análise de variância, não se verificou interação entre os fatores tempo e temperatura. Ao analisar o desvio padrão, verificou-se que aplicação dos tratamentos térmicos resultou em maior homogeneidade da $\rho_{12\%}$ entre as amostras. Os tratamentos térmicos ocasionaram ligeiro aumento (7,72%) na densidade aparente da madeira de cambará em relação ao material não tratado termicamente (controle), independentemente da combinação de tempo e temperatura (Tabela 2).

As maiores perdas de massa foram registradas para o tempo de exposição de 2 h sob temperatura de 200 °C, os demais tratamentos não diferiram entre si. Para os valores de UE, não se observaram diferenças entre os tratamentos térmicos, porém todos promoveram decréscimo na umidade em torno de 24,3% quando comparado ao controle. Isoladamente, a duração do processo não promoveu influência nos parâmetros.

Quanto aos parâmetros de estabilidade dimensional, não foi observado efeito dos tratamentos térmicos para β_t e f_a (Tabela 3). Para β_r , apenas o tratamento 4/200 resultou em redução dos valores. No sentido tangencial (β_t), o tratamento 2/180 não diferiu do controle e o tratamento 4/180 aumentou a instabilidade dimensional da madeira nesse sentido anatômico.

Tanto para β_t quanto para β_r , os tratamentos 2/200 e 4/200 promoveram um aumento da estabilidade da madeira. Assim como observado para densidade, perda de massa e umidade de equilíbrio, o tempo de exposição não exerceu influência nos parâmetros de estabilidade dimensional.

Os tratamentos térmicos promoveram efeitos nas propriedades mecânicas da madeira de cambará (Tabela 4). Quanto a f_M , os menores valores foram obtidos para o tratamento em que a madeira ficou exposta durante 4 h em temperatura de 200 °C, nessa condição a redução na resistência foi na ordem de 26,43%, em média.

O tratamento 2/200 não promoveu efeitos de redução na f_M , enquanto que os tratamentos 2/180 e 4/180 resultaram em decréscimo deste parâmetro com a mesma magnitude. Para os resultados de E_M , o tratamento 4/200 teve o mesmo comportamento do controle e os demais tratamentos acarretaram aumento de, aproximadamente, 15,60% neste parâmetro.

Tabela 2. Valores de densidade aparente a 12% de umidade ($\rho_{12\%}$), perda de massa (PM) e umidade de equilíbrio (UE) da madeira de cambará (*Qualea paraensis* Ducke) submetida à termorretrificação.

Tratamentos (h/°C)	$\rho_{12\%}$ (g/cm ³)	PM (%)	UE (%)
Controle	0,708 $\pm$ 0,074 a	-	11,17 $\pm$ 0,79 a
2/180	0,780 $\pm$ 0,048 b	2,75 $\pm$ 0,82 b	8,90 $\pm$ 0,92 b
2/200	0,779 $\pm$ 0,034 b	3,67 $\pm$ 0,48 a	8,12 $\pm$ 0,65 b
4/180	0,785 $\pm$ 0,027 b	3,03 $\pm$ 0,17 b	8,23 $\pm$ 1,02 b
4/200	0,725 $\pm$ 0,060 b	2,98 $\pm$ 0,55 b	8,46 $\pm$ 0,63 b

Médias seguidas por mesma letra minúscula na vertical não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,01$).



Tabela 3. Resultados experimentais das contrações longitudinal (β_l), radial (β_r), tangencial (β_t) e volumétrica (β_v) e fator anisotrópico (f_a) da madeira de cambará (*Qualea paraensis* Ducke) submetida à termorreificação.

Tratamentos (h/°C)	β_l (%)	β_r (%)	β_t (%)	β_v (%)	f_a
Controle	0,57 ± 0,33 a	4,62 ± 0,78 a	6,83 ± 1,08 b	11,13 ± 1,62 a	1,53 ± 0,35 a
2/180	0,56 ± 0,43 a	4,40 ± 0,52 a	6,88 ± 1,19 b	11,20 ± 1,35 a	1,73 ± 0,61 a
2/200	0,59 ± 0,59 a	4,19 ± 0,45 a	5,73 ± 1,02 c	9,69 ± 1,27 b	1,43 ± 0,28 a
4/180	0,54 ± 0,52 a	4,79 ± 0,97 a	7,81 ± 1,25 a	12,41 ± 1,75 a	1,67 ± 0,39 a
4/200	0,58 ± 0,59 a	3,73 ± 0,54 b	6,04 ± 1,17 c	10,05 ± 1,40 b	1,71 ± 0,37 a

Médias seguidas por mesma letra minúscula na vertical não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,01$).

