

Efeito da modificação térmica nas propriedades de madeiras exóticas de plantios comerciais

Effect of thermal modification on the properties of exotic woods from commercial plantations

Fagner Pinheiro da Conceição 
 Alexandre Miguel do Nascimento 
 Rosilei Aparecida Garcia 
 Natália Dias de Souza 
 Renata Nunes Oliveira 
 Francisco Antonio Lopes Laudares 

Resumo

O calor é utilizado para melhorar algumas propriedades da madeira. Com isto, o objetivo deste trabalho foi verificar os efeitos do calor nas propriedades físicas e mecânica das espécies *Pinus caribaea* var. *caribaea*, *Khaya ivorensis* e *Corymbia citriodora* e verificação dos defeitos após contato com água. Para tanto, os materiais foram processados nas temperaturas de 160, 180 e 200 °C, analisando-se também o controle. Foram avaliadas a densidade aparente, a umidade de equilíbrio, a taxa de absorção de água, a retratibilidade da madeira, e a dureza Janka. As madeiras foram alteradas diferentemente: a densidade aparente foi alterada na temperatura maior e igual a 180 °C e o teor de umidade de equilíbrio maior e igual a 160 °C. As retrações se diferenciaram nos tratamentos com 180 °C para *Pinus caribaea* var. *caribaea* e *Khaya ivorensis* e para o *Corymbia citriodora*, a partir de 160 °C. A taxa de absorção de água só foi afetada pelo tratamento térmico nas madeiras de folhosas. Rachaduras visíveis foram notadas na madeira de *Corymbia citriodora*, especialmente naquelas cortadas tangencialmente. A dureza da madeira melhorou na temperatura de 160 °C, menos para o *Corymbia citriodora* devido ao efeito das rachaduras.

Palavras-chave: Dureza Janka. Rachaduras. Estabilidade dimensional. Corte radial.

Abstract

Heat can be used to improve some properties of wood. Therefore, the goal of this work was to verify the effects of heat on the physical and mechanical properties of the species *Pinus caribaea* var. *caribaea*, *Khaya ivorensis* and *Corymbia citriodora* and checking for imperfections after exposition to humidity. To this end, the material was processed at temperatures of 160, 180 and 200 °C, besides a reference sample. Then, samples' physical properties, apparent density, equilibrium humidity, water absorption rate and shrink ability were evaluated. Janka hardness was the mechanical property analyzed. The woods were affected in different ways regarding physical properties. The apparent density changed at a temperature equal or higher than 180 °C, while the equilibrium moisture content at temperatures equal or higher than 160 °C. Retraction was altered after treatments at 180 °C, while for *Corymbia citriodora*, it was changed from 160 °C. The water absorption rate was only affected by heat treatment of hardwoods. Visible cracks were only noted in *Corymbia citriodora* wood, especially in tangentially cut samples. Wood hardness increased at a temperature of 160 °C, exception for *Corymbia citriodora* due to the effect of cracking.

Keywords: Janka hardness. Cracking. Dimensional stability. Quarter sawn.

¹Fagner Pinheiro da Conceição
¹Prefeitura Municipal de Saquarema
 Saquarema - RJ - Brasil

²Alexandre Miguel do Nascimento
²Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
 Seropédica - RJ - Brasil

³Rosilei Aparecida Garcia
³Université Laval
 Québec - QC - Canada

⁴Natália Dias de Souza
⁴Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
 Seropédica - RJ - Brasil

⁵Renata Nunes Oliveira
⁵Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
 Seropédica - RJ - Brasil

⁶Francisco Antonio Lopes Laudares
⁶Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
 Seropédica - RJ - Brasil

Recebido em 21/09/23
 Aceito em 05/03/24

Introdução

A madeira é um material altamente versátil e por isso é empregada das mais diversas maneiras pelo ser humano. Porém, algumas características deste material o tornam limitado para se utilizar em determinados ambientes, como é o caso de locais com grande amplitude térmica e de umidade relativa, pois a instabilidade dimensional da madeira pode acarretar defeitos no produto e imperfeições de acabamento (Hill, 2006; Almeida, 2019).

O intemperismo se caracteriza por oferecer modificações físicas, químicas e mecânicas, semelhantes às modificações ocorridas em madeira envelhecidas. Estas possíveis modificações têm forte influência na escolha da madeira, seja para aplicações em ambientes internos e externos (Freitas; Gonçalves; Del Menezzi, 2016; Almeida, 2019). A condição ideal é obter madeiras que tenham boas propriedades físicas e mecânicas e estéticas, o que não é comum e faz com que estes tipos de madeiras tenham alta demanda e preço de mercado. Madeiras de espécies exóticas e nativas, de plantios comerciais abundante no Brasil, e com poucas restrições legais de colheita e comercialização, podem ser utilizadas na construção, em condição de serviço externo, sujeitas ao contato direto com água líquida ou altos teores de umidade do ar (Hill; Altgen; Raitlari, 2021), como decks, cruzetas, postes e dormentes, por exemplo, porém, nem todas possuem propriedades físicas que garantam estabilidade dimensional adequada quando expostas à alta umidade (FPL, 2021). A partir dessa dificuldade, é importante empregar técnicas de melhorias, ou modificações, para que estas madeiras sofram menos com o intemperismo (Rajkovic; Miklečić, 2021). Dentre os métodos de modificação em madeiras que incluem principalmente acetilação, impregnação e tratamento térmico, a modificação da madeira por tratamento térmico tem sido extensivamente estudada (Hill; Altgen; Raitlari, 2021).

Madeira tratadas termicamente, por exemplo “*thermowood*”, são amplamente utilizadas em países que tem tradição na construção com madeira para fins estruturais e acabamento. São modificadas por métodos naturais, ampliando suas aplicações e utilização, que as confere estabilidade dimensional, maior durabilidade e natureza sustentável. Normalmente não requer revestimento superficial mesmo em condições climáticas severas, dando um caráter ecológico, sustentável para o produto (Lunawood, 2024).

Instabilidade dimensional pode ser responsável por perda precoce de funcionalidade de madeiras usadas na construção civil. Madeira do gênero *Pinus* é amplamente utilizada na indústria florestal, principalmente no setor moveleiro e civil, e por isso, faz-se necessário a busca por técnicas que melhorem e aperfeiçoem as suas propriedades tecnológicas, e a modificação térmica em madeira do gênero *Pinus* mostrou melhoria na estabilidade dimensional (Santos; Silva, 2021). Em adição, tratamentos que prevejam e/ou prolonguem o tempo de vida útil das madeiras de construção se mostram fundamentais.

A modificação térmica é um dos processos industriais que vem sendo realizado para melhorar algumas propriedades da madeira, tais como: aumento da estabilidade dimensional, redução da higroscopicidade e aumento da resistência à degradação causada por fungos ou insetos (Hill; Altgen; Raitlari, 2021). Esses benefícios são decorrentes das alterações químicas causadas pela ação do calor (Sivonen *et al.*, 2002; Batista; Tomaselli; Klitzke, 2011; Silva *et al.*, 2015; Modes *et al.*, 2017; Özgenç *et al.*, 2017). Em alguns casos, o processo altera a cor da madeira, gerando maior atratividade aos produtos (Freitas; Gonçalves; Del Menezzi, 2016).

