

Efeito da modificação térmica na dureza Janka das madeiras de *Pinus caribaea* var. *caribaea*, *Khaya ivorensis* e *Corymbia citriodora*

Rogério Rodrigues dos Santos¹; Alexandre Miguel do Nascimento¹; Jaqueline Rocha de Medeiros¹; Caroline da Silva Santos¹; Gabriel Iuri Candido Leandro¹

¹Instituto de Florestas/Departamento de Produtos Florestais (DPF), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), Seropédica/RJ, Brasil – contato.rogeriosantos@outlook.com

Resumo: Pode-se utilizar a modificação térmica para melhorar algumas propriedades da madeira somente com o uso de calor. Com isto, o objetivo deste trabalho foi verificar os efeitos da modificação térmica na dureza Janka nas espécies *Pinus caribaea* var. *caribaea*, *Khaya ivorensis* e *Corymbia citriodora*. Para tanto, o material foi processado nas temperaturas de 160 °C, 180 °C e 200 °C por 120 minutos, analisando-se também o controle. Os resultados obtidos foram de aumentos significativos apenas para os tratamentos à 160° para as espécies *K. ivorensis* e *P. caribaea* var. *caribaea*. Rachadura ocorridas durante o aquecimento tornaram os resultados obtidos para *C. citriodora* inconclusivos. Concluiu-se que tratamentos à 160 °C aumentam a dureza Janka em detrimento de tratamentos às temperaturas mais elevadas (180 °C e 200 °C). Para *C. citriodora* o fissuramento das amostras reduziu a dureza.

Palavras-chave: propriedades mecânicas, mogno africano, eucalipto, reflorestamento.

Effect of thermal modification on the janka hardness of *Pinus caribaea* var. *caribaea*, *Khaya ivorensis* and *Corymbia citriodora*

Abstract: Thermal modification can be used to improve some properties of wood only with the use of heat. Therefore, the objective of this work was to verify the effects of thermal modification on Janka hardness in the species *Pinus caribaea* var. *caribaea*, *Khaya ivorensis* and *Corymbia citriodora*. To this end, the material was processed at temperatures of 160 °C, 180 °C and 200 °C, also analyzing the control. The results obtained were significant increases only for treatments at 160° for the species *K. ivorensis* and *P. caribaea* var. *caribaea*. Cracking that occurred during heating made the results obtained for *C. citriodora* inconclusive. It was concluded that mild treatments (160 °C) are favorable to mechanical gains to the detriment of treatments at high temperatures (180 °C and 200 °C). For *C. citriodora*, the cracking of the samples reduced the hardness.

Keywords: mechanical properties, African mahogany, eucalyptus, reforestation.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um importante país produtor de madeiras tropicais, no entanto o mercado se limita a explorar uma pequena variedade de espécies comercialmente. O

desenvolvimento de tecnologias que possam agregar características desejáveis às espécies não usuais pode elevar o potencial de uso de espécies pouco exploradas na indústria (DOS SANTOS *et al*, 2014).

Os processos de modificação da madeira têm evoluído muito nos últimos anos e, de acordo com Sandberg *et al* (2021), em termos mercadológicos, os processos de modificação térmica tem crescido substancialmente nos últimos anos.

O processo consiste na decomposição térmica parcial dos principais constituintes químicos da madeira: celulose, hemiceluloses e lignina, geralmente na ausência de oxigênio ou na deficiência de ar. Desse modo, a madeira exposta a elevadas temperaturas passa por transformações físicas e químicas que estão diretamente relacionadas a mudanças dos principais constituintes químicos da madeira, que se decompõem em diferentes formas. No intervalo de temperaturas mais frequente de tratamentos térmicos, 160 °C e 260 °C, uma série de reações químicas complexas provocam modificações nas propriedades da madeira, especialmente na relação água-madeira. Em virtude da degradação de componentes higroscópicos, como hemicelulose e celulose, há um aumento da proporção maior de celulose cristalina em comparação com a madeira não modificada, e suas propriedades sofrem menos com o efeito da umidificação (NÉMETH *et al*, 2020).

De acordo com Batista (2019), a modificação térmica é o processo que utiliza elevadas temperaturas (140 °C – 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 irão resultar em melhoria de algumas propriedades (cor, estabilidade dimensional e resistência à biodeterioração).

A dureza Janka é a métrica internacional para determinação da resistência da madeira à penetração, ao risco e à deformação permanente quando é pressionada por outros materiais (TAVARES *et al*, 2024). Essa propriedade tem correlação direta com a densidade da madeira (LIMA ARAUJO *et al*, 2023) e alterações da densidade provocadas por modificações térmicas sugerem influência em propriedades mecânicas da madeira.

