

Tratamento térmico e ciclos de umidificação e secagem nas propriedades acústicas de *Simoura amara* e *Cordia goldiana*

Caroline da Silva Santos¹; Alexandre Miguel do Nascimento¹; Jaqueline Rocha Medeiros¹; Rogério Rodrigues dos Santos¹; Francisco Antônio Lopes Laudares¹; Gabriel Iuri Cândido Leandro¹

¹Instituto de Florestas (IF), Departamento de Produtos Florestais (DPF), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), Seropédica/RJ, Brasil

Resumo: Este trabalho objetivou mensurar o efeito de ciclos de umidificação e secagem nas espécies *Simoura amara* e *Cordia goldiana* Huber. vinte e quatro meses após as madeiras terem sido tratadas na temperatura de 150°C em estufa a vácuo, com pré-tratamentos de vaporização e lixiviação. As propriedades mecânicas foram determinadas pelo método de flexão estática e as propriedades acústicas por ensaio de vibração transversal com propagação de ondas sonoras, de acordo com a norma ASTM E1876/ 2022 antes e após os ciclos de umidificação e secagem. As propriedades analisadas não sofreram alterações significativas para ambas as madeiras, indicando que os tratamentos são irreversíveis e a madeira de freijó obteve ganhos acústicos e mecânicos e perceptíveis especialmente quando vaporizada e a de marupá obteve melhores resultados quando não vaporizada.

Palavras-chave: Modificação, produto florestal, análise de reversibilidade.

Thermal treatment and humidification and drying cycles in the acoustic properties of *Simoura amara* and *Cordia goldiana*

Abstract: This work aimed to measure the effect of humidification and drying cycles on the species *Simoura amara* and *Cordia goldiana* Huber. twenty-four months after the wood was treated at a temperature of 150°C in a vacuum oven, with vaporization and leaching pre-treatments. The mechanical properties were determined by the static bending method and the acoustic properties by a transverse vibration test with sound wave propagation, in accordance with ASTM E1876/2022 before and after the humidification and drying cycles. The analyzed properties did not undergo significant changes for both woods, indicating that the treatments are irreversible and freijó wood obtained acoustic and mechanical gains that were noticeable especially when vaporized and marupá wood obtained better results when not vaporized.

Keywords: Modification, forest product, reversibility analysis.

1. INTRODUÇÃO

O processo de modificação térmica reduz o teor de umidade equilíbrio da madeira, aumentam a frequência de ressonância, os módulos de elasticidade específicos, assim como a eficiência acústica (LAUDARES, 2022). Outros autores,



afirmam que na medida em que ocorre a redução do teor de umidade, há aumento na velocidade do som em madeiras de *Pinus sylvestris* (MONTERO et al., 2015), com diminuição da atenuação acústica (GÖKEN, 2021; ZATLOUKAL et al., 2021).

O processo de modificação térmica pode ser considerado um processo de envelhecimento acelerado, no qual trata-se de um método ecológico para modificação e melhoria das propriedades da madeira (KARAMI et al., 2020). Para entender o efeito desse processo, testes de reversibilidade são realizados com finalidade de complementar e entender melhor as modificações reversíveis e irreversíveis induzidas pelo tratamento térmico. Para tal, foi tido como base a metodologia adaptada proposta por Wentzel, Altgen, Militz; (2018), que após modificação térmica, a madeira foi climatizada em 20 °C e 65% UR (A), seca no vácuo à 20 °C e - 2,5 kPa (B) e imersas em água por 2 semanas (C) e por Karami et al. (2020), que submeteu as amostras a secagem em estufa, até massa anidra e posteriormente foram estabilizadas por 3 semanas em cinco condições: 1) adsorção em 20 °C e 65%; 2) adsorção em UR: 90%; 3) dessorção de 90% para 65%; 4) dessorção de 65% para 0% e 5) adsorção até 65%.

Em vista disso, este trabalho visa analisar a reversibilidade das características acústicas, físicas e mecânicas das madeiras de *Simoura amara* (marupá) e *Cordia goeldiana Huber* (freijó) .

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Preparação das amostras

Foram utilizadas amostras de marupá e freijó provenientes de tratamento térmico em estufa elétrica a vácuo a 150°C, e, que passaram por ciclos de vaporização e/ou lixiviação. A metodologia do processo de modificação térmica está descrita em Laudares (2022). Foram usados os dados obtidos pelos autores a dois anos atrás, e comparados com os dados obtidos nessa pesquisa, após o processo de umidificação das amostras. A fim de comparação, foram utilizados dados de propriedades físicas, mecânicas e acústicas.