De acordo com Batista (2019), a modificação térmica é o processo que utiliza elevadas temperaturas (140 °C a 260 °C), com diferentes equipamentos e meios de transmissão de calor (água, vapor de água, nitrogênio e óleo vegetal), com o objetivo de causar alterações na composição química da madeira, que podem resultar em melhorias de algumas propriedades como a cor, a estabilidade dimensional e a resistência à biodeterioração.

Notadamente, observa-se que quanto maior a temperatura aplicada, maiores as reduções na resistência mecânica da madeira modificada termicamente, o que poderia restringir a sua utilização. Laudares *et al.* (2023) pesquisou a influência de tratamentos térmicos utilizando mufla e autoclave, e relataram redução do módulo de elasticidade dinâmico conforme se aumenta a temperatura de tratamento. Por outro lado, o módulo de elasticidade relativo, dado pela razão entre o módulo de elasticidade e a densidade, pode ser aumentado utilizando tratamentos a temperaturas mais baixas (Wu *et al.*, 2021). Hill (2006) afirma que ao submeter a madeira ao tratamento térmico ocorre redução da dureza, do módulo de ruptura na flexão estática e da resistência à abrasão, também podendo ocorrer defeitos como rachaduras e afrouxamento dos nós.

A densidade da madeira também é afetada pelo tratamento. Segundo Unsal e Ayrilmis (2005), o tratamento térmico gera um decréscimo da densidade aparente da madeira, este fato pode ser explicado pela maior estabilidade dimensional e pela diminuição de sua higroscopicidade.

As hemiceluloses (polioses) são os primeiros componentes degradados durante o tratamento térmico, já que são os mais susceptíveis a temperaturas entre 160 e 280 °C, e os produtos de degradação gerados nesse processo são principalmente água, ácido acético e ácido fórmico. Portanto, dependendo da duração e da temperatura do processo térmico utilizado, a concentração de ácido fórmico e ácido acético pode aumentar, acelerando a degradação da madeira, podendo reduzir a sua resistência mecânica, assim como reduzir o teor da umidade de equilíbrio e melhorar as propriedades de inchamento (Fengel; Wegener, 1984; Schniewind, 1985; Brito *et al.*, 2006; Figueroa; Moraes, 2009; Modes, 2010; Czajkowski; Olek; Weres, 2020; Wu *et al.*, 2021).

Modes *et al.* (2017) perceberam que ao submeter madeiras de *Pinus taeda* L. e *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden a processos térmicos, utilizando autoclave e estufa elétrica, algumas propriedades mecânicas foram reduzidas e outras foram melhoradas. Para *Pinus taeda*, houve redução da resistência na compressão paralela, e na dureza de superfície tangencial e radial, e aumento na dureza de topo e ao impacto. Já para *Eucalyptus grandis* só houve diferença significativa quanto à resistência ao impacto.

Wu *et al.* (2021), submeteram madeiras de *Pinus massoniana* a temperaturas de 160, 180, 200 e 220 °C e verificaram reduções gradativas de celulose, hemicelulose e lignina, sendo mais expressivas a temperaturas mais altas.

Esteves *et al.* (2021) perceberam redução da densidade, da resistência à flexão e rigidez, melhoria da anisotropia, assim como diminuição da absorção de água, após submeterem madeiras jovens de *Paulownia* sp. a processos térmicos semelhantes a ThermoWood®.

Deste modo, o objetivo deste trabalho foi verificar o efeito da modificação térmica nas propriedades físicas, e na dureza Janka em madeiras de reflorestamento de *Corymbia citriodora*, *Pinus caribaea* var. *caribaea* e *Khaya ivorensis*.

Material e métodos

Preparo do material

O material utilizado foi proveniente de nove árvores, três de cada espécie estudada. Os indivíduos de *Pinus caribaea* var. *caribaea* e de *Corymbia citriodora* com idade aproximada de 25 anos e 60 anos, respectivamente. O material de *Khaya ivorensis* foi obtido de indivíduos com aproximadamente 33 anos no campus da UFRRJ e Embrapa Agroecologia.

As amostras, em cortes radiais e tangenciais (Figura 1), foram confeccionadas de pranchas radiais, que foram levados para uma câmara climatizada a 20 °C e 65% de umidade relativa (UR) e ali permaneceram até atingirem peso constante. Para a produção das amostras dos tratamentos estabelecidos, foram utilizadas pranchas com dimensões de 25 x 55 x 350 mm (espessura x largura x comprimento). Os tratamentos foram resultantes da combinação dos fatores: três madeiras, dois planos de corte e três temperaturas de processo mais o controle.

Modificação térmica

A modificação térmica foi realizada em escala laboratorial, em uma mufla elétrica, da marca *Linn Elektro Therm* e equipada com um sistema de controle de temperatura. O processo foi realizado em quatro etapas:

- aquecimento do material a partir da temperatura ambiente (~30 °C) até 100 °C durante 120 min para eliminação completa da água;
- aumento da temperatura de 100 °C até a temperatura de modificação térmica desejada (160, 180 ou 200 °C) durante 60 min;
- permanência na temperatura de modificação térmica desejada por 150 min; e
- resfriamento do material até temperatura ambiente.

Após os processos térmicos, as pranchas foram novamente climatizadas a 20 °C e 65% UR até atingirem a umidade de equilíbrio constante. Em seguida, foram redimensionadas com dimensão de 20 x 50 x 350 mm (espessura, largura e comprimento), obtendo-se 5 amostras por prancha. As dimensões finais das amostras foram de 20mm de espessura, 50mm de largura e 50 mm de comprimento.

Figura 1 - Amostras cortadas na orientação denominada radial (a esquerda) e tangencial (a direita)



Propriedades físicas e mecânicas

Determinação das densidades aparente

A densidade aparente foi determinada de acordo com a Equação 1 (FPL, 2021) antes e após a madeira ser modificada termicamente. A densidade aparente é a razão entre a massa e o volume em uma determinada umidade. A condição do ambiente foi de 22 °C e 65% UR.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{TU\%}}{V_{TU\%}} \quad \text{Eq. 1}$$

Em que:

ρ_{ap} (g/cm³) é a densidade aparente;

$m_{TU\%}$ (g) é a massa em um determinado teor de umidade; e

$V_{TU\%}$ (cm³) é o volume em uma determinada umidade.

Determinação da umidade de equilíbrio

A umidade de equilíbrio foi determinada de acordo com a Equação 2 (FPL, 2021; ABNT, 2022). As amostras foram acondicionadas em ambiente climatizado (20 ± 2 °C e 65 ± 5% UR). Uma vez em equilíbrio, foram levados para estufa a 103 ± 2 °C até peso constante para obtenção da massa anidra.

$$UE = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad \text{Eq. 2}$$

Em que:

UE (%) é a umidade de equilíbrio da madeira;

m_i (g) é a massa inicial em condição climatizada; e

m_s (g) é a massa anidra, seca em estufa até peso constante.