Segundo Modes *et al*. (2017), mesmo que o menor conteúdo de umidade de equilíbrio possa gerar um efeito positivo nas propriedades mecânicas da madeira

modificada termicamente, esse efeito é muitas vezes superado pela degradação dos componentes químicos.

Diante o exposto, o objetivo deste trabalho foi verificar o efeito da modificação térmica na dureza Janka da madeira de *Corymbia citriodora*, *Pinus caribaea* var. *caribaea* e *Khaya ivorensis*

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Coleta e preparo do material

O material utilizado neste trabalho foi proveniente de nove árvores, três de cada espécie. Os indivíduos de *Pinus caribaea* var. *caribaea* e de *Corymbia citriodora* foram obtidos de plantios no campus da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), localizados no município de Seropédica-RJ, e a idade aproximada era de, respectivamente, 25 anos e 60 anos. O material de *Khaya ivorensis* foi obtido de indivíduos com aproximadamente 33 anos, plantados de forma isolada no campus da UFRRJ e na Embrapa Agroecologia, em Seropédica - RJ.

Os corpos de prova, radiais e tangenciais (Figura 1), foram confeccionados de pranchas radiais, e produzido ripas de 25 x 55 x 350 mm (espessura x largura x comprimento), que foram tratados nas temperaturas de . O experimento consistiu em tratamento nas temperaturas de 160 °C, 180 °C ou 200 °C, mais o controle, divididos em dois grupos quanto ao corte da seção transversal (radial e tangencial).

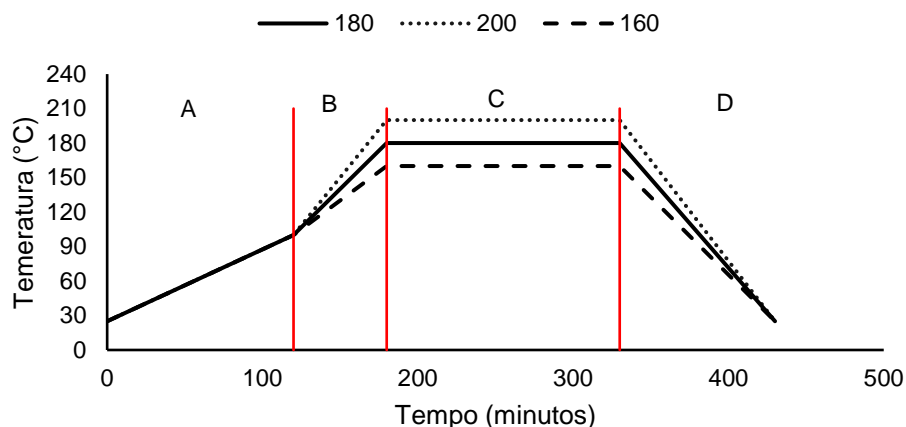
Figura 1: Seção transversal dos corpos de prova para a identificação dos cortes: tangencial à esquerda e radial à direita.



2.2 Modificação térmica

A modificação térmica foi realizada em escala laboratorial, em uma mufla elétrica, da marca Linn Elektro Therm, equipada com um sistema de controle de temperatura. Os tempos e temperaturas são apresentados na figura 2.

Figura 1: Processo de tratamento térmico dividido em etapas



Em que: A, Aquecimento do material da temperatura ambiente até 100 °C durante 120 minutos; B, aumento da temperatura de 100 °C até a temperatura alvo (160 °C, 180 °C ou 200 °C) durante 60 min; C, permanência na temperatura alvo por 150 minutos; e D, resfriamento do material.

Após o processo, as ripas foram climatizadas a 20 °C e 65% UR até atingirem a umidade de equilíbrio. As ripas foram divididas em amostras com comprimento de 50 mm, gerando 6 amostras por ripa.

2.3 Determinação da dureza Janka

A dureza Janka foi determinada de acordo com a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2022), na qual uma esfera de aço penetra na madeira causando uma deformação de 1 cm², com célula de carga de 2000 kgf. A carga foi aplicada na direção dos raios (madeira tangencial) e perpendicular aos raios (madeira radial).

2.4 Análise estatística

As análises estatísticas foram realizadas com o *software* Statistica 14, em nível de 95% de confiança para todos os testes. 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.

Os testes não-paramétricos foram: Kruskal-Wallis, ou de Mann-Whitney; teste de Dunn, para comparação múltipla entre as medianas dos postos. Também foram realizadas análises de correlação de Pearson.

