

Efeito do congelamento na rigidez da madeira obtida por ressonância sônica

Heloíse Rodrigues Alves de Sá ¹; Marina Rates Pires ¹; Fabíola Magalhães Mendes ¹; Felipe Salomão

Maciel Rodrigues ¹; Geraldo Aparecido da Silva ¹; Paulo Ricardo Gherardi Hein ¹.

¹ Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira / Universidade Federal de Lavras.

Resumo: O objetivo deste estudo foi comparar a rigidez da madeira na umidade de equilíbrio, na condição congelada e após o congelamento. Para isso, dezessete corpos de prova de madeira de *Pinus* sp. foram submetidos ao ensaio de vibração longitudinal. O módulo de elasticidade dinâmico foi determinado nas amostras de madeira na umidade de equilíbrio inicial, na condição congelada e na umidade de equilíbrio após o congelamento. Não houve efeito do congelamento na densidade da madeira. Em média, o MOE da madeira congelada sofreu redução de 21,8%, variando de 21,58 GPa na umidade de equilíbrio inicial para 16,86 GPa na situação congelada. Houve redução de 9,5% na rigidez das peças de madeira na umidade de equilíbrio após ter sido congelada. A variação de rigidez decorrente do congelamento afeta diretamente o processamento do material, pois o torna mais frágil durante os processos de beneficiamento. O congelamento deve ser evitado em situações em que processos industriais exijam alta qualidade no acabamento.

Palavras-chave: Propriedades mecânicas, Módulo de elasticidade, Ensaio não destrutivo.

Effect of freezing on stiffness of wood obtained by sonic resonance

Abstract: The objective of this study was to compare the stiffness of the wood in equilibrium moisture, in the frozen condition and after freezing. For this, seventeen specimens of *Pinus* sp. wood were submitted to the longitudinal vibration test. The dynamic modulus of elasticity was determined in the wood samples at initial equilibrium moisture, frozen condition and equilibrium moisture after freezing. There was no effect of freezing on wood density. On average, frozen wood MOE decreased by 21.8%, ranging from 21.58 GPa at initial equilibrium moisture to 16.86 GPa in the frozen situation. There was a 9.5% reduction in the rigidity of the pieces of wood in equilibrium moisture after being frozen. The variation of rigidity due to freezing directly affects the processing of the material, as it makes it more fragile during the beneficiation processes. Freezing should be avoided in situations where industrial processes requiring high quality finish are required.

Keywords: Mechanical properties, Modulus of elasticity, Non-destructive rehearsal

1. INTRODUÇÃO

O congelamento de madeira é um método conhecido e utilizado, há certo tempo, em áreas como conservação e restauro de obras de arte, incluindo documentos em papel, e também na secagem de peças de madeira com pequenas dimensões, em busca da redução dos defeitos provocados pelo processo de retirada de água do material (GIOVANELLA et al., 2009). Utilizado principalmente nos EUA, este método consiste no congelamento artificial de madeiras em temperaturas que podem alcançar até -90°C antes de serem secas naturalmente ou em estufa (ILIC, 1995).

Durante o congelamento, a água migra da parede celular para o lume, provocando uma contração a frio da parede celular. Essa água solidifica e expande no interior do lume, o que causa uma tensão de compressão na parede celular (ILIC, 1995; Awoyemi et al., 2010). Além disso, segundo Giovanella e Muniz (2010), há contração dos elementos químicos constituintes (celulose, hemicelulose e lignina) devido à baixa temperatura, o que pode ocasionar colapsos em decorrência do comportamento anômalo da água. Tais colapsos influenciam nas propriedades de resistência, rigidez, dureza, usinagem e rendimento (Kollmann e Cotê, 1968). Assim, o conhecimento das relações madeira-líquido e os efeitos destas nas aplicabilidades da madeira é de suma importância.

Há diversas formas de avaliar a resistência mecânica de peças de madeira. Targa, Ballarin e Biaggioni (2005), Segundinho et al. (2012) e Carreira et al. (2012) citam algumas técnicas de ensaio não destrutivos, a exemplo da classificação visual, do ultrassom, a vibração transversal livre, a vibração longitudinal, o raio X e o stress wave timer, ou ondas de tensão. Tais métodos estão se tornando cada vez mais relevantes na determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira, uma vez que são capazes de oferecer rápidas respostas e correlações lineares elevadas, tendo custos de equipamentos relativamente baixos.

