

Propriedades tecnológicas da madeira de Mogno africano (*Khaya ivorensis*) sob efeito de tratamento térmico

Jaqueline Rocha de Medeiros¹; Caterina Carvalhal Buratta¹; Alexandre Miguel do Nascimento¹; Rogerio Rodrigues dos Santos¹; Caroline da Silva Santos¹; Gabriel Iuri Candido Leandro¹

¹ Departamento de Produtos Florestais (DPF), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), Seropédica, RJ, Brasil – jaquelinerocha256@gmail.com

Resumo: O presente trabalho teve como objetivo avaliar propriedades físico-mecânicas da madeira de *Khaya ivorensis* cortadas no plano transversal radial e transversal tangencial, sob efeito ou não, do tratamento térmico (modificação térmica) nas temperaturas de 160, 180 e 200°C. As amostras apresentaram valores de densidade e teor de umidade reduzidos após modificação térmica, sendo que a umidade de equilíbrio reduziu gradativamente com o aumento da temperatura de tratamento. O módulo de elasticidade relativo foi maior nas amostras não tratadas e cortadas tangencialmente. Após tratamento térmico, observou-se aumento do valor do módulo das amostras tratadas à 200°C. O processo de modificação térmica melhora as propriedades acústicas da madeira, permitindo a diversificação de uso da mesma.

Palavras-chave: Densidade, Propriedades mecânicas, Teor de umidade de equilíbrio.

Technological properties of wood African mahogany (*Khaya ivorensis*) under heat treatment

Abstract: The present work aimed to evaluate the physical-mechanical properties of *Khaya ivorensis* wood cut in the radial transverse and tangential transverse planes, under the effect or not, of heat treatment (thermal modification) at temperatures of 160, 180 and 200°C. The samples showed reduced density and moisture content values after thermal modification, and the equilibrium moisture content gradually reduced with increasing treatment temperature. The relative modulus of elasticity was higher in untreated and tangentially cut samples. After heat treatment, an increase in the modulus value of samples treated at 200°C was observed. The thermal modification process improves the acoustic properties of wood, allowing the diversification of its use.

Keywords: Mechanical properties, Equilibrium moisture content.

1. INTRODUÇÃO



Engenharia
Industrial
Madeireira



SOCIEDADE BRASILEIRA
DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DA MADEIRA

A madeira do mogno africano (*Khaya ivorensis*), é de boa qualidade, possui características tecnológicas satisfatórias, além de possuir alto valor comercial e boa

aceitação no mercado, principalmente europeu (FRANÇA et al., 2015). No mercado florestal, existem métodos capazes de alterar algumas propriedades da madeira e diversificar o seu uso.

Dentre esses métodos, pode-se citar o processo de modificação térmica que resulta na melhoria de propriedades mecânicas, na redução da higroscopicidade e na melhoria da estabilidade dimensional da madeira. Esse processo causa modificações químicas e físicas na madeira, as quais são ocasionadas pela degradação dos constituintes químicos da parede celular e alteram as suas propriedades físicas, mecânicas e acústicas (LAUDARES et al., 2023).

Dentre as propriedades tecnológicas da madeira, a densidade e o módulo de elasticidade são as características determinantes da qualidade acústica da madeira (MANIA e SKRODZKA, 2019). Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da modificação térmica nas propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Khaya ivorensis*.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 *Preparação das amostras*

Toretas de madeira de duas árvores de mogno africano (*Khaya ivorensis*), com aproximadamente 33 anos de idade, oriundas do campus da EMBRAPA Agrobiologia, Seropédica – RJ, foram utilizadas. Os toretas foram condicionados no Laboratório de Propriedades Físico-mecânicas da Madeira do Departamento de Produtos Florestais da UFRRJ para climatização em ambiente com umidade relativa média de 65% e temperatura média de 20°C. Posteriormente, foram desdobrados em amostras com 400 x 65 x 29 mm (comprimento x largura x espessura), respectivamente. As amostras foram cortadas nos planos radial e tangencial.

As amostras desdobradas permaneceram em ambiente climatizado nas mesmas condições anteriores. Após a climatização, as amostras foram pesadas e o teor de umidade foi determinado utilizando um aparelho medidor de umidade por contato. O procedimento foi realizado antes e após o processo de modificação térmica da madeira, de modo a verificar o efeito das diferentes temperaturas no teor de umidade e módulo de elasticidade na flexão.