Estabilidade dimensional

A estabilidade dimensional foi determinada de acordo com a norma NBR 7190-3 (ABNT, 2022) e, para tanto, as suas dimensões foram aferidas na umidade de equilíbrio, na condição saturada e, por fim, na condição anidra. Deste modo, as retrações volumétrica, radial e tangencial, foram determinados, pela Equações 3, 4 e 5.

$$\beta_{vol} = \frac{V_{Sat} - V_{Se}}{V_{sat}} \quad \text{Eq. 3}$$

$$\beta_{rad} = \frac{Dr_{Sat} - Dr_{se}}{Dr_{sat}} \quad \text{Eq. 4}$$

$$\beta_{tang} = \frac{Dt_{Sat} - Dt_{se}}{Dt_{sat}} \quad \text{Eq. 5}$$

V_{Sat} é o volume da amostra em estado saturado de umidade (mm³);

V_{Se} é o volume da amostra em estado seco em estufa (0%) (mm³);

Dr_{sat} é a dimensão da amostra na direção radial em estado de umidade saturada(mm);

Dt_{sat} é a dimensão da amostra na direção tangencial em estado de umidade saturada(mm);

Dr_{se} é a dimensão da amostra na direção radial em estado de umidade seco em estufa(mm); e

Dt_{se} é a dimensão da amostra na direção tangencial em estado seco em estufa (mm);

Taxa de absorção de água

Amostras foram imersas em água, por um período de 24 h. Suas massas foram tomadas antes e após imersão, usando-se balança analítica com precisão em duas casas decimais. Para o cálculo da taxa de absorção de água foi utilizada a Equação 6.

$$t = 100 \times \frac{m_f - m_i}{m_f} \quad \text{Eq. 6}$$

Em que:

t é a taxa de absorção de água das amostras (%);

m_f é a massa das amostras após imersão em água (g); e

m_i é a massa inicial das amostras em equilíbrio com o ambiente (g).

Intensidade de rachaduras de topo

Para a quantificação das rachaduras de topo, as amostras tiveram suas superfícies transversais digitalizadas com a utilização de *scanner* (impressora Epson L3250). As imagens então foram analisadas e as rachaduras de topo quantificadas em relação à área padronizada com 2,0 x 5,0 cm². Das rachaduras de topo foram determinadas as frequências, comprimento de cada rachadura e o comprimento médio delas, que foi calculado com o somatório dos comprimentos das rachaduras de topo dividido pela frequência.

Determinação da dureza Janka

A dureza Janka foi determinada de acordo com a norma NBR 7190-3 (ABNT, 2022), na qual uma esfera de aço penetra na madeira causando uma deformação com área de 1 cm². O ensaio foi realizado em máquina universal de ensaios da marca *Contenco*, com capacidade para 30 toneladas, usando-se célula de carga 2000 kgf. A carga foi aplicada na direção dos raios (plano longitudinal tangencial) e perpendicular aos raios (plano longitudinal radial) e os resultados apresentados se referem aos valores médios das duas direções.

Análise estatística

As análises estatísticas foram realizadas com o *software Statistica 14.0*, em nível de confiança de 95% de para todos os testes utilizados. Os testes paramétricos realizados foram: *Brown-Forsythe*, para homogeneidade de variância; *Kolmogorov-Smirnov*, para verificação da normalidade dos dados; análise de variância (ANOVA) em arranjo fatorial ou *one-way ANOVA*; teste de *Tukey*, para comparação múltipla entre as médias, com correção para repetições desiguais, quando necessário, assim como correlação de *Pearson*

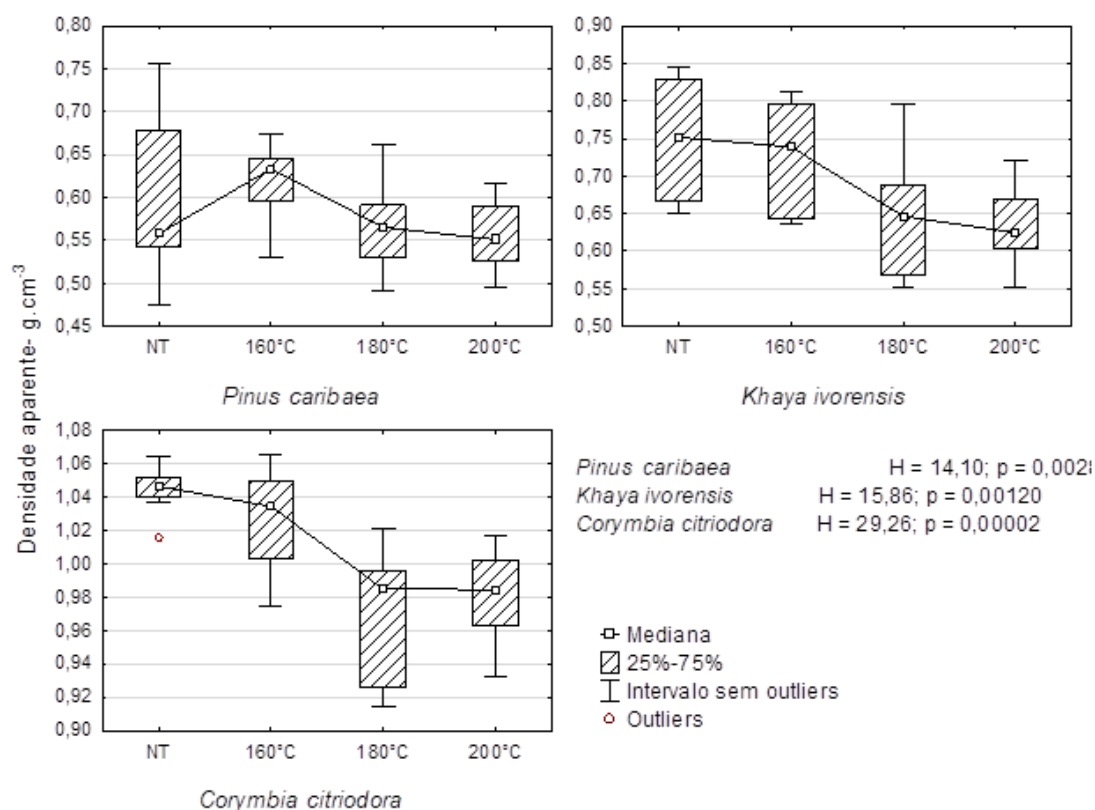
Os testes não-paramétricos utilizados foram: *Kruskal-Wallis*, para realização da análise de variância ou de *Mann-Whitney*; teste de *Dunn*, para comparação múltipla entre as medianas dos postos. Também foram realizadas teste gráfico de box plot.

Resultados e discussão

Na Figura 2 tem-se os valores de densidade aparente analisados pelo teste de *box plot*. De forma geral, nota-se que os valores de densidade aparente reduzem à medida que a temperatura de modificação térmica é aumentada, sendo que as diferenças aparecem a partir de 160 °C para as madeiras de folhosas.

A redução da densidade também foi observada por Carvalho *et al.* (2017), em seus estudos com madeiras das espécies *Eucalyptus urophylla* e *Pinus oocarpa* em um gradiente de temperatura que variou de 40 a 200 °C, sobretudo quando submetidos a temperaturas mais elevadas, destacando ainda que a partir de 160 °C a madeira começa a perder material orgânico por já se encontrar livre de umidade, e que, a partir de 200 °C as diferenças entre as densidades foram detectadas para as duas madeiras estudadas. Lima (2019) estudando a madeira de *Khaya ivorensis* modificada termicamente a 180 °C e 200 °C também observou redução da densidade aparente em decorrência da modificação térmica.