Em diversos países, assim como também na região sul do Brasil, as temperaturas podem chegar abaixo de 0°C e provocar congelamento do lenho de povoamentos florestais ali inseridos. As características e o comportamento da madeira após o processo de congelamento ainda não são totalmente compreendidos. Nesse contexto, a fim de simular condições de congelamento naturais e avaliar o efeito dessa condição na propriedade mecânica do lenho, o presente estudo tem por objetivo comparar a rigidez da madeira de *Pinus* na umidade de equilíbrio, na condição congelada e após o congelamento.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Corpos de prova

Para a execução do estudo, foram retirados corpos de prova de tábuas de *Pinus sp.*, fornecidos pela serraria da Universidade Federal de Lavras (UFLA). Foram utilizados 17 (dezesete) corpos de prova nas dimensões nominais de 15x1x1 cm (comprimento x largura x espessura). As peças foram previamente secas ao ar livre até umidade de equilíbrio.

2.2 Determinação da rigidez por ensaio de ressonância sônica

Para o cálculo do módulo de elasticidade (MOE), os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de vibração transversal com auxílio do aparelho Sonelastic® Stand Alone de acordo com procedimento descrito em Fonseca et al. (2016). Neste tipo de ensaio, corpo de prova sofre impacto na direção longitudinal, em que a direção do movimento da onda ocorre na mesma direção do modo de vibração longitudinal.

De acordo com Segundinho et al. (2012), a tecnologia utilizada nos ensaios de vibração longitudinal apresenta um software embarcado em um hardware que faz o processamento do sinal captado pelo microfone, retornando as frequências naturais de vibração. A configuração do sistema consiste em um bastão utilizado para excitar o corpo de prova e um microfone direcional pedestal para a captura de frequências. Os corpos de prova foram colocados sobre dois suportes tensionados.

2.3 Tratamento térmico dos corpos de prova

Inicialmente, foram determinados os módulos de elasticidade dos corpos de prova em umidade de equilíbrio. Em seguida, os mesmos foram submersos em água até saturação total das fibras, e então, as amostras foram congeladas em freezer horizontal de marca Consul®, a uma temperatura de até -18°C por 72 horas. Posteriormente, as amostras foram secas ao ar livre até atingirem novamente a umidade de equilíbrio e então o MOE foi caracterizado nesta condição.

Foram determinadas as massas dos corpos de prova através de balança analítica de precisão em todas as condições de umidade. De posse das dimensões e massa de cada amostra, a densidade foi calculada diretamente no software ligado ao aparelho Sonelastic®.

2.4 Análise estatística

O estudo foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC). Os dados de densidade e módulo de elasticidade foram analisados por análise de variância (ANOVA), e

comparados por teste de médias (teste Tukey). O efeito do congelamento na rigidez da madeira foi estatisticamente calculado por meio de análise de correlação simples.

3. RESULTADOS

Na Tabela 1 estão apresentados os resultados médios do módulo de elasticidade e da densidade da madeira em umidade de equilíbrio e congelada obtidos por meio do ensaio de vibração longitudinal.

Tabela 1. Estatística descritiva dos resultados de densidade (D) dos módulos de elasticidade (MOE) e densidade (D) em diferentes condições de umidade.

	D _{UE1} (g/cm ³)	D _{Cong} (g/cm ³)	D _{UE2} (g/cm ³)	MOE _{UE1} (GPa)	MOE _{Cong} (GPa)	MOE _{UE2} (GPa)
Mínimo	0,64	1,44	0,41	14,15	8,98	13,50
Máximo	0,83	1,54	0,84	28,45	24,79	26,56
Média	0,72a	1,47b	0,71a	21,58B	16,86A	19,52AB
DP	0,07	0,03	0,10	4,06	4,26	4,02
CV (%)	9,77	2,21	14,86	18,84	25,26	20,62

DP= desvio padrão; CV= coeficiente de variação; UE₁= umidade de equilíbrio inicial; Cong= Congelada; UE₂= umidade de equilíbrio pós congelamento. Médias seguidas de mesma letra, não diferem estatisticamente pelo teste Tukey a 5% de significância.

A Figura 2 apresenta o diagrama de dispersão e a regressão entre o MOE na umidade de equilíbrio inicial e pós congelamento.

Figura 2. Diagrama de dispersão e reta de regressão entre o MOE antes e após o congelamento.

4. DISCUSSÃO

De acordo com os valores apresentados na tabela 1, não foi verificada diferença estatística entre as densidades nas umidades de equilíbrio antes (0,72 g/cm³) e após o congelamento (0,71 g/cm³). Resultado diferente foi encontrado por Giovanella (2010), em que houve densificação após o congelamento em *Eucalyptus* sp. A semelhança estatística pode ser atribuída pela insuficiência amostral, além de um possível comportamento característico da espécie.