Tabela 4. Resultados experimentais da resistência (f_M) e rigidez (E_M) à flexão estática e resistência (f_{co}) e rigidez (E_{co}) à compressão paralela à grã da madeira de cambará (*Qualea paraensis* Ducke) submetida à termorreificação.

Tratamentos (h/°C)	f_M (MPa)	E_M (GPa)	f_{co} (MPa)	E_{co} (GPa)
Controle	87,67 ± 20,08 a	12,60 ± 2,64 b	52,22 ± 10,49 c	13,07 ± 3,06 c
2/180	73,22 ± 19,53 b	14,09 ± 2,65 a	60,50 ± 11,91 b	14,14 ± 3,36 b
2/200	83,30 ± 20,19 a	15,72 ± 1,34 a	65,01 ± 10,41 a	15,37 ± 3,77 a
4/180	79,94 ± 19,90 b	15,07 ± 1,50 a	65,31 ± 11,55 a	15,63 ± 3,44 a
4/200	64,50 ± 17,11 c	11,76 ± 3,20 b	58,16 ± 11,21 b	14,11 ± 3,32 b

Médias seguidas por mesma letra minúscula na vertical não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,01$).

No ensaio de compressão paralela à grã, todos os tratamentos térmicos ocasionaram aumento na resistência e na rigidez da madeira de cambará. As combinações 2/180 e 4/200, foram, em média, 8,95% superiores às combinações de tempo e temperatura de 2/200 e 4/180. Em comparação com o controle, as combinações 2/180 e 4/200 apresentaram médias de f_{co} 11,98% maiores. Já para as combinações 2/200 e 4/180, os valores foram 19,85% superiores à madeira não tratada termicamente.

Para E_{co} , as tendências foram as mesmas observadas para resistência e a diferença entre o agrupamento dos tratamentos 2/180 e 4/200 em relação ao agrupamento 2/200 e 4/180 foi na ordem de 8,90%, aproximadamente. As combinações 2/180 e 4/200 apresentaram valores de E_{co} 8,07% superiores em relação ao controle, enquanto que

as médias observadas para as combinações 2/200 e 4/180 foram 13,07% maiores.

DISCUSSÃO

Propriedades Físicas

O aumento da densidade aparente da madeira de cambará após o tratamento térmico pode estar vinculado a redução do volume das amostras e ligeira perda de massa (< 4,00%). Melo *et al.* (2019b) mencionam que a perda de massa pode ser de até 20% dependendo da forma de execução do processo. Geralmente, a medida em que se eleva a temperatura ocorre redução da superfície transversal da madeira, devido a diminuição do diâmetro tangencial dos

elementos de vaso (Nisgoski, Muñiz, Batista e Mölleken, 2014; Gasson, Cartwright e Leme, 2017).

Em acréscimo, Gonçalves, Marcati e Scheel-Ybert (2012), ao estudaram o efeito da temperatura nas características anatômicas de espécies madeireiras do Cerrado brasileiro, verificaram redução proeminente de volume em madeiras que continham parênquima axial paratraqueal abundante, pois as células parenquimáticas possuem paredes delgadas e são mais suscetíveis à degradação térmica.

Os resultados obtidos e os aspectos mencionados corroboram com as pesquisas de Reis, Abreu, Pinho, Lisboa e Urbinati (2014). Estes autores relataram que as espécies do gênero *Qualea* apresentam o tipo de parênquima axial mencionado anteriormente. Assim, pode-se dizer que o efeito sobre o volume pode ter sido mais pronunciado uma vez que todos os tratamentos térmicos promoveram redução na massa dos corpos de prova.

Nas pesquisas de Ferreira, Melo, Zaque e Stangerlin (2019), também se observou aumento da densidade após o tratamento térmico da madeira de *Hymenolobium petraeum* Ducke aplicando-se os mesmos parâmetros de tempo e temperatura utilizados neste trabalho. Melo *et al.* (2019b), também verificaram incremento de 5,35% na densidade aparente utilizando temperaturas entre 180 °C e 200 °C por períodos de 2 h e 4 h de exposição. Esse efeito não é recorrente, pois após o tratamento térmico a redução da densidade da madeira é um fenômeno mais comum.

Geralmente, quando a madeira é exposta a temperaturas entre 100 °C e 250 °C ocorrem perdas de massa decorrentes da degradação de seus constituintes químicos, resultando em perda de massa. Isso está associado a baixa estabilidade térmica das hemiceluloses e de alguns extrativos, que se degradam facilmente em relação aos demais constituintes estruturais da madeira (celulose e lignina) (Candelier *et al.*, 2016, Lengowski, Muñiz, Klock e Nisgoski, 2018, Pratiwi *et al.*, 2019).