Figura 2 - Comparação das densidades aparentes das madeiras de *Pinus caribaea* var. *caribaea*, *Khaya ivorensis*, e *Corymbia citriodora* para diferentes temperaturas de modificação térmica, pelo gráfico de box plot, onde NT significa “não tratada”



Carrasco, Oliveira e Mantilla (2016) ao estudarem híbridos de *Eucalyptus grandis* com *Eucalyptus urophylla* encontraram uma redução de 13% da densidade aparente ao se relacionar a madeira não modificada com a modificada a 200 °C. Além disso, a redução dos valores da densidade foi intensificada a partir de 180 °C.

Teor de umidade de equilíbrio e taxa de absorção de água

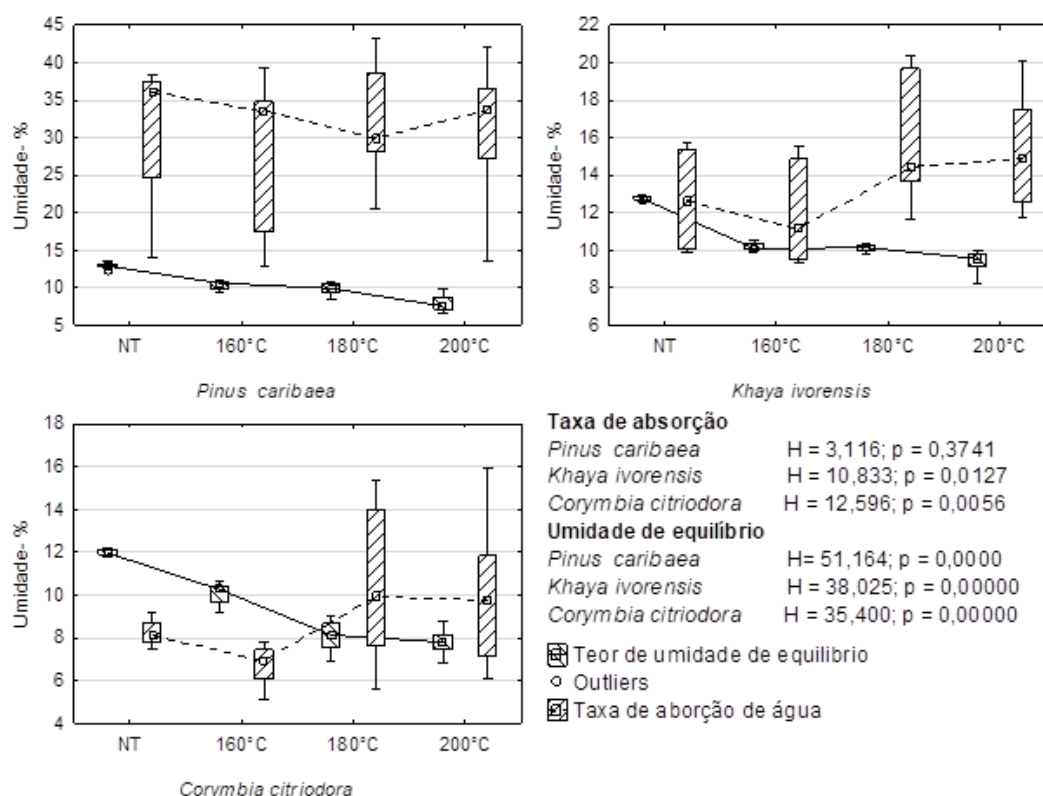
Na Figura 3 encontram-se os valores de umidade de equilíbrio e de taxa de absorção de água. Nota-se redução da umidade de equilíbrio em decorrência do aumento da temperatura de modificação térmica, sendo que esta redução foi de 31, 25 e 34%, respectivamente, para a madeira de *Pinus caribaea* var. *caribaea*, *Khaya ivorensis*, e *Corymbia citriodora*, ao se comparar a madeira não tratada com a madeira modificada a 200 °C. Carvalho *et al.* (2017) estudando *Eucalyptus urophylla* e *Pinus oocarpa*; Huller *et al.* (2017) estudando madeira de *Eucalyptus cloeziana* expostas a temperaturas finais de 160 °C a 210 °C; Ferreira *et al.* (2019) estudando madeira de *Hymenolobium petraeum* Ducke expostas as temperaturas finais de 180 e 200 °C; Santos e Silva (2021) estudando a madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* modificada termicamente a 160 e 200 °C encontraram a mesma tendência de redução do Teor de Umidade de Equilíbrio em decorrência da modificação térmica.

Na taxa de absorção de água nota-se, que para as três espécies, o menor valor numérico foi obtido para a madeira modificada a 160 °C, mesmo quando não significativo estatisticamente. Apenas as madeiras de folhosas, em temperaturas acima de 160 °C revelaram alterações com aumento do nível de absorção de água.

A temperatura de transição vítrea, ou temperatura de plastificação, é a temperatura da passagem de um estado organizado e rígido (vítreo) de um polímero para um estado desordenado no qual as cadeias possuem mobilidade maior (polímero plastifica). Essa plastificação como a celulose, hemicelulose e a lignina, dão origem ao comportamento plástico ao material (Salmen, 1982).

Em geral, pode-se afirmar que, para celulose, a temperatura de transição vítrea se situa entre 200 e 250 °C. Para a hemicelulose, é observada na faixa entre 150 e 220 °C e, para a lignina, na faixa entre 125 e 200 °C (Back; Salmén, 1982).

Figura 3 - *Box plot* dos dados da umidade de equilíbrio e taxa de absorção de água das madeiras de *Pinus caribaea* var. *caribaea*, *Khaya ivorensis* e *Corymbia citriodora* em diferentes temperaturas de tratamento térmico, com os valores de H de Kruskal-Wallis, onde NT significa “não tratada”



No processo de modificação térmica, ocorrem mudanças químicas na lignina e na hemicelulose, e a madeira modificada torna-se menos higroscópica (Shi; Kocaefe; Zhang, 2007), pois há uma redução do número de grupos hidroxílicos (OH-) que são substituídos por grupos hidrofóbicos o-acetil, que criam ligações cruzadas entre as fibras, reduzindo significativamente a possibilidade da água de penetrar na madeira (Poncsák *et al.*, 2006). As hemiceluloses degradam-se primeiro (entre 160 e 260 °C) devido ao baixo peso molecular e estrutura ramificada, que facilitam a degradação quando comparada à celulose e lignina (Fengel; Wegener, 1984).

Para melhor entender os resultados da umidade na madeira modificada termicamente, foi feito a análise de correlação de *Pearson* que se encontra na Tabela 1.

Valores de correlações foram negativos, inversamente proporcional a densidade da madeira, pois quanto maior for a fração parede celular, menor será a absorção da água, ou ainda, quando mais espaços vazios, maior será a captura de água na forma líquida, o que pode se observar nas diferenças entre os valores de obtidos para *Pinus caribaea* var. *caribaea* e *Khaya ivorensis*, apesar da madeira de *Corymbia citriodora* possuir a maior densidade aparente obteve um coeficiente intermediário entre as duas espécies.