Quanto aos módulos de elasticidade, foi verificado um decréscimo desta propriedade pós congelamento. Em média, o MOE da madeira congelada reduziu 21,8%, variando de 21,58 GPa na umidade de equilíbrio inicial para 16,86 GPa na situação congelada. Após retornar à umidade de

equilíbrio novamente, o MOE médio foi de 19,52 GPa. Em resumo, o congelamento da madeira causou redução de 9,5% do da rigidez da madeira na umidade de equilíbrio após o tratamento térmico. Na Figura 2 observa-se que a regressão linear entre os módulos de elasticidade nas umidades de equilíbrio antes e após o congelamento foi significativa, com coeficiente de determinação de $R^2 = 79\%$, evidenciando a correlação entre as condições avaliadas.

Segundo Szmotku et al. (2013), o decréscimo da elasticidade observado deve-se pela pressão desenvolvida pela solidificação da água durante o processo de congelamento, o que pode causar a ruptura de algumas ligações entre as moléculas de água e da madeira, sendo possível a criação de microfissuras na estrutura da parede celular, reduzindo a sua rigidez.

Sob o ponto de vista de processos industriais, o decréscimo observado é prejudicial, pois, durante os processos de beneficiamento, certamente haverá uma maior perda por defeitos. Com o declínio do MOE, a madeira encontra-se mais frágil, permeável e mais propensa a rachaduras, trincas internas, empenamentos e colapsos. Dessa forma, o processamento mecânico deve ser mais cuidadoso.

5. CONCLUSÕES

Houve efeito significativo do congelamento na rigidez da madeira. Na condição congelada, a rigidez da madeira sofreu redução de 21,8%, variando de 21,58 GPa na umidade de equilíbrio inicial para 16,86 GPa na situação congelada. A rigidez da madeira na umidade de equilíbrio apresentou redução de 9,5%, em média, após o congelamento. Não houve efeito do congelamento na densidade da madeira de *Pinus sp.*

6. REFERÊNCIAS

AWOYEMI, L et al. Pre-freezing as a pre-treatment for thermal modification of wood. Part 2: surface properties and termite resistance. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, v. 7, n. 1-2, p. 19-24, 2010

CARREIRA, MR et al. Bending stiffness evaluation of Teca and Guajará lumber through tests of transverse and longitudinal vibration. *Acta Scientiarum. Technology*, Maringá, v. 34, n. 1, p. 27-32, jan./mar. 2012

FONSECA, CS ; SILVA, FT ; SILVA, MF ; OLIVEIRA, IRC; MENDES, RF ; HEIN, PRG ; MENDES, LM ; TONOLI, GHD. Micro/nanofibrilas celulósicas de *Eucalyptus* em fibrocimentos extrudados. *Cerne*, v. 22, p. 59-68, 2016.

GIOVANELLA, R. Conservação e restauro de obras de arte que utilizam a madeira: métodos de

preservação e controle da degradação. In: 13º EVINCI – Evento de Iniciação Científica. Imprensa Universitária da UFPR, Livro de Resumos, vol. único, 2005, Curitiba.

GIOVANELLA, R., MUNIZ, GIB. de Congelamento de madeira: avaliação preliminar de sua utilização. Floresta, Curitiba, PR, v. 40, n. 2, p. 311-318, abr./jun. 2010.

ILIC, J. Advantages of prefreezing for reducing shrinkage-related degrade in eucalypts: General considerações and review of the literature. Wood Science and Technology, v. 29, n. 4, p. 277 - 284, 1995.

KOLLMANN, FR., COTÉ, WA. Principles of wood science and technology. Berlin, Springer-Verlag. 1968, 592p.

SEGUNDINHO, PG. et al. Aplicação do método de ensaio das frequências naturais de vibração para obtenção do módulo de elasticidade de peças estruturais de madeira. Revista Árvore, Viçosa, MG, v. 36, n. 6, p. 1155-1161, 2012.

SZMUTKU, MB. et al. Strength reduction of spruce wood through slow freezing. European Journal of Wood and Wood Products, v. 71, n. 2, p. 205-210, 2013.

TARGA, LA, BALLARIN, AW, BIAGGIONI, MAM. Avaliação do módulo de elasticidade da madeira com uso de método não-destrutivo de vibração transversal. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 25, n. 2, p. 291-299, 2005.