Esses aspectos juntamente com os resultados obtidos estão em harmonia com o trabalho de Dittommaso *et al.* (2020), que também verificaram perda de massa na madeira de *Intsia* spp. em decorrência da redução do teor de

hemiceluloses em 10% sob temperaturas próximas a 200 °C. Os autores explicaram que em função dos diferentes tipos de hemiceluloses essa degradação pode ser mais acentuada, principalmente em moléculas formadas por cadeias menores.

Com isso, as variações de massa observadas neste trabalho são aceitáveis, já que a alteração das propriedades da madeira está intimamente relacionada aos parâmetros envolvidos no tratamento térmico, tais como: duração, temperatura, taxa de oxigênio, tipo de madeira e dimensões do material. A combinação desses parâmetros pode melhorar ou piorar as propriedades físico-mecânicas da madeira, isso destaca a necessidade do dimensionamento dos procedimentos de termorretrificação para cada espécie.

Esses aspectos também estão associados à redução da umidade de equilíbrio (UE) e consequentemente ao aumento da estabilidade dimensional da madeira de cambará. Em temperaturas superiores a 180 °C, ocorrem reações químicas na madeira e formação de compostos, como o hidroximetilfurfural, que auxiliam na redução da higroscopicidade da madeira. Esses compostos ocasionam desidratação de componentes químicos hidrofílicos, tais como: hexoses e pentoses (Rowell, Ibach, McSweeney e Nilsson, 2009; Carvalho, Zanuncio, Silva, Carneiro e Paula, 2017; Cabalová *et al.*, 2018).

Essas modificações químicas reduzem a higroscopicidade da madeira (Conte, Missio, Pertuzzatti, Cademartori e Gatto, 2014; Gérardin *et al.*, 2016). Os parâmetros de estabilidade dimensional também são influenciados, pois as dinâmicas de contração e inchamento da madeira são ocasionadas pela variação do teor de água em seus sítios hidrofílicos (Sargent, 2019).

Os efeitos do tratamento térmico na adsorção de água da madeira também foram observados por Anjos e Souza (2015). Os autores verificaram redução dos percentuais de umidade devido à perda de componentes hidrófilos na madeira de *Goupia glabra* Aubl. submetida a temperaturas acima de 180 °C.

Conforme observado, as combinações de tempo e temperatura que resultaram nos menores valores de β_r , β_t e β_v foram 2/200 e 4/200. Takeshita e Jankowsky (2015)



explicaram que os efeitos do tratamento térmico variam para cada tipo de madeira, em função do tempo e temperatura. Os autores registraram redução da adsorção de água e aumento da estabilidade dimensional das madeiras de *Hymenaea* sp. e *Astronium* sp. utilizando temperaturas acima de 90 °C, independentemente, do tempo de exposição.

De forma semelhante, Carvalho *et al.* (2017) obtiveram redução de 20,7% no inchamento (linear e volumétrico) e redução fator anisotrópico na madeira de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake para qualquer tempo de exposição com temperaturas acima de 225 °C.

No presente trabalho não ocorreram alterações nos valores de β_r e f_a , mas na literatura existem relatos do efeito do tratamento térmico nessas propriedades. Por exemplo, Dias Júnior *et al.* (2015) observaram redução no fator anisotrópico e estabilização das contrações (lineares e volumétricas) na madeira de eucalipto, utilizando temperaturas entre 160 °C e 215 °C e tempo variando de 2 h a 6 h.

Dentre esses parâmetros, a contração tangencial é a mais importante para fins práticos de utilização da madeira, haja vista que em grande intensidade promovem rachaduras e empenamentos no material, dificultando sua aplicação em produtos que demandam alta estabilidade dimensional, como móveis e esquadrias (Sargent, 2019).

Com base nos aspectos apresentados, pode-se considerar que o tratamento 2/200 foi o mais eficiente para melhoria da estabilidade dimensional da madeira de cambará. Além disso, a menor duração do processo acarretou em redução do consumo energético em relação ao segundo melhor tratamento (4/200).

Propriedades mecânicas

A redução na resistência à flexão estática pode ser atribuída à degradação dos componentes semiestruturais da parede celular, pois em todos os tratamentos registrou-se perdas de massa, característica também observada por Carvalho *et al.* (2017).

O aumento da densidade não resultou em acréscimo na resistência, como a madeira foi amostrada de forma aleatória e a distribuição dos tecidos no sentido medula-casca é heterogênea, é possível que em algumas regiões das peças tenham sido afetadas de forma mais severa pelo tratamento térmico, principalmente onde existe maior proporção de lenho inicial reduzindo a densidade dessa região, mesmo havendo aumento da densidade global das peças (Patera, *et al.* 2018).