Os coeficientes de correlação tendem a reduzir seus valores à medida que se aumenta a temperatura de tratamento, e, no caso do *Pinus caribaea* var. *caribaea*, acima de 160 °C os coeficientes deixam de ser significativos, e, na madeira de *Corymbia citriodora*, acima de 180 °C. O mesmo pode ser observado quando se considera todas as espécies dentro do mesmo nível de tratamento térmico, redução do valor de “r” à medida que se aumenta a temperatura de tratamento. Observando a Figura 3, pode-se associar o aumento da taxa de absorção, acima da temperatura de 160 °C, com a redução da densidade aparente da madeira, observada na Figura 2, para as madeiras de *Khaya ivorensis* e *Corymbia citriodora*.

Coeficientes de correlação mais baixos encontrados para madeira de *Corymbia citriodora* pode ser entendido analisando a Figura 4, que mostra o aumento do número de fissuras, o que não aconteceu com as outras madeiras estudadas, após a madeira ser colocada em contato com a água. A fissuração aumenta a acessibilidade da água líquida às regiões mais internas da madeira, no período de 24 h, reduzindo o nível de associação entre densidade e taxa de absorção.

Tabela 1 - Valores dos coeficientes de correlação da Taxa de absorção de água com a densidade aparente para as espécies de *Pinus caribaea* var. *caribaea*, *Khaya ivorensis* e *Corymbia citriodora* submetidos a diferentes temperaturas de modificação térmica, onde NT significa “não tratada”

Tratamentos	Coeficientes de correlações de Pearson - Taxa de absorção			
	<i>Pinus caribaea</i> var. <i>caribaea</i>	<i>Khaya ivorensis</i>	<i>Corymbia citriodora</i>	Todas as madeiras
NT	-0,82	-0,99	-0,68	-0,85
160 °C	-0,56	-0,99	-0,79	-0,76
180 °C	-0,45	-0,95	-0,60	-0,71
200 °C	-0,10	-0,84	-0,51	-0,64
Todos	-0,38	-0,92	-0,66	-0,75

Nota: valores em negrito são significativos ao nível de 5% de significância.

Figura 4 - Amostras de *Corymbia citriodora* modificados termicamente a 160 °C antes (esquerda) e após (direita) o processo de interação com a água



Estabilidade dimensional

Os resultados das retrações radiais, tangenciais, volumétricas de *Pinus* var. *caribaea*, *Khaya ivorensis* e *Corymbia citriodora* estão apresentados na Figura 5, para diferentes temperaturas de tratamento térmico assim como o material destinado como controle, denominado NT.

Madeiras de *Pinus caribaea* var. *caribaea* e *Khaya ivorensis* tratadas acima de 160 °C tiveram menores índices de retração radial, tangencial e volumétrica de forma significativa, significância que pode ser confirmada observando que não há sobreposição entre os intervalos de confiança das outras médias. Na madeira de *Corymbia citriodora*, as diferenças estatísticas entre as médias são notadas entre todas as temperaturas utilizadas de tratamento e para todos os índices de retração estudados (β_{rad} , β_{tang} e β_{vol}).

Oliveira, Tomazello Filho e Fiedler (2010), encontraram para madeira natural de *Corymbia citriodora*, com 16 anos de idade, índices percentuais de retração radial, tangencial, volumétrica e coeficiente de anisotropia iguais a 7,1%, 10,0%, 18,3% e 1,4, respectivamente. Valores inferiores numericamente aqui encontrados para madeira com aproximadamente 60 anos de idade. Segundinho *et al.* (2019) observaram para madeira de *Corymbia citriodora*, com idade entre 15-20 anos retração volumétrica de 16,2%, valor pouco inferior ao encontrado por Oliveira, Tomazello Filho e Fiedler (2010) e inferior ao encontrado neste trabalho. Menezes *et al.* (2014) estudaram os índices de inchamento, radial, tangencial, volumétrica e o coeficiente de anisotropia, para madeira de *Corymbia citriodora* modificadas e não modificadas termicamente, mostrando nos resultados diferenças estatísticas para madeiras natural e modificadas termicamente nas temperaturas de 160 e 180 °C, sendo o coeficiente de anisotropia igual a 1,56 para madeira não tratada e 1,28 e 1,24 para aquelas modificadas em 160 e 180 °C.

Os valores de coeficiente de anisotropia da madeira de *Corymbia citriodora* modificada termicamente foram inferiores a 1, Tabela 2. Isto pode ser explicado pela quantidade e intensidade de rachaduras de topo, nas

seções transversais das amostras, de modo a gerar resultado inesperado (Figura 4). Anjos (2014), estudando o efeito do tratamento térmico no inchamento da madeira de 3 espécies nativas (*Manilkara huberi* (Ducke) Stand., *Peltogyne recifensis* Ducke e *Goupia glabra* Aubl.), observou que as rachaduras da direção radial e tangencial, foram nítidas nas espécies de maior densidade (maçaranduba e roxinho) e que a presença destas, afetou os resultados de inchamento lineares e volumétrico.

Quantificação de rachaduras de topo

Na Tabela 3 estão registradas as quantificações das rachaduras de topo da madeira de *Corymbia citriodora*, em função do tipo de amostras e dos tratamentos térmicos.

A presença de rachaduras de topo foi dominante nas amostras tangenciais (124) e estas aumentam a partir da temperatura de 160 °C, Figura 6. Além de mais frequentes, o comprimento médio das rachaduras de topo é maior nas amostras tangenciais (14,2 mm), aumentando significativamente com o aumento da temperatura. Nas temperaturas de 180 e 200 °C aparecem diferenças significativas entre os comprimentos médios das rachaduras de topo entre as amostras radiais e tangenciais. A Figura 6 traz, como exemplo ilustrativo, as rachaduras de topo que são notadas apenas nas amostras de *Corymbia citriodora* modificadas termicamente, tanto as amostras radiais e tangenciais. Fica evidente que o aumento gradual da temperatura também aumenta a frequência das rachaduras de topo e os seus comprimentos médios.

Figura 5 - Valores médios e intervalo de confiança da retração das madeiras de *Pinus caribaea* var. *caribaea*, *Khaya ivorensis* e *Corymbia citriodora* em função das diferentes temperaturas de tratamento, sendo β_{rad} a retração radial, β_{tang} a retração tangencial e β_{vol} a retração volumétrica, onde NT significa “não tratada”