2.2 *Modulo de elasticidade (MOE)*

Os ensaios de flexão estática foram realizados utilizando uma máquina universal de ensaios mecânicos (CONTENCO) com capacidade de 30 toneladas. A relação entre o vão de teste e a espessura/altura das amostras foi de 12,6 vezes. Quanto ao carregamento, a carga foi interrompida quando ocorreu deslocamento da linha neutra igual ao vão de ensaio (L) dividido por 200 (L/200). O modulo de elasticidade foi determinado de acordo com a equação abaixo:

Onde: variação da carga (kgf); = variação do deslocamento (cm); L = vão do ensaio (cm); b = espessura da amostra (cm); h = largura das amostras (cm).

2.3 *Modificação térmica*

A modificação térmica avaliou as temperaturas de 160°C, 180°C e 200°C, totalizando 12 amostras por temperatura, de modo que um dos lotes não foi submetido à nenhum tipo de tratamento (NT). Para este procedimento, foi utilizado um forno mufla elétrico da marca Linn Elektro Therm.

Os tratamentos de modificação térmica foram realizados em quatro etapas para cada temperatura, sendo estas: (1) as amostras foram aquecidas até a temperatura de 100°C em um período de 120 minutos; (2) a temperatura foi de 100 °C até a temperatura estabelecida para a modificação térmica em cada tratamento, sendo assim: 160°C, 180°C e 200°C com taxa constante de aquecimento de 2°C/minuto; (3) as amostras permaneceram na temperatura de modificação térmica por 90 minutos e (4) as amostras permaneceram por 120 minutos dentro da mufla até o resfriamento do material. Posteriormente, as amostras foram climatizadas nas condições descritas anteriormente e medidas para avaliação do efeito da modificação térmica.

2.4 *Análise estatística*

Utilizou-se o software Statsoft 14.0 para realizar as análises estatísticas, utilizando o intervalo de confiança de 95% em todos os testes. O teste de análise de variância foi aplicado para verificar o efeito das temperaturas e plano de corte nas

propriedades estudadas. O teste de normalidade e heterocedasticidade, por sua vez, foram aplicados e a densidade aparente e módulo de elasticidade tiveram dados normais e variâncias homogêneas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta os dados da variação do teor de umidade. Antes do tratamento, as amostras exibiram uma média de 13,2%, enquanto após a modificação térmica, esta apresentou valor menor igual a 9,9%. Com o aumento da temperatura houve diminuição do teor de umidade. Após o tratamento térmico, a madeira tende a diminuir sua higroscopicidade devido à degradação dos componentes hidrofílicos da parede celular (HILL; ALTGEN; RAUTIKARI, 2021).

Tabela 1. Valores médios do teor de umidade de equilíbrio da madeira de *Khaya ivorensis* antes e depois dos tratamentos de modificação térmica.

Temperatura de Tratamento	Modificação térmica				Variação- %
	Antes		Depois		
NT	12,9	1,79	-	-	-
160°C	13,2	2,79	10,0	1,65	-24,3
180°C	13,3	1,77	9,4	0,96	-29,2
200°C	13,5	1,50	7,2	0,82	-47,0
Média	13,2	1,96	9,9	1,30	-25,3

Em que: NT: madeira de referência.

A densidade antes da modificação térmica apresentou uma média geral entre os dois planos de 0,600 g/cm³. Carvalho et al. (2010) obtiveram resultados semelhantes para a madeira de mogno africano. Após os tratamentos térmicos, a densidade média foi de 0,592 g/cm³, ou seja, houve uma redução da densidade aparente, independente do plano de corte após tratamento térmico, corroborando com os resultados obtidos por Mania et al. (2020).

Durante o processo de modificação térmica, ocorre uma diminuição na densidade da madeira devido à volatilização dos componentes extraíveis da madeira e da degradação das hemiceluloses (MANIA et al., 2020). A densidade da madeira é uma propriedade fundamental que reflete a quantidade de material presente na parede celular em relação ao volume da madeira. É essencial para avaliar a qualidade da madeira e está relacionada a outras propriedades e ao uso

desse material.