2.2 Processo de umidificação

Após período de 24 meses, as amostras reservadas e devidamente ensacadas, foram novamente avaliadas para verificar se as propriedades mecânicas e acústicas alteraram com o passar do tempo. Posteriormente foram expostas a oscilação da umidade relativa ambiente iguais a UR=90% e UR=18%. Para tal, amostras foram

condicionadas em ambiente hermético nas umididades relativas citadas anteriormente na temperatura ambiente de 22°C, primeiramente umidificadas e posteriormente secas. Após o ciclo de umidificação e secagem, as amostras foram colocadas em ambiente com UR=65% e temperatura de 22°C até atingirem massa aproximada obtida imediatamente após serem retiradas dos sacos plásticos. Ensaios acústicos e mecânicos foram repetidos após o procedimento denominado umidificação.

2.3 Propriedades físicas

O teor de umidade e a densidade aparente foram obtidas sendo a densidade aparente a massa e o volume para um determinado teor de umidade e a umidade calculado na base seca.

2.4 Propriedades mecânicas

2.4.1 Ensaio acústico

As propriedades acústicas foram obtidas através do método de vibração por impulso e este foi aplicado através de um equipamento criado no Laboratório de Modificação Físico-Químico da Madeira da UFRRJ. Neste equipamento, as ondas sonoras são geradas após impactos, e que são capturadas através de microfone conectado a um PC e analisado por software *Fast Fourier Analyzer* (FFT Analyzer) da FAKOPP® Enterprise. E, mediante a isso, resulta-se a frequência natural ou de ressonância (f) e a atenuação acústica ou decremento acústico (DI) que são captados e utilizados para os cálculos posteriores. Foram feitas dez leituras de frequência e decremento logarítmico para cada amostra.

Os testes acústicos seguiram a norma ASTM E1876 (2022), onde se prediz o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico, conforme a equação 1.

$$E_{din} = 0,9464 \frac{\rho L^4 f_1^2}{h^2} \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo: ρ a densidade (kg.m^{-3}), L o comprimento do espécime, f_1 retrata a frequência natural do n-ésimo harmônico (Hz) e h representa a espessura.

Através do decremento logarítmico que foi fornecido pelo software FAKOPPE, foi obtido também a eficiência da conversão acústica das amostras através da equação 2 (Laudares, 2022).

$$ECA = \pi \sqrt{\frac{E_{din}}{\rho^3}} \quad (\text{Equação 2})$$

Sendo: ECA a eficiência da conversão acústica, E_{din} o módulo de elasticidade dinâmico, ρ a densidade aparente, e DL o decremento logarítmico ou atrito interno.

2.4.2 Ensaio mecânico

Para a análise mecânica foi realizado o método de flexão estática e para esse método foi utilizado máquina universal Contenco UMC 300 com capacidade de 30T usando célula de carga de 20 kgf, aplicando força no centro do vão dos apoios com velocidade de carregamento de 2,5 mm/min e, adaptado da norma ABNT-NBR 7190/2022. Nível de carregamento não ultrapassou o limite de proporcionalidade das espécies. Os valores de módulo de elasticidade de cada amostra foram calculados segundo a Equação 3.

$$E = \frac{\Delta F \times L^3}{\Delta v \times 4bh^3} \quad (\text{Equação 3})$$

Em que: ΔF representa a variação das cargas correspondentes a 10% e 50% da carga máxima estimada, L é o vão livre entre apoios (mm), Δv representa a variação do deslocamento no meio do vão (flechas) correspondentes a 10% e 50% da carga máxima (mm), b é a largura da seção transversal central da amostra (mm) e h representa a espessura da seção transversal central da amostra (mm).

2.5 Análise dos dados

Com os dados obtidos foram feitas as análises de normalidade por Kolmogorov-Smirnov e heterocedasticidade pelo método de Hartley. Após, foi aplicado análise de variância fatorial com fatores principais, para verificar o efeito do processo de vaporização, lixiviação e umidificação-secagem, nas propriedades físicas, mecânicas e acústicas. Após verificação do efeito dos fatores principais, apenas os dados pós umidificação-secagem foram selecionados e analisados comparando-se o controle com os tratamentos em estufa que foram vaporizados, lixiviados e suas combinações. Tais análises foram realizadas utilizando o programa Statistic 7.0.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Das variáveis estudadas, todas apresentaram distribuição normal e variâncias homogêneas.



Na Tabela 1, observa-se as análises de variâncias e as variáveis de interesse, e que a vaporização afeta todas as propriedades estudadas da madeira de freijó, com exceção da densidade aparente (Da), decaimento logarítmico (DI) e eficiência de conversão acústica (ECA), e as exceções para madeira de marupá são DI e ECA. A lixiviação afeta apenas a frequência de ressonância na madeira de freijó e na madeira de marupá, não influencia Fr nem velocidade do som (Vsom) e ECA.