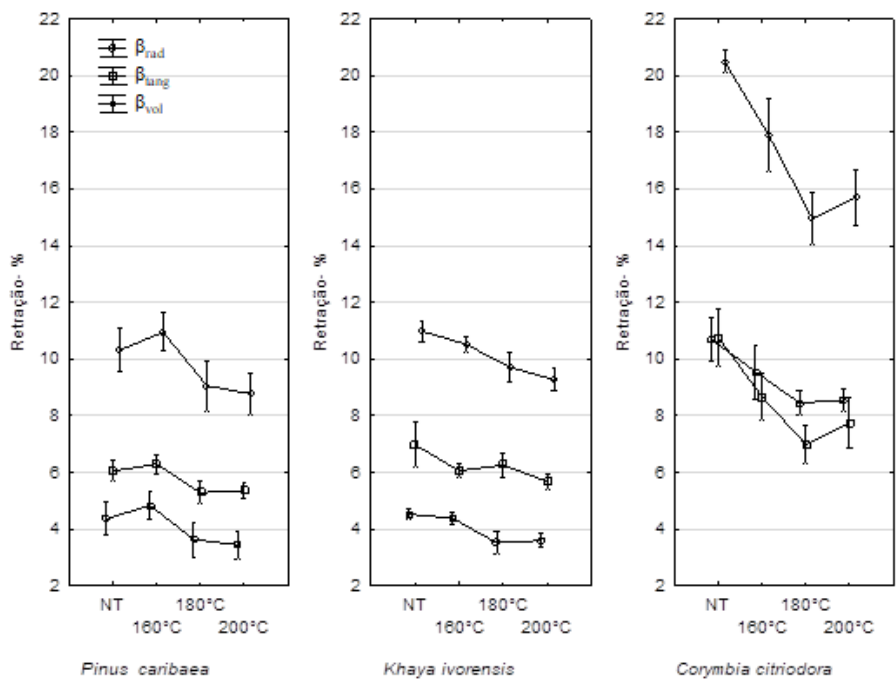


Tabela 2 - Valores médios dos coeficientes de anisotropia para as madeiras de *Pinus caribaea* var. *caribaea*, *Khaya ivorensis* e *Corymbia citriodora* em função das diferentes temperaturas de tratamentos, onde NT significa “não tratada”

Tratamentos	<i>Pinus caribaea</i> var. <i>caribaea</i>			<i>Khaya ivorensis</i>			<i>Corymbia citriodora</i>		
NT	1,46	a	0,33	1,54	a	0,28	1,03	a	0,23
160 °C	1,34	ab	0,26	1,39	a	0,17	0,93	a	0,20
180 °C	1,55	ab	0,35	1,81	b	0,28	0,83	a	0,11
200 °C	1,67	b	0,47	1,59	ab	0,17	0,91	a	0,16

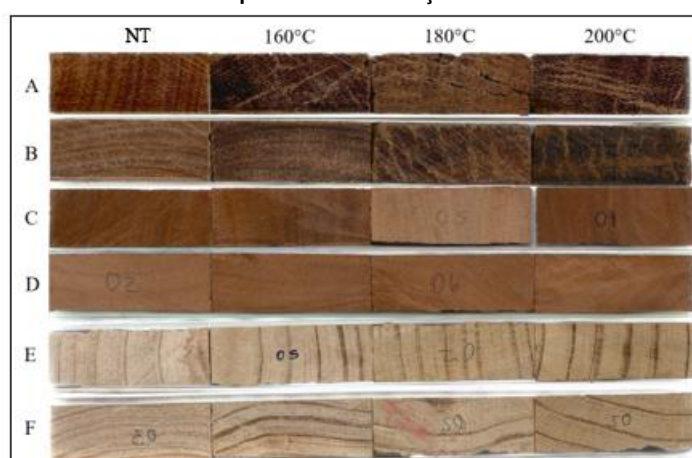
Nota: valores sobre escrito são os desvios padrões. Médias seguidas por distintas letras minúsculas, na mesma coluna, mostram diferença estatística, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

Tabela 3 - Quantificação de rachaduras de topo no plano transversal das amostras de *Corymbia citriodora*, considerando a frequência, comprimento médio das rachaduras de topo e comprimento total, para diferentes temperaturas de tratamento térmico em amostras denominadas radiais e tangenciais

Tratamentos	Frequência		Comprimento – mm							
			Valor médio						Somatório	
	R	T	R			T			R	T
160 °C	9	6	8,2	[21,2]	ab A	12,3	[35,8]	a A	110,8	49,2
180 °C	22	57	10,5	[36,4]	bc B	19,9	[74,6]	b A	437,9	595,8
200 °C	28	61	10,9	[43,5]	c B	24,7	[72,2]	b A	692,1	664,2
Total	59	124	-	-	-	-	-	-	-	-
Média	-	-	7,4	-	-	14,2	-	-	-	-

Nota: R e T são as amostras denominadas radiais e tangenciais, respectivamente. Valores entre colchetes são as médias dos postos obtidos pelo teste de *Kruskal -Wallis*. Letras minúsculas distintas na mesma coluna, e letras maiúsculas, numa mesma linha, mostram diferenças estatísticas significativas pelo teste de Dunn, ao nível de 5%. O comprimento total das rachaduras é o somatório.

Figura 6 - Seção transversal das amostras para a identificação de rachaduras de topo



Nota: NT é a madeira não modificada termicamente, 160 °C, 180 °C e 200 °C são as madeiras modificadas nas respectivas temperaturas. Letras A, C e E representam os cortes radiais; B, D e F os cortes tangenciais. Madeira de *Corymbia citriodora*, são as letras A e B, *Khaya ivorensis* C e D, e *Pinus caribaea* var. *caribaea*, letras E e F.

Dureza Janka

Ao analisar a Figura 7, observa-se que a madeira não tratada (NT) de *Corymbia citriodora* possui maior resistência. Esse fato deve-se à maior densidade da madeira de *Corymbia citriodora*. Porém, ao ser modificada termicamente, a espécie teve seus valores de dureza Janka reduzidos drasticamente, uma vez que as temperaturas elevadas fragilizaram sua estrutura, com surgimento de rachaduras de topo nas células de raios, como pode ser visto na Figura 3.

As espécies *Pinus caribaea* var. *caribaea* e *Khaya ivorensis* possuem um comportamento similar entre si como um ganho de resistência para a madeira modificada a 160 °C, mesmo que este ganho não tenha sido significativo. Acima de 160 °C, houve redução de resistência, significativo apenas para *Khaya ivorensis*.

Modes *et al.* (2017) notaram redução na densidade aparente e perda de massa com o aumento da temperatura ao tratar termicamente madeira de *Pinus caribaea* var. *caribaea* e eucalipto, justificado pela degradação dos componentes químicos de alto peso molecular. Em relação à dureza, observou-se aumento significativo da resistência para o tratamento a 160 °C, comparada ao controle (natural). Neste trabalho, isso foi observado para as madeiras *Pinus caribaea* var. *caribaea* e *Khaya ivorensis*.

A correlação entre densidade e dureza da madeira foram categorizadas em função do tipo de madeira e dos tratamentos térmicos aplicados. Correlações positivas e significativas foram encontradas para a madeira de *Pinus caribaea* var. *caribaea* e *Khaya ivorensis*, com maiores valores para última. Madeira de *Corymbia citriodora* apresentou o menor coeficiente de correlação e quando considerado os coeficientes para os diferentes tratamentos, nenhum deles foi significativo (Tabela 4).