Hein e Brancheriau (2018) relataram que durante o ensaio de flexão estática ocorrem esforços de cisalhamento paralelos ao eixo longitudinal da peça. Os autores explicaram que a heterogeneidade radial da densidade promove fadigas devido a variabilidade das tensões na peça durante o ensaio. Johansson e Morén (2006) submeteram a madeira de *Batula* sp. ao tratamento térmico com temperaturas variando entre 175 °C e 200 °C e verificaram redução da resistência ao cisalhamento, a partir da análise das fraturas durante o ensaio de flexão estática.

Quanto ao aumento da rigidez na flexão estática (E_M), Dittommaso *et al.* (2020) atribuem esse efeito ao aumento de ligações cruzadas entre as moléculas de lignina em temperaturas acima de 160 °C. Isso aumenta a rigidez perimetral nas microfibrilas celulósicas e a resistência característica da lamela média.

A celulose, hemiceluloses e lignina quando são expostas às suas respectivas temperaturas de transição vítrea (T_g) mudam para um estado semelhante à borracha ou plástico. Após o resfriamento, as fases desses componentes tornam-se mais rígidos e a estrutura polimérica das moléculas pode ser alterada, afetando a interação original dos constituintes e o módulo de elasticidade da madeira (Modes, Santini, Vivian e Haselein, 2017).

Isso explica a redução acentuada nos valores de f_M e E_M observada na combinação de tempo e temperatura 4/200. Quanto maior o período de permanência da madeira sob altas temperaturas, maior será a degradação de seus componentes químicos. Cademartori, Schneid, Gatto, Beltrame e Stagerlin (2012) e Carvalho *et al.* (2017), verificaram redução da resistência mecânica nas madeiras

de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* termorretrificadas sob longos períodos de exposição às temperaturas acima de 160 °C e 150 °C, respectivamente,

Quanto à rigidez à flexão, Boonstra, Acker, Tjeerdsma e Kegel (2007) verificaram aumento deste parâmetro para as espécies *Pinus radiata* e *Pinus sylvestris* em temperaturas entre 150 °C e 260 °C. Modes *et al.* (2017) verificaram o mesmo comportamento para madeira de *Eucalyptus grandis* tratadas em temperaturas de 130 °C e 160 °C durante 3 h.

Para o ensaio de compressão paralela à grã, o aumento dos valores de f_{t0} e E_{t0} pode ser explicado pelo incremento na proporção de celulose cristalina altamente ordenada, devido à quebra das regiões amorfas da cadeia celulósica. Nessa condição, eleva-se a anisotropia do material e a rigidez no sentido longitudinal às microfibrilas (Boonstra *et al.*, 2007, Kubovsky *et al.*, 2020).

O aumento da resistência mecânica também ocorre devido ao incremento de ligações cruzadas entre macromoléculas de lignina. Por ser altamente resistente à compressão, a lignina restringe o movimento perpendicular às fibras, que é comum no ensaio de compressão paralela à grã (Kacik, Luptáková, Nasswettrová, Kaciková e Vacek, 2016). A lignina é o principal componente da lamela média e está em grande quantidade na parede primária, quanto mais ligações entre suas macromoléculas maior será a resistência perimetral da parede celular.

Após o tratamento térmico, a madeira de cambará manteve-se na classe de resistência característica C60 ($f_{t0} > 60$ MPa), considerando a norma NBR 7190 da Associação Brasileira de Normas Técnicas [ABNT] (ABNT, 1997). Wolenski, Peixoto, Christoforo, Lahr e Dias (2019) ao estudarem a espécie *Qualea paraensis*, relataram que essa classe de resistência permite a aplicação da madeira de cambará em usos diversos com segurança estrutural.

As madeiras do gênero *Qualea* são amplamente utilizadas na construção civil (ripas, rodapés e andaimes), movelaria, decoração, na produção de chapas compensadas e embalagens. Cardoso, Moutinho, Melo, Sousa e Souza (2012), analisaram as propriedades mecânicas da madeira de *Qualea dinizii* Ducke e classificaram sua resistência como

média, além de indicarem para a confecção de móveis, revestimentos internos de residências e esquadrias.

Nos estudos de Lazarotto *et al.* (2016), Dittommaso *et al.* (2020) e Mania *et al.* (2020) estão apresentados outros benefícios nas propriedades da madeira com a aplicação de tratamento térmico na madeira, como: melhoria das propriedades acústicas, ganhos na qualidade da superfície em acabamentos, redução do consumo energético durante o desdobro, aumento na velocidade de corte e aumento da durabilidade natural.

No presente trabalho, foi possível verificar essas características na madeira de cambará, o tratamento térmico 2/200 permitiu melhorar a estabilidade dimensional da madeira sem redução drástica na resistência mecânica. O tratamento 4/200 também proporcionou aumento da estabilidade dimensional, mas a resistência mecânica foi prejudicada. Os demais tratamentos não diferiram do controle quanto a estabilidade dimensional, mas acarretaram redução da resistência mecânica da madeira em comparação ao controle.