O processo de umidificação-secagem não alterou nenhuma das propriedades indicando que o processo de tratamento das madeira geraram alterações permanentes no material. Estes resultados corroboram com Karami et al. (2020), onde os autores averiguaram que após ciclo de umedecimento de madeira modificada termicamente as propriedades vibracionais permaneceram irreversíveis.

Tabela 1. Análise de variância testando os fatores vaporização, lixiviação e umidificação e suas interações, para madeira de freijó e marupá

Efeito	Madeira de Freijó															
	Fr		Da		E.e		Edin		Vsom		DI		ECA			
	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p
Vapor	27,38	0,00	1,20	0,28	21,89	0,00	17,62	0,00	29,70	0,00	0,48	0,49	0,54	0,47		
Lixiviação	5,37	0,03	0,80	0,38	0,12	0,73	0,23	0,63	3,01	0,09	2,62	0,11	0,09	0,77		
Umidificação	0,95	0,34	0,49	0,49	0,63	0,43	0,07	0,80	1,64	0,21	0,52	0,48	0,10	0,75		

Efeito	Madeira de Marupá															
	Fr		Da		E.e		Edin		Vsom		DI		ECA			
	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p
Vapor	39,82	0,00	4,66	0,04	21,65	0,00	20,08	0,00	13,19	0,00	0,12	0,74	2,09	0,16		
Lixiviação	2,71	0,11	10,23	0,00	6,84	0,01	5,11	0,03	1,06	0,31	13,20	0,00	3,27	0,08		
Umidificação	0,01	0,92	0,97	0,33	0,75	0,39	0,54	0,47	0,10	0,76	0,46	0,50	0,30	0,59		

Em que: Fr é a frequência natural de ressonância, Da é a densidade aparente, E.e é o módulo estático, Edin é o módulo dinâmico transversal, Vsom é a velocidade do som, DI é o decaimento logarítmico e ECA é a eficiência de conversão acústica.

3.1 Propriedades físicas e mecânicas

Na tabela 2 são apresentados os resultados referentes às propriedades físicas e mecânicas das madeiras apenas e após o processo de umidificação e secagem. Para madeira de freijó, os módulos de elasticidades foram aumentados pelo processo de vaporização enquanto a não vaporização apresentou os melhores resultados na madeira de marupá. Na madeira de marupá, a densidade aparente foi afetada e reduzida pelo processo de lixiviação e vaporização,

**Tabela 2.** Resultados das propriedades físicas e mecânicas da madeira de freijó e marupá, após tratamento com vapor e lixiviação e testadas posteriormente por umidificação e secagem.

Madeira de Freijó									
vaporizada	lixiviada	Tu	Da		E		Edin		
Controle		14,9	0,480	0,018	a	123.426	10.881	a	125.084
não	não	5,8	0,506	0,047	a	130.395	12.663	a	133.792
não	sim	6,4	0,515	0,047	a	136.397	7.886	a	138.837
sim	não	5,8	0,519	0,045	a	155.263	15.960	b	160.747
sim	sim	6,3	0,535	0,042	a	153.139	8.260	b	152.199
Madeira de Marupá									
vaporizada	lixiviada		Da		E		Edin		
Controle		15,3	0,443	0,011	a	99.583	6.531	a	106.450
não	não	8,4	0,435	0,015	ba	109.620	7.890	a	114.173
não	sim	8,4	0,411	0,019	bc	103.684	4.342	a	107.351
sim	não	7,6	0,418	0,012	bc	97.153	3.857	ab	99.242
sim	sim	8,3	0,402	0,020	c	86.322	6.558	b	89.560

Em que: médias seguidas por letras minúsculas distintas, indicam diferença estatística feito pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância. Valores sobrescritos são os desvios padrões.

3.2 Propriedades acústicas

Na tabela 3 estão apresentados os resultados das propriedades acústicas. Nota-se que entre o material controle e os tratados obtiveram-se resultados distintos. Para freijó, quanto à frequência a madeira vaporizada e não lixiviada apresentou aumento de 240 para 273 Hz (aumento de 13,8%) e o mesmo pode ser observado para a velocidade do som (aumento de 8,9%), e apesar da redução dos valores de DI e aumento de ECA, as variações não foram detectadas como significativas. Para Marupá a madeira não vaporizada gerou os melhores resultados para Fr e Vsom sendo o efeito em DI pouco evidente e não observado na ECA. O comportamento acústico está associado às modificações da estrutura da parede celular, por exemplo da degradação da hemicelulose, dos grupos hidroxílicos (-OH) livres na região amorfa da celulose, extractivos e a reticulação da lignina (BUCUR, 2006; HILL et al., 2021). No tratamento com autoclave e a vácuo, ocorre perda de extractivos voláteis e degradação de hemicelulose durante o processo de vaporização, pois são despolimerizados por aquecimento em condições úmidas (ENDO et al., 2016; ZENIYA et al., 2018).