Figura 7 - Dureza das madeiras de *Pinus caribaea* var. *caribaea*, *Khaya ivorensis* e *Corymbia citriodora* submetidos a diferentes temperaturas de modificação térmica nas direções transversais (radial e tangencial) com os valores de H de Kruskal-Wallis, onde NT significa “não tratada”

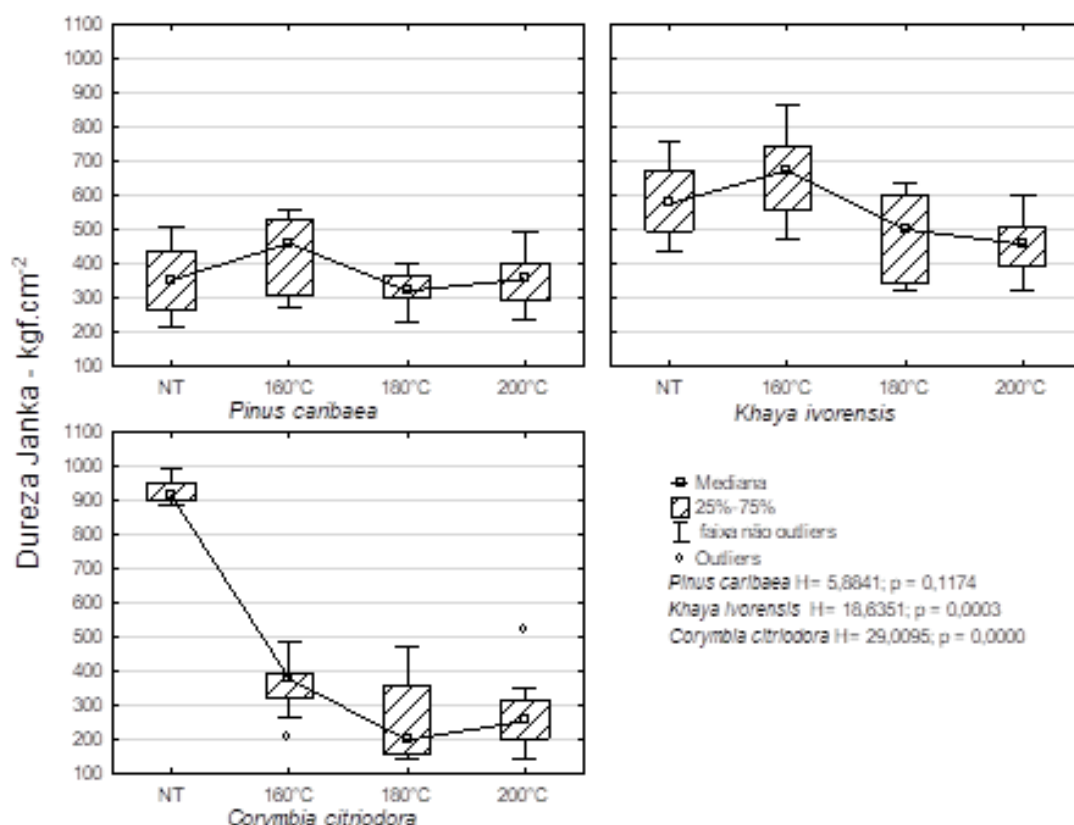


Tabela 4 - Valores dos coeficientes de correlação entre a dureza Janka e a densidade aparente para as espécies de *Pinus caribaea* var. *caribaea*, *Khaya ivorensis* e *Corymbia citriodora*, submetidos a diferentes temperaturas de modificação térmica e em diferentes direções de carregamento, onde NT significa “não tratada”

Tratamentos	Coeficientes de correlações de Pearson			
	<i>Pinus caribaea</i>	<i>Khaya ivorensis</i>	<i>Corymbia citriodora</i>	Todas as madeiras
NT	0,84	0,94	0,96	0,98
160 °C	0,87	0,76	0,34	-0,10
180 °C	0,69	0,95	0,57	-0,25
200 °C	0,79	0,68	0,41	-0,37
Todos	0,80	0,80	0,69	0,29

Nota: valores em negrito são significativos ao nível de 5% de significância.

Conclusões

A modificação térmica reduziu a densidade aparente da madeira de todas as espécies a partir de 180 °C assim como a higroscopicidade da madeira na menor temperatura testada (160 °C). Por outro lado, o efeito na absorção de água foi dependente da espécie, em que não houve efeito do processo para o *Pinus caribaea* var. *caribaea* e houve efeito para as folhosas a partir de 180 °C. As rachaduras de topo decorrentes da modificação térmica foram verificadas apenas em madeira de *Corymbia citriodora* e sua frequência e intensidade aumentaram com a temperatura, e foram mais intensas nas peças denominadas tangenciais do que nas radiais. Houve aumento da dureza Janka em 160 °C em relação ao controle, decrescendo em seguida com o efeito do aumento da temperatura. A presença e o efeito das rachaduras ocorreram apenas na madeira de *Corymbia citriodora*, reduzindo substancialmente a dureza nas madeiras tratadas com calor. A madeira tratada de *Corymbia citriodora*, apesar da sua alta densidade, não se mostra adequada para ser exposta a condição de

serviço externo e, assim entrar em contato com água na forma líquida, devido ao alto nível de rachaduras, que pode facilitar o acesso da água, a parte central da madeira.

Referências

- ALMEIDA T. H. **Efeito do intemperismo sobre propriedades da madeira**. São Carlos, 2019. 121 f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.
- ANJOS, F. P. **Efeitos da termorretificação nas propriedades físicas de três espécies madeireiras da Amazônia**. Belém, 2014. 66 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190-3**: projeto de estruturas de madeira: parte 3: métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas. Rio de Janeiro, 2022.
- BACK, E. L.; SALMÉN, N. L. Glass transition of wood components hold implications for molding and pulping processes. **Tappi Journal**, Norgross, v. 65, n. 7, p. 107-110, 1982.
- BATISTA, D. C. Retificação térmica, termorretificação, tratamento térmico, tratamento com calor ou modificação térmica? **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 29, n. 1, p.463-480, abr. 2019.
- BATISTA, D. C.; TOMASELLI, I.; KLITZKE, R. J. Efeito do tempo e da temperatura de modificação térmica na redução do inchamento máximo da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 3, p. 533-540, jul./set. 2011.
- BRITO, J. O. *et al.* Densidade básica e retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis*, submetida a diferentes temperaturas de termorretificação. **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 182-188. 2006.
- CARRASCO, E. V. M.; OLIVEIRA, A. L. C.; MANTILLA, J. N. R. Influência da temperatura na resistência e no módulo de elasticidade em madeira de híbridos de eucaliptos. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 389-400, abr./jun. 2016.
- CARVALHO, A. G. *et al.* Método de ressonância para predição das propriedades mecânicas das madeiras de *Eucalyptus urophylla* e *Pinus oocarpa* termorretificadas. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 1, p. 1-8, abr. 2017.
- CZAJKOWSKI, Ł.; OLEK, W.; WERES, J. Effects of heat treatment on thermal properties of european beech wood. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 78, p. 425–431, 2020.
- ESTEVES, B. *et al.* Termite resistance, chemical and mechanical characterization of *Paulownia tomentosa* wood before and after heat treatment. **Forests**, v. 12, 1114, 2021.
- FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood chemistry, ultra structure, reactions**. Berlim: Walter de Gruyter Publisher, 1984.
- FERREIRA, M. D. *et al.* Propriedades físicas e mecânicas da madeira de Angelim-pedra submetida a tratamento térmico. **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração**, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 3-7, jan./mar. 2019.
- FIGUEROA, M. J. M.; MORAES, P. D. de. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 157–174, out./dez. 2009.
- FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook**: wood as an engineering material. General Technical Report FOREST PRODUCTS LABORATORY-GTR-282. Madison, 2021.
- FREITAS, A. S.; GONÇALEZ, J. C.; DEL MENEZZI, C. H. Tratamento termomecânico e seus efeitos nas propriedades da *Simarouba amara* (Aubl.). **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 4, p. 565-572, 2016.
- HILL, C. **Wood modification**: chemical, thermal and other processes. West Sussex: John Wiley & Sons, 2006.
- HILL, C.; ALTGEN, M.; RAUTKARI, L. Thermal modification of wood: a review chemical changes and hygroscopicity. **Journal of Materials Science**, v. 56, n. 11, p. 6581-6614, jan. 2021.
- HULLER, L. A. S. *et al.* Modificação térmica e propriedades tecnológicas da madeira de *Eucalyptus cloeziana*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 37, n. 90, p. 183-188, abr./jun. 2017.