É desejável observar-se na madeira alta estabilidade dimensional e resistência mecânica. No processo de termorretrificação, encontrar um equilíbrio entre a melhoria das propriedades físicas e redução da resistência mecânica é um grande desafio. Assim, com base nos resultados dos melhores tratamentos térmicos, pode-se dizer que a madeira de cambará é adequada para construção civil leve, usinagem, confecção de esquadrias, portas, móveis e acabamentos internos.

CONCLUSÕES

Os tratamentos térmicos ocasionaram incremento na densidade aparente, promoveram pequenas perdas de massa, redução da umidade de equilíbrio e propiciaram melhorias na estabilidade dimensional da madeira de cambará (*Qualea paraensis* Ducke).

Na maioria dos tratamentos térmicos observou-se redução da resistência e aumento da rigidez à flexão estática. Ocorreu aumento da resistência e da rigidez à compressão paralela à grã em todas as combinações de tempo e temperatura.



Em aplicações que demandem maior estabilidade dimensional com pequena redução da resistência à flexão estática, os melhores resultados podem ser obtidos com o tratamento 2/200. Para aplicações estruturais sob solicitação de esforços de compressão paralela à grã, os maiores valores de resistência e rigidez podem ser obtidos nos tratamentos 2/200 e 4/200.

REFERÊNCIAS

- Amirou, S., Pizzi, A., & Delmotte, L. (2020). Investigations of mechanical properties and chemical changes occurring during welding of thermally modified ash wood. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 34(1), 13-24. doi: 10.1080/01694243.2019.1659569
- Anjos, F. P., & Sousa, A. M. L. (2015). Equilibrium moisture in thermal rectification wood of cupiúba in the amazon region. *Biota Amazônia*, 5(1), 99-104. doi: 10.18561/2179-5746/biotaamazonia.v5n1p99-104
- Araujo, V., Vasconcelos, J., Cortez-Barbosa, J., Morales, E., Christoforo, A., Gava, M., Lahr, F., & Garcia, J. (2020). Wood consumption and fixations of carbon dioxide and carbon from timber housing techniques: A Brazilian panorama. *Energy and Buildings*, 216(1), 109960. doi: 10.1016/j.enbuild.2020.109960
- Associação Brasileira de Normas Técnicas [ABNT] (1997). NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira. São Paulo.
- Batista, D.C. (2019). Thermal treatment, heat treatment or thermal modification? *Ciência Florestal*, 29(1), 463-480. doi: 10.5902/1980509822577
- Boonstra, M. J., Acker, J. V., Tjeerdsma B. F., & Kegel E. V. (2007). Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents. *Annals of Forest Science*, 64(1), 679-690. doi: 10.1051/forest:2007048
- Cabalová, I., Kacik, F., Lagana, R., Vybohová, E., Bubeníková, T., Canová, I., & Durkovic, J. (2018). Effect of thermal treatment on the chemical, physical and mechanical properties of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) wood. *BioResources*, 13(1), 157-170. doi: 10.15376/biores.13.1.157-170