Em relação ao plano de corte, observou-se uma densidade média maior no plano radial (0,659 g/cm³), quando comparada ao tangencial (0,541 g/cm³), ambos referentes às amostras não tratadas e a diferença entre os planos de corte se manteve mesmo após o tratamento térmico. No plano radial, utilizando a temperatura de 200°C, foi observado a maior variação entre as densidades antes e após o processo de modificação térmica. Para o plano tangencial, não foi observado diferença significativa entre as temperaturas de tratamento. Comparando a média da variação entre os dois planos, a variação no plano tangencial foi mais intensa que no plano radial. De acordo com Panshin e Zeeuw (1970), no corte radial temos a presença de lenho inicial e lenho tardio, que apresentam diferentes faixas de densidade, ocorrendo assim uma compensação entre as variações.

Tabela 2. Valores médios da densidade aparente (Da) da madeira de *Khaya ivorensis* em corte radial e tangencial, antes e depois dos tratamentos de modificação térmica.

Corte	Tratamento	Da antes (g.cm ⁻³)	Da depois (g.cm ⁻³)	Varição Da (%)
Radial	NT	0,648 ^{9,6} a	-	-
	160°C	0,660 ^{11,2} a	0,635 ^{9,6} a	0,70 ^{13,0} b
	180°C	0,659 ^{10,2} a	0,638 ^{10,4} a	0,69 ^{10,0} b
	200°C	0,668 ^{11,0} a	0,639 ^{10,6} a	2,42 ^{16,0} a
			0,659 ^{Aa}	0,637 ^{Aa}
Tangencial	NT	0,501 ^{6,2} b	-	-
	160°C	0,552 ^{11,6} b	0,547 ^{11,8} b	3,49 ^{10,0} a
	180°C	0,553 ^{11,8} b	0,548 ^{12,0} b	3,11 ^{9,2} a
	200°C	0,559 ^{12,4} b	0,545 ^{11,8} b	4,38 ^{16,0} a
			0,541 ^{Bb}	0,547 ^{Bb}

Valores sobrescritos são as médias dos postos feito pelo teste de Kruskal-Wallis e letras minúsculas distintas, mostram diferenças entre as médias dos postos, pelo teste de Dunn, ao nível de 5% de significância.

A média do módulo de elasticidade para a madeira de *Khaya ivorensis* não tratada foi de 9.158 Mpa. Valores semelhantes foram encontrados por França et al. (2015), sendo classificado pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis como módulo de elasticidade médio.

Entre os diferentes planos não houve diferença no módulo de elasticidade antes do processo de modificação térmica. Isso é importante porque qualquer

variação que ocorreu após o processo foi proveniente das mudanças ocorridas devido à ação do calor na madeira. Em ambos os planos, mesmo sem diferença estatística, a média após o processo de modificação térmica é numericamente maior do que antes do processo.

Para a temperatura de 200°C, tanto no plano radial quanto tangencial, houve diferença estatística. O processo de modificação térmica aumentou o módulo de elasticidade da madeira. Foi observado aumento da relação entre o módulo de elasticidade e a densidade da madeira (E.e/Da), essa razão é um indicador da qualidade acústica da madeira. Dessa forma o processo de modificação térmica é uma alternativa para diversificar a aplicabilidade da madeira de mogno africano para fins acústicos. Corroborando com essa pesquisa Wentzel; Brischke; Militz (2019) encontraram para a modificação térmica em sistema aberto, incremento no MOE até a temperatura de 200°C.

De acordo com Torniainen et al. (2021), uma justificativa para o aumento da rigidez da madeira modificada termicamente seria que devido à altas temperaturas, pois há um aumento na espessura da região cristalina da celulose, o que confere uma maior rigidez às forças de flexão. Porém, essas informações não estão consolidadas na literatura, apresentando divergências entre estudos.

Tabela 3. Valores médios dos módulos de elasticidade da madeira de *Khaya ivorensis* em corte radial e tangencial, antes e depois dos tratamentos de modificação térmica.