- LAUDARES, F. A. L. *et al.* Avaliação das propriedades acústicas de mogno africano (*Khaya ivorensis*) submetido a tratamento térmico em estufa e autoclave. **Revista Matéria**, v. 28, n. 1, 2023.
- LIMA, A. C. B. de. **Efeito da modificação térmica nas propriedades da madeira de mogno Africano (*Khaya ivorensis* A. Chev.)**. Jerônimo Monteiro, 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2019.
- LUNAWOOD. **Lunawood thermowood**. Disponível em: <https://lunawood.com/thermowood/benefits/>. Acesso em: 22 fev. 2024.
- MENEZES, W. M. *et al.* Modificação térmica nas propriedades físicas da madeira. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 6, p. 1019-1024, jun. 2014.
- MODES, K. S. **Efeito da retificação térmica nas propriedades físico-mecânicas e biológica das madeiras de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis***. Santa Maria, 2010. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.
- MODES, K. S. *et al.* Efeito da termoretificação nas propriedades mecânicas das madeiras de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 1, p. 291-302, mar. 2017.
- OLIVEIRA, J. T. S.; TOMAZELLO FILHO, M.; FIEDLER, N. C. Avaliação da retratibilidade da madeira de sete espécies de eucalyptus. **Revista Árvore**, v. 34, n. 5, p. 929-936, out. 2010.
- ÖZGENÇ, Ö. *et al.* Determination of chemical changes in heat-treated wood using ATR-FTIR and FT Raman spectrometry. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 171, p. 395–400, 2017.
- PONCSÁK, S. *et al.* Effect of high temperature treatment on the mechanical properties of birch (*Betula papyrifera*). **Wood Science and Technology**, v. 40, n. 8, p. 647-663, may 2006.
- RAJKOVIC, V. J.; MIKLEČIĆ, J.P. Enhancing weathering resistance of wood: a review. **Polymers**, v. 13, n. 12, p. 1-27, 2021.
- SALMEN, L. **Temperature and water induced softening behaviour of wood fiber based material**. Estocolmo, 1982. 150 f. Tese (Doutorado em tecnologia) – Department of Paper Technology, The Royal Institute of Technology, Estocolmo, 1982.
- SANTOS, V. B. dos; SILVA, G. C. Efeito da modificação térmica nas propriedades físicas da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barrett & Golfari. **Caderno de Ciências Agrárias**, v. 13, p. 1–7, 2021.
- SCHNIEWIND, A. P. **Concise encyclopedia of wood and wood-based materials**. Nova York: Pergamon Press, 1985.
- SEGUNDINHO, P. G. de A. *et al.* Comparação entre propriedades físicas e mecânicas de madeiras e madeira laminada colada de *Corymbia citriodora*. **Scientia Forestalis**, v. 47, n. 123, p. 421-429, set. 2019.
- SHI, J. L.; KOCAEFE, D.; ZHANG, J. Mechanical behaviour of Québec wood species heat-treated using ThermoWood process. **Holz Als Roh- Und Werkstoff**, v. 65, n. 4, p. 255-259, mar. 2007.
- SILVA, D. O. *et al.* Reduced knee flexion is a possible cause of increased loading rates in individuals with patellofemoral pain. **Clinical Biomechanics**, v. 30, n. 9, p. 971-975, nov. 2015.
- SILVA, M. R. *et al.* Chemical and mechanical properties changes in *Corymbia citriodora* wood submitted to heat treatment. **International Journal of Materials Engineering**, v. 5, n. 4, p. 98-104, ago. 2015.
- SIVONEN, H. *et al.* Magnetic resonance studies of thermally modified wood. **Holzforschung**, v. 56, n. 6, p. 648-654, nov. 2002.
- UNSAL, O.; AYRILINS, N. Variations in compression strength and surface roughness of heat-treated turkish river red gum (*Eucalyptus Camaldulensis*) wood. **Journal of Wood Science**, v. 51, p. 405–409, 2005.
- WU, Z. *et al.* Effects of heat treatment on interfacial properties of Pinus Massoniana wood. **Coatings**, v. 11, p. 543–555, may 2021.

Fagner Pinheiro da Conceição

Conceitualização, Análise de dados, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição.

Secretaria Municipal de Meio Ambiente | Prefeitura Municipal de Saquarema | Rua Segisfredo de Oliveira Bravo, 86, Centro | Saquarema - RJ - Brasil | CEP 28990-776 | Tel.: (22) 998492606 | E-mail: fagnerflorestal@live.com

Alexandre Miguel do Nascimento

Conceitualização, Metodologia, Análise de dados, Supervisão, Redação - revisão e edição.

Departamento de Produtos Florestais, Instituto de Florestas | Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro | Rodovia BR 465, KM 7 - Campus Seropédica | Seropédica - RJ - Brasil | CEP 23897-000 | Tel.: (21) 26814982 | E-mail: alexmnasci@gmail.com

Rosilei Aparecida Garcia

Conceitualização, Metodologia, Análise de dados, Supervisão, Redação - revisão e edição.

Renewable Materials Research Centre | Faculty of Forestry, Geography, and Geomatics | Université Laval | Québec - QC - Canada | G1V 0A6 | Tel.: +1 (418) 656-2131 extension 417970 | E-mail: rosilei.aparecida-garcia@sbf.ulaval.ca

Natália Dias de Souza

Conceitualização, Metodologia, Análise de dados.

Departamento de Produtos Florestais | Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro | Tel.: (21) 37873768 | E-mail: natdias@hotmail.com

Renata Nunes Oliveira

Conceitualização, Metodologia, Análise de dados.

Departamento de Engenharia Química, Instituto de Tecnologia | Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro | BR 465 Km 7 | Seropédica - RJ - Brasil | CEP 23897-000 | Tel.: (21) 99814-0784 | E-mail: nunes@ufrj.br

Francisco Antonio Lopes Laudares

Conceitualização, Metodologia, Pesquisa.

Departamento de Física | Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro | Rodovia BR 465, KM 7 - Campus Seropédica | Seropédica - RJ - Brasil | CEP 23897-000 | Tel.: (21) 26814952 | E-mail: laudares@ufrj.br

Editores: **Marcelo Henrique Farias de Medeiros e Julio Cesar Molina**

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.