- Cademartori, P. H. G., Schneid, E., Gatto, D.A., Beltrame, R., & Stagerlin, D.M. (2012). Modification of static bending strength properties of *Eucalyptus grandis* heattreated wood. *Materials Research*, 15(6), 922-927. doi: 10.1590/S1516-14392012005000136
- Candelier, K., Thevenon, M. F., Petrissans, A., Dumarcay, S., Gerardin, P., & Petrissans, M. (2016). Control of wood thermal treatment and its effects on decay resistance: a review. *Annals of Forest Science*, 73(1), 571-583. doi: 10.1007/s13595-016-0541-x
- Cardoso, C.C., Moutinho, V. H. P., Melo, L. O., Sousa, L. K. V. S., & Souza, M.R. (2012). Physical and mechanical characterization of Amazon wood with technological potential for marketing. *Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, 55(3), 176-183. doi: 10x4322:ocax2012x053
- Carvalho, A. G., Zanuncio, A. J. V., Silva, C. M. S., Carneiro, A. C. O., & Paula, M. O. (2017). Resonance method for predicting the mechanical properties of heat-treated *Eucalyptus urophylla* and *Pinus oocarpa* wood. *Revista Matéria*, 22(1), e11772. doi: 10.1590/s1517-707620170001.0104.
- Cerre, J. C., Gérard, J., Guibal, D., Paradis, S. (2017). *Tropical timber atlas: technological characteristics and uses*. Versailles, França: Quae.
- Christoforo, A. L., Almeida, D.H., Varanda, L. D., Panzera, T. H., & Lahr, F. A. R. (2020) Estimation of wood toughness in brazilian tropical tree species. *Engenharia Agrícola*, 40(2), 232-237. 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v40n2p232-237/2020
- Comisión Panamericana de Normas Técnicas [COPANT] (1972a). COPANT 460: Método de determinación de la humedad. La Paz.
- Comisión Panamericana de Normas Técnicas [COPANT] (1972b). COPANT 461: Método de determinación del peso específico aparente. La Paz.
- Comisión Panamericana de Normas Técnicas [COPANT] (1972c). COPANT 462: Método de determinación de la contracción. La Paz.
- Comisión Panamericana de Normas Técnicas [COPANT] (1972d). COPANT 464: Método de determinación de la compresión axil o paralela al grano. La Paz.
- Comisión Panamericana de Normas Técnicas [COPANT] (1972e). COPANT 555: Método de ensayo de flexión estática. La Paz.
- Conte, B., Missio, A. L., Pertuzzatti, A., Cademartori, P.H.G., & Gatto, D. A. (2014). Physical and colorimetric properties of *Pinus elliottii* var. *elliottii* thermally treated wood. *Scientia Forestalis*, 42(104), 555-563.
- Dittomaso, G., Gaff, M., Kacik, F., Sikora, A., Sethy, A., Corleto, R., Razaei, F., Kaplan, L., Kubs, J., Das, S., Kamboj, G., Gasparik, M., Sedivka, P., Hysek, S., Macku, J., & Sedlecky, M. (2020). Interaction of technical and technological factors on qualitative and energy/ecological/economic indicators in the production and processing of thermally modified merbau wood. *Journal of Cleaner Production*, 252(1), 119793. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119793
- Faggin, J.M., & Behagel, J.H. (2017). Translating sustainable forest management from the global to the domestic sphere: The case of Brazil. *Forest Policy and Economics*, 85(1), 22-31. 10.1016/j.forpol.2017.08.012