A madeira de *Pinus caribaea* e *Khaya ivorensis* atenderam os pressupostos da análise paramétrica e a madeira de *C. citriodora*, não. Para madeira de citriodora foi aplicado o teste de Kruskal Wallis, e nas demais ANOVA.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Madeiras de pinus e mogno tratadas à 160°C mostraram maiores valores de dureza e as demais, inclusive o controle (NT), no caso do pinus, apresentaram valores equivalente de dureza, apesar da diminuição da densidade aparente nas temperaturas de 180°C e 200°C. Madeira de mogno teve sua dureza reduzida quando tratadas nas temperaturas acima de 160°C.

A madeira NT de *C. citriodora* possui maior valor de dureza e intensa redução quando tratada acima de 160°C, apesar de terem densidades equivalentes, pois a madeira apresentou intensas rachaduras após tratadas com calor, com surgimento de rachaduras de topo nas células de raios (Figura 2).

Modes *et al.* (2017) notaram redução na massa específica com o aumento da temperatura de tratamento em madeira de pinus e eucalipto e observou aumento significativo da dureza para o tratamento a 160 °C. Do mesmo modo ocorre neste trabalho, para as madeiras *P. caribaea* var. *caribaea* e *K. ivorensis*

Figura 12: Corpos de prova de *Corymbia citriodora* modificados termicamente a 160°C antes (esquerda) e após (direita) modificação térmica.



Tabela 1: Médias de dureza Janka (kgf.cm⁻²) para as espécies de *P. caribaea* var. *caribaea*, *K. ivorensis* e *C. citriodora* submetidos a diferentes temperaturas de modificação térmica nas direções radial e tangencial

| <i>P. caribaea</i> var. <i>caribaea</i> | Média |
|---|-------|
|---|-------|



| Tratamentos | Da | Dureza - kgf.cm ⁻² | | | | |
|----------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------|--------------------|--------|---------------------------|
| | | Radial | | Tangencial | | |
| NT | 0,748 ^a [34,8] | 390 | -49,6 | 326 | -56,8 | 358 ^b (101,1) |
| 160 | 0,727 ^{ab} [29,8] -3 | 502 | -48,5 | 356 | -62,2 | 429 ^a (111,3) |
| 180 | 0,647 ^b [18,2] -14 | 368 | -27,8 | 283 | -47,1 | 326 ^b (77,8) |
| 200 | 0,634 ^b [15,3] -15 | 416 | -49,1 | 289 | -40,7 | 353 ^b (79,1) |
| média | | 419 | A | 313 | B | 366 |
| <i>K. ivorensis</i> | | | | | | |
| NT | 0,748 ^a [34,8] | 675 ^{aA} | -44 | 495 ^{abB} | -43,5 | 585 ^b (101,37) |
| 160 | 0,727 ^{ab} [29,8] -3 | 747 ^{aA} | -97 | 583 ^{aB} | -68,6 | 665 ^a (126,43) |
| 180 | 0,647 ^b [18,2] -14 | 403 ^{bB} | -75 | 571 ^{aB} | -52,5 | 487 ^c (135,30) |
| 200 | 0,634 ^b [15,3] -15 | 456 ^{bB} | -96,1 | 450 ^{bB} | -64 | 453 ^c (77,93) |
| média | | 570 | | 525 | | 547 |
| <i>C. citriodora</i> | | | | | | |
| NT | 1,046 ^a [38,6] | 919 ^{aA} | [19,5] | 934 ^{aA} | [20,5] | 927 |
| 160 | 1,028 ^a [31,7] -2 | 396 ^{bA} | [14,5] | 335 ^{bA} | [9,8] | 365 |
| 180 | 0,967 ^b [12,8] -8 | 180 ^{bB} | [4,5] | 335 ^{bA} | [9,7] | 257 |
| 200 | 0,981 ^b [15,0] -6 | 248 ^{bB} | [8,5] | 297 ^{bB} | [7,7] | 273 |
| média | | 436 | | 475 | | 455 |

Valores entre colchetes são as médias dos postos obtidos pelo teste de Kruskal-Wallis. Letras minúsculas distintas, numa mesma coluna, mostram diferenças estatísticas pelo teste de Dunn, ao nível de 5% e letras maiúsculas entre amostras radiais e tangenciais. No caso de *C. citriodora*, diferenças entre letras maiúsculas revelam diferenças obtidas pelo teste de Mann-Whitney. Números sobre escritos são os desvios padrão.