Corte	Tratamento	Antes		Depois	
		E.e	E.e/Da	E.e	Ee/Da
Tangencial	NT	8.924 ^a 1.288	17.829 ^a 2.497	-	-
	160°C	9.195 ^{aA} 1.241	16.789 ^{aA} 2.576	9.304 ^{aA} 922	17.057 ^{aA} 1.265
	180°C	9.745 ^{aA} 1.136	17.751 ^{aA} 2.438	9.684 ^{aA} 914	17.684 ^{aA} 1.857
	200°C	8.767 ^{aA} 1.090	15.787 ^{aA} 2.483	9.596 ^{aB} 1.149	17.614 ^{aB} 1.563
	Média	9.158	17.039	9.377	17.537
Radial	NT	9.126 ^a 909	14.517 ^a 2.556	-	-
	160°C	9.423 ^{aA} 1.245	14.679 ^{aA} 2.565	9.419 ^{aA} 1.132	15.205 ^{aA} 2.586
	180°C	9.421 ^{aA} 842	14.553 ^{aA} 2.141	9.355 ^{aA} 927	14.898 ^{aA} 2.065
	200°C	9.149 ^{aA} 1.251	14.192 ^{aA} 3.637	9.896 ^{aB} 838	15.978 ^{aB} 2.855
	Média	9.280	14.421	9.449	15.150

*Valores sobrescritos são os valores dos desvios-padrão. Letras minúsculas iguais não apresentam diferenças entre tratamentos pelo Teste Tuckey a 5% de significância. Letras maiúsculas iguais não apresentam diferença para o teste t dados pareados. E.e: Modulo de elasticidade da madeira. Da: Densidade aparente da madeira.

O Módulo relativo à densidade aparente da madeira, representado por E.e/Da, foi maior no plano de corte tangencial do que no radial. Este resultado já era esperado pois os valores de densidade aparente no plano radial eram maiores, reduzindo o módulo de elasticidade, uma vez que a relação entre estas duas variáveis é inversamente proporcional. Resultados como estes indicam como a densidade influencia no módulo de elasticidade.

4. CONCLUSÃO

O teor de umidade diminuiu consideravelmente após a modificação térmica e quanto maior a temperatura de tratamento, menor será o teor de umidade de equilíbrio, com redução de quase 50% da capacidade higroscópica. A variação da densidade aparente da madeira de mogno africano é mais intensa no corte tangencial e diferença entre a densidade antes e após tratamento, ocorrendo apenas quando tratada a 200°C no corte radial. Após a modificação térmica na temperatura de 200°C, o módulo de elasticidade aumentou significativamente. O processo de modificação térmica melhorou as propriedades acústicas da madeira, permitindo a diversificação de uso da mesma

5. REFERÊNCIAS

CARVALHO, A. M. DE; SILVA, B. T. B. DA; LATORRACA, J. V. DE F. Avaliação da usinagem e caracterização das propriedades físicas da madeira de mogno africano. **Cerne**, v. 16, n. suplemento, p. 106–114, 2010.

FRANÇA, T. S. F. A.; ARANTES, M. D. C.; PAES, J. B.; et al. Características anatômicas e propriedades físico-mecânicas das madeiras de duas espécies de mogno africano. **Cerne**, v. 21, n. 4, p. 633–640, 2015.

HILL, C.; ALTGEN, M.; RAUTKARI, L. Thermal modification of wood— A review: Chemical changes and hygroscopicity. **J. Mater. Sci.** v. 56, p. 6581–6614, 2021.

LAUDARES, F. A. L.; NASCIMENTO, A. M.; OLIVEIRA, R. N., et al. Avaliação das propriedades acústicas de mogno africano (*Khaya ivorensis*) submetido a tratamento térmico em estufa e autoclave. **Revista Materia**. v.28, 2023.

MANIA, P; MOLIŃSKI, W.; ROSZYK, E., GÓRSKA, M. Optimization of Spruce (*Picea abies* L.) Wood Thermal Treatment Temperature to Improve Its Acoustic

Properties. **BioRecursos**, v. 15, p. 505-516, 2020.

MANIA, P.; SKRODZKA, E. Modal parameters of resonant spruce wood (*Picea abies* L.) after thermal treatment. **Journal of King Saud University – Science**, 1152,1156. 2019.

PANSHIN, A. J.; ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1970. v. 1. 705 p

TORNIAINEN, P.; POPESCU, C. M.; JONES, D.; et al. Correlation of Studies between Colour, Structure and Mechanical Properties of Commercially Produced ThermoWood® Treated Norway Spruce and Scots Pine. **Forests**, 12, 1165, 2021.