- Ferreira, M. D., Melo, R. R., Zaque, L. A. M., & Stangerlin, D.M. (2019). Effect of heat treatment on physical and mechanical properties of *Hymenolobium petraeum* wood. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, 16(1), 3-7. doi: 10.4322/2176-1523.20191297
- Gasson, P., Cartwright, C., & Leme, C. L. D. (2017). Anatomical changes to the wood of *Croton sonderianus* (Euphorbiaceae) when charred at different temperatures. *LAWA Journal*, 38(1), 117-123. doi: 10.1163/22941932-20170161
- Gauí, T. D., Costa, F. R. C., Souza, F. C., Amaral, M. R. M., Carvalho, D. C., Reis, F. Q., & Higuchi, N. (2019). Long-term effect of selective logging on floristic composition: A 25 year experimente in the Brazilian Amazon. *Forest Ecology and Management*, 440(15), 258-266. doi: 10.1016/j.foreco.2019.02.033
- Gérardin, P. (2016). New alternatives for wood preservation based on thermal and chemical modification of wood - a review. *Annals of Forest Science*, 73(1), 559-570. doi: 10.1007/s13595-015-0531-4
- Gonçalves, T.A.P., Marcati, C. R., & Scheel-Ybert, R. (2012). The effect of carbonization on wood structure of *Dalbergia violacea*, *Stryphnodendron polyphyllum*, *Tapiria guianensis*, *Vochysia tucanorum* and *Pouteria torta* from the Brazilian Cerrado. *LAWA Journal*, 33(1), 73-90. doi: 10.1163/22941932-90000081
- Hamada, J., Pétrissans, A., Mothe, F., Ruelle, J., Pétrissans, M., & Gérardin, P. (2015). Variations in the natural density of European oak wood affect thermal degradation during thermal modification. *Annals of Forest Science*, 73(1), 277-286. doi: 10.1007/s13595-015-0499-0
- Hein, P. R. G., & Brancheriau, L. (2018). Comparision between three-point and four-point flexural tests to determine wood strength of *Eucalyptus* specimens. *Maderas. Ciencia y Tecnologia*, 20(3), 333-342. doi: 10.4067/S0718-221X2018005003401
- Johansson, D., & Morén, T. (2006). The potential of colour measurement for strength prediction of thermally treated wood. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 64(1): 104-110. doi: 10.1007/s00107-005-0082-8
- Dias Júnior, A. F., Lana, A. Q., Santos, P. V., Carvalho, A. M., Souza, N. D., & Brito, J. O. (2015). Physical properties and surface finish of heat treated eucalyptus wood. *Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, 58(3), 270-276. doi: 10.4322/rca.2010
- Kacik, F., Luptáková, J., Nasswettrová, A., Kaciková, D., & Vacek, V. (2016). Chemical alterations of pine wood lignin during heat sterilization. *BioResources*, 11(2), 3442-3452. doi: 10.15376/biores.11.2.3442-3452
- Kubovsky, I., Kaciková, D., & Kacik, F. (2020). Structural changes of oak main components caused by thermal modification. *Polymers*, 12(2), 1-12. doi: 10.3390/polym12020485
- Lazarotto, M., Cava, S. D. S., Beltrame, R., Gatto, D. A., Missio, A. L., Gomes, L. G., & Mattoso, T. R. (2016). Biological resistance and colorimetry of heat-treated wood of two eucalyptus species. *Revista Árvore*, 40(1), 135-145. doi: 10.1590/0100-67622016000100015
- Lengowski, E. C., Muñoz, G.I.B., Klock, U., & Nisgoski, S. (2018). Potential use NIR and visible spectroscopy to analyze chemical properties on thermally treated wood. *Maderas. Ciencia y Tecnologia*, 20(4), 627-640. doi: 10.4067/S0718-221X2018005041001
- Mania, P., Molinski, W., Roszyk, E., & Górská, M. (2020). Optimization of spruce (*Picea abies* L.) wood thermal treatment temperature to improve its acoustic properties. *BioResources*, 15(1), 505-516. doi: 10.15376/biores.15.1.505-516
- Melo, R.R., Dacroce, J. M. F., Rodolfo Jr, F., Lisboa, G. S., & França, L.C.J. (2019a) Lumber yield of four native forest species of the Amazon Region. *Floresta e Ambiente*, 26(1), e20160311. doi: 10.1590/2179-8087.031116
- Melo, R. R., Mota, A. G. F., Sabino, M., Stangerlin, D. M., Batista, F. G., & Souza, M. J. (2019b). Effect of *Qualea paraensis* wood thermal treatment to termite attack resistance. *Revista de Ciências Agrárias*, 42(3), 786-791. doi: 10.19084/rca.17079
- Menezes, W. M., Santini, E. J., Souza, J. T., Gatto, D. A., & Haselein, C. R. (2014). Thermal modification on the physical properties of wood. *Ciência Rural*, 44(6), 1019-1024. doi: 10.1590/S0103-84782014000600011
- Modes, K. S., Santini, E. J., Vivian, M. A., & Haselein, C. R. (2017). Effect of heat treatment on mechanical properties of *Pinus taeda* and *Eucalyptus grandis* woods. *Ciência Florestal*, 27(1), 291-302. doi: 10.5902/1980509826467
- Nisgoski, S., Muñoz, G. I. B., Batista, F. R. R., & Mölleken, R. E. (2014). Influence of carbonization temperature on the anatomical characteristics of *Ocotea porosa* (Nees & Mart. Ex Nees) L. Barroso. *Wood Science and Technology*, 48(2), 301-309. doi: 10.1007/s00226-013-0602-3
- Palermo, G. P. M., Latorraca, J. V. F., Moura, L. F., Nolasco, A.M., Carvalho, A. M., & Garcia, R. A. (2014). Surface roughness of heat-treated *Eucalyptus grandis* wood. *Maderas. Ciencia y Tecnologia*, 16(1), 3-12. doi: 10.4067/S0718-221X2014005000001
- Patera, A., Bulcke, J. V., Boone, M. N., Derome, D., & Carmeliet, J. (2018). Swelling interactions of earlywood and latewood across a growth ring: global and local deformations. *Wood Science and Technology*, 52(1), 91-114. doi: 10.1007/s00226-017-0960-3
- Pereira, A.F. (2013). *Madeiras Brasileiras: Guia de combinação e substituição*. São Paulo, Brasil: Editora Blucher.