Tabela 3. Resultados das propriedades acústicas da madeira de freijó e marupá após tratamento com vapor e lixiviação e testadas posteriormente por umidificação e secagem.

Madeira de Freijó									
Vaporizada	Lixiviada	Fr	Vsom		DI		ECA		
Controle		240	3,40	a	5.104	99,9	a	21	1,98



não	não	255	5,34	b	5.143	72,6	ab	15	2,13	b	2.147	378,1	b
não	sim	256	8,04	b	5.198	176,2	ab	15	1,31	b	2.226	377,0	b
sim	não	273	8,47	c	5.556	179,2	c	15	1,12	b	2.261	199,0	b
sim	sim	262	5,50	b	5.341	108,1	b	14	1,55	b	2.249	157,3	b

Madeira de Marupá

Vaporizada	Lixiviada	Fr	Vsom			DI		ECA					
			Controle	226	4,9	a	4.897	88,1	ab	20,0	1,07	ab	1.739
não	não	256	11,4	c	5.122	222,2	a	19,1	1,75	a	1.988	175,2	a
não	sim	255	6,8	c	5.111	195,8	a	21,6	1,30	b	1.822	168,3	a
sim	não	231	4,8	ab	4.873	87,8	ab	19,8	0,71	ab	1.857	69,9	a
sim	sim	242	10,0	b	4.694	216,4	b	21,4	1,42	ab	1.669	172,9	a

Em que: médias seguidas por letras minúsculas distintas, indicam diferença estatística feito pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância. Valores sobrescritos são os desvios padrões.

4. CONCLUSÃO

O processo de vaporização da madeira de freijó gerou melhoria acústica e mecânica, enquanto a madeira de marupá não vaporizada obteve melhor resultado acústico. Os tratamentos aplicados em estufa a vácuo associado a pré-tratamentos de vaporização e lixiviação geraram alterações irreversíveis quanto às propriedades físico-mecânicas das madeiras, confirmados pelo teste de umidificação.

5. REFERÊNCIAS

- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E-1876-22**: “International Standard Test Method for Dynamic Young’s Modulus, Shear Modulus, and Poisson’s Ratio by Impulse Excitation of Vibration”, Philadelphia, 2022.
- BUCUR V., The Acoustics of wood. 2a ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg: Springer Series in Wood Science, 2006.
- ENDO, Kaoru; EIICHI OBATAYA; NANAMI ZENIYA; *et al.* Effects of heating humidity on the physical properties of hydrothermally treated spruce wood. **Wood Science and Technology**, v. 50, n. 6, p. 1161–1179, 2016.
- GÖKEN, J.. Temperature-dependent damping of the tonewood spruce. **Journal of Alloys and Compounds**. 856 158182, 2021.
- HILL, C.; ALTGEN, M.; RAUTKARI, L. Thermal modification of wood—a review: chemical changes and hygroscopicity. **Journal of Materials Science** 56(11) 6581–6614, 2021. (DOI: 10.1007/s10853-020-05722-z).
- KARAMI, E. *et al.* Effects of mild hygrothermal treatment on the physical and vibrational properties of spruce wood. **Composite Structures**. 253 112736, 2020.



LAUDARES, Francisco Antonio Lopes. **Efeito do tratamento térmico nas características das madeiras de Marupá e Freijó para uso em instrumentos musicais.** 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Físicas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

NASCIMENTO, A. M. et al. Propriedades físicas da madeira de *Khaya ivorensis* após tratamento térmico. *In: ANAIS CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA, 2017, Florianópolis. Anais eletrônicos* [...] Florianópolis: CBCTEM, 2017.

MONTERO, M. J.; DE LA MATA, J.; ESTEBAN, M.; HERMOSO, E.. Influence of moisture content on the wave velocity to estimate the mechanical properties of large cross-section pieces for structural use of scots pine from Spain. **Maderas Ciencia y Tecnología.** 17(2): 407 – 420, 2015.

WENTEZEL, M.; ALTEGEN, M.; MILITZ, H. Analyzing reversible changes in hygroscopicity of thermally modified eucalypt wood from open and closed reactor system. **Wood Sci Technol.** 52:889–907, 2018.

ZATLOUKAL, P.; SUCHOMELOVÁ, P.; DÖMÉNY, J.; DOSKOCIL, T.; MANZO, G.; TIPPNER, J.. Possibilities of Decreasing Hygroscopicity of Resonance Wood Used in Piano Soundboards Using Thermal Treatment. **Applied Sciences.** 11(2):475, 2021.

ZENIYA.N; EIICHI OBATAYA,E; KAORU ENDO, K.U; Changes in vibrational properties and colour of spruce wood by hygrothermally accelerated ageing at 95–140 °C and different relative humidity levels. **S,N Applied Sciences**, v. 1, n. 1, 2018.