A correlações entre densidade e dureza da madeira estão na Tabela 2. Correlações positivas e significativas foram encontradas para a madeira de *Pinus caribaea* e *K. ivorensis*. Madeira de *C. citriodora* apresentou os menores coeficientes de correlação e nenhum deles foi significativo. Para madeira de *K. ivorensis* os maiores coeficientes de correlação foram observados na madeira natural e modificada a 180°C e na madeira de *Pinus caribaea*, ocorreu quando tratado a 160°C. Quando considerado a direção do ensaio, a madeira de *K. ivorensis* apresentou, na direção radial, maior índice do que a outra direção.

Tabela 2: Valores dos coeficientes de correlação entre a **dureza Janka** (kgf.cm⁻²) e a **densidade aparente** para as espécies de *P. caribaea* var. *caribaea*, *K. ivorensis* e *C. citriodora* submetidos a diferentes temperaturas de modificação térmica e em diferentes direções de carregamento

| Tratamentos | Coeficientes de correlações de Pearson | | | |
|-------------|--|---------------------|----------------------|-------------------|
| | <i>Pinus Caribaea</i> | <i>K. ivorensis</i> | <i>C. citriodora</i> | Todas as madeiras |

| | | | | |
|--------------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|-------------------|
| NT | 0,84 | 0,94 | <u>0,56</u> | 0,98 |
| 160°C | 0,90 | 0,76 | <u>0,34</u> | <u>-0,11</u> |
| 180°C | 0,69 | 0,95 | <u>0,57</u> | <u>-0,21</u> |
| 200°C | 0,79 | 0,68 | <u>0,41</u> | <u>-0,37</u> |
| Todos | 0,78 | 0,85 | 0,69 | <u>0,29</u> |
| Direção do ensaio | Madeiras | | | |
| | <i>Pinus Caribaea</i> | <i>K. ivorensis</i> | <i>C. citriodora</i> | Todas as madeiras |
| Radial | 0,70 | 0,90 | 0,68 | <u>0,23</u> |
| Tangencial | 0,68 | 0,77 | 0,72 | 0,34 |

Obs. Valores sublinhados não são significativos ao nível de 5% de significância e valores em negrito maior igual a 0,90

4. CONCLUSÃO

Conclui-se que a dureza Janka aumentou quando madeira de Pinus é tratada a 160 °C, e acima deste valor não teve redução da sua dureza natural. No caso do mogno africano, a dureza aumentou na temperatura de 160°C e decrescendo em seguida com o aumento da temperatura de tratamento. A madeira de citriodora, devido a presença de rachaduras, teve seu comportamento afetado pela fissuração da madeira apresentando resultados de dureza muito baixo.

5. REFERÊNCIAS

LIMA ARAÚJO, S. L.; MELO, A. B.; OLIVEIRA, L. J.; SILVA, J. G. M.; ALMEIDA, M. N. F.; SILVA, P. H. M.; VIDAURRE, G. B.; GODINHO, T. F. Cor, grã e propriedades físico-mecânicas da madeira de Corymbia e Eucalyptus não tradicionais. **Scientia Forestalis**. v. 51, e4029, 2023. <https://doi.org/10.18671/scifor.v51.28>

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 2022.

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, 4 abr. 2019. Universidade Federal de Santa Maria. <http://dx.doi.org/10.5902/1980509822577>.

SANTOS, D.V.B.; MOURA, L.F.; BRITO, J.O. Effect of heat treatment on color, weight loss, specific gravity, and equilibrium moisture content of two low market valued tropical woods. **Wood Research** v. 59, n. 2, p. 253-264, 2014.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Relatório Anual de 2020. Brasília: Studio 113, 2020. 122 p. Disponível em:

<<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf>>. Acesso em: 14 dez. 2020.

MODES, K. S.; SANTINI, E. J.; VIVIAN, M. A.; HASELEIN, C. R. Efeito da termorreificação nas propriedades mecânicas das madeiras de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**. v. 27, n. 1, p. 291-302, 31 mar. 2017. Universidade Federal de Santa Maria. <http://dx.doi.org/10.5902/1980509826467>.

NÉMETH, Róbert; HORVATH, Norbert; FODOR, Fanni; BÁDER, Mátyás; BAK, Miklós. Wood Modification for Under-Utilised Hardwood Species. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 505, p. 012017, 18 jul. 2020. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/505/1/012017>.

SANDBERG, D., KUTNAR, A., KARLSSON, O., & JONES, D. (2021). **Wood Modification Technologies: Principles, Sustainability, and the Need for Innovation** (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781351028226>

TAVARES, S. F.; SOUZA, B. A. C.; CHILETTO, T. D. O.; INO, A. Propriedades físicas e mecânicas da madeira. In: Ino, A.; SHIMBO, L. **Projetar e construir com madeira**. São Paulo, 2024. p. 71-100