- Pratiwi, L. A., Darmawan, W., Priadi, T., George, B., Merlin, A., Gérardin, C., & Dumarçay, S., Gérardin, P. (2019). Characterization of thermally modified short and long rotation teaks and the effects on coating performance. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 21(2), 209-222. doi: 10.4067/S0718-221X2019005000208
- Reis, A. R. S., Abreu, J. L. L., Pinho, D. M., Lisboa, P. L. B., & Urbinati, C. V. (2014). Wood anatomy characterization of mandioqueira (*Qualea* Aubl.) sold in timber markets of the state of Pará. *Enciclopédia biosfera*, 10(19), 448-462.
- Reis, P. C. M. R., Reis, L. P., Souza, A. L., Carvalho, A. M. M. L., Mazzei, L., Reis, A. R. S., & Torres, C. M. M. E. (2019). Clustering of Amazon wood species based on physical and mechanical properties. *Ciência Florestal*, 29(1), 336-346. doi: 10.5902/1980509828114
- Ribeiro, E.S., Souza, R.A.T.M., Paula, M.H., Mesquita, R.R.S., Moreira, E.L., & Fazon, H. (2016). Forest species commercially by Mato Grosso state. *Biodiversidade*, 15(2), 2-20.
- Rowell, R.M., Ibach, R.E., McSweeney, J., & Nilsson, T. (2009). Understanding decay resistance, dimensional stability and strength changes in heat-treated and acetylated wood. *Wood Material Science and Engineering*, 4(1), 14-22. doi: 10.1080/17480270903261339
- Sargent, R. (2019). Evaluating dimensional stability in solid wood: a review of current practice. *Journal of Wood Science*, 65(36), 1-11. doi: 10.1186/s10086-019-1817-1
- Shukla, S.R. (2019). Evaluation of dimensional stability, surface roughness, colour, flexural properties and decay resistance of thermally modified *Acacia auriculiformis*. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 21(4), 433-466. doi: 10.4067/S0718-221X2019005000401
- Silva, P. H., Gomide, L. R., Figueiredo, E. O., Carvalho, L. M. T., & Ferraz-Filho, A. C. (2018). Optimal selective logging regime and log landing location models: a case study in the Amazon forest. *Acta Amazonica*, 48(1), 18-27. doi: 10.1590/1809-4392201603113
- Silva, E. F., Silva, G. F., Figueiredo, E. O., Mendonça, A. R., Santana, C. J. O., Fiedler, N. C., Silva, J. P. M., Aguiar, M. O. A., & Santos, J. S. (2020). Optimized forest planning: allocation of log storage yards in the Amazonian sustainable forest management area. *Forest Ecology and Management*, 472(15), 118231. doi: 10.1016/j.foreco.2020.118231
- Soares-Filho, B. S., Oliveira, A. S., Rajão, R. G., Oliveira, U., Santos, L. R. S., Assunção, A.C., Rodrigues, H. O., Merry, F., & Costa, W. L. (2017). *Economic Valuation of Changes in the Amazon Forest Area: Economic Losses by Fires to Sustainable Timber Production*. Belo Horizonte, Brasil: Centro de Sensoriamento Remoto/UFGM.
- Stragliotto, M. C., Freitas, J. M., Oliveira, A. C., & Pereira, B. L. C. (2019). Yield in sawn wood and residue utilization of *Qualea paraensis* Ducke and *Erisma uncinatum* Warm. *Floresta*, 49(2), 257-266. doi: 10.5380/rev.v49 i2.57284
- Takeshita, S., & Jankowsky, I. P. (2015). Reduction in dimensional changes of Jatobá (*Hymenaea* sp.) and Muiracatiara (*Astronium* sp.) submitted to additional heat treatment. *Scientia Forestalis*, 43(106), 345-352.
- Wolenski, A. R. V., Peixoto, R. G., Fedotova, V., Christoforo, A. L., & Lahr, F. A. R. (2020a). Shear strength estimation model for tropical wood species. *Wood Research*, (65)1, 175-182. doi: 10.37763/wr.1336-4561/65.1.175182
- Wolenski, A. R. V., Almeida, J. P. B., Christoforo, A. L., Lahr, F. A. R., & Peixoto, R. G. (2020b). Estimation model of mechanical properties from the compressive strength values. *Maderas, Ciencia y Tecnología*, 22(4), 483-494. doi: 10.4067/S0718-221X2020005000407
- Wolenski, A. R. V., Peixoto, R.G., Christoforo, A. L., Lahr, F. A. R., & Dias, A. M. P.G. (2019). Estimation of the characteristic tensile strength of the wood in the parallel direction to the grains through of probability models. *Matéria*, 24(4), e-12531. doi: 10.1590/S1517-707620190004.0856
- Zanuncio, A. J., Carvalho, A. G., Carneiro, A. C. O., Filho, M. T., Valenzuela, P., Gacitúa, W., & Colodette, J. L. (2018). Anatomical, ultrastructural, physical and mechanical wood properties of two-year-old *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* clones. *Revista Árvore*, 42(2), e420201. doi: 10.1590/1806-90882018000200001

Manuscrito recebido em 19-may-20

Aceito em 13-nov-20

Publicado em 22 de dezembro de 2021

Este documento deve ser citado como:

Medeiros, D. T., Batista, F. G., Melo, R. R., Mascarenhas, A. R. P., & Pedrosa, T. D. (2021). Alterações físico-mecânicas na madeira de cambará (*Qualea paraensis*) termorretrificada. *Madera y Bosques*, 27(2), e2722176. doi: 10.21829/myb.2021.2722176



Madera y Bosques pelo Instituto de Ecología, A.C. é distribuída sob uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição-NãoComercial ShareAlike 4.0.