

Propriedades nanomecânicas de Pinus Radiata D. Don para uso em produtos de alto valor

Nanomechanical properties of Pinus Radiata D. Don for use in high value products

DOI:10.34117/bjdv7n11-559

Recebimento dos originais: 12/10/2021

Aceitação para publicação: 29/11/2021

Oswaldo Erazo

Doutorando em Engenharia de Materiais e Processos Sustentáveis
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería en Maderas
Centro de Biomateriales y Nanotecnología,
Universidad del Bío Bío, Concepción, Chile
E-mail: oswaldo.erazo1802@alumnos.ubiobio.cl

Pablo Moreno

Doutor em Ciência e Indústria da Madeira
Centro de Biomateriales y Nanotecnología
Departamento de Ingeniería en Maderas
Universidad del Bío Bío, Concepción, Chile
E-mail: pmoreno@ubiobio.cl

Paulina Valenzuela

Mestre em Ciência e Tecnologia da Madeira
Centro de Biomateriales y Nanotecnología
Departamento de Ingeniería en Maderas
Universidad del Bío Bío, Concepción, Chile
E-mail: nvalenzu@ubiobio.cl

William Gacitúa

Doutor em Engenharia Civil
Centro de Biomateriales y Nanotecnología
Departamento de Ingeniería en Maderas
Universidad del Bío Bío, Concepción, Chile
E-mail: wgacitua@ubiobio.cl

RESUMO

O *Pinus radiata* (*Pinus Radiata* D. Don), uma espécie de crescimento rápido no Chile, tem uma resistência mecânica inferior ao de outras coníferas utilizadas como madeira estrutural, mesmo bem abaixo de algumas madeiras chilenas com altas qualidades estruturais. O objetivo desta pesquisa foi estudar o efeito de um tratamento termo-higromecânico do tipo fluência sobre as propriedades nanomecânicas do pinheiro radiata. Os exemplares do tipo I foram adaptados de acordo com a ASTM D638-14, de plantações de rápido crescimento na região de Bío-Bío, Chile. O tratamento termo-higromecânico foi realizado sob condições controladas de carga, umidade e temperatura. Oito tratamentos com dois níveis de carga (por 30 minutos), duas condições de temperatura e dois tempos pós-tratamento foram estabelecidos para a avaliação das propriedades

mecânicas finais do material tratado, basicamente o módulo de elasticidade em tensão determinado em uma máquina universal de testes. Usando um nanoindentador, as propriedades de dureza e módulo de elasticidade da camada S2 da parede celular e da lamela média foram caracterizadas na escala nanométrica. Os resultados mostraram um aumento no módulo de elasticidade das madeiras tratadas, com valores máximos nos exemplares submetidos à temperatura. As propriedades nanomecânicas da dureza mostraram maiores mudanças, particularmente no nível da lamela média. O tratamento termo-higromecânico pode melhorar as propriedades mecânicas da madeira e aumentar seu grau estrutural.

Palavras-chave: Propriedades nanomecânicas, processo de fluência, uso estrutural.

ABSTRACT

Pinus radiata, a fast growth species in Chile, has lower mechanical properties than other conifers used on structural applications, even much lower than other Chilean species having high structural grades. This work aimed to study the effect of a thermo-hydronechanical treatment on nanomechanical properties of the cellular structure of radiata pine from fast-growing plantations in the Bío-Bío region, Chile. Type I adapted specimens, according to ASTM D638-14, were prepared. A thermo-hydronechanical creep process with eight treatments including two loading levels (during 30 min), two temperatures conditions, and two post-treatment times. The response variable was the tensile modulus. Hardness and elastic modulus of cell wall (S2 layer) and middle lamella were characterized using nanoindentations. The results showed an increase in tensile modulus up to 25% for the treated wood, with maximum values in the specimens subjected to temperature. The nanomechanical properties of hardness yielded major changes, particularly at the middle lamella level. The thermo-hydronechanical creep can improve the mechanical properties of wood and potentially increase its structural degree.

Keywords: Nanomechanical properties, *Creep* process, Structural use.

1 INTRODUÇÃO

O Chile tem 2,289 milhões de hectares de plantações florestais (INFOR, 2019), dos quais 68% das são de *Pinus radiata* CONAF (CONAF, 2019). Isto representa uma fonte de matéria-prima para as indústrias de celulose, papel e construção civil. Neste último, a madeira precisa ser classificada estruturalmente e agrupada de acordo com sua capacidade de suportar cargas ou tensões, o que leva ao projeto de estruturas de madeira mais seguras e mais confiáveis.

A produção de madeira em rotações curtas desenvolveu correlações genéticas adversas em suas propriedades mecânicas e qualidade, devido à alta proporção de madeira juvenil (BURDON e MOORE, 2018). O pinho Radiata geralmente tem baixa rigidez, maior retração longitudinal e menor densidade do que outras madeiras macias utilizadas como madeira estrutural (MOORE, 2012). Cave e Walker (1994) concluiu que o ângulo fibriloso era o principal fator que explicava a diminuição da rigidez (*E*) do *Pinus radiata*.

Além disso, o efeito da gravidade específica da madeira sobre o módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR), que diminui na madeira juvenil (GARAY et al., 2009), gera uma fonte adicional de variação na propriedade de flexão estática (ZHANG, 1997), a principal propriedade para a avaliação da madeira para fins estruturais (COWN et al., 1999).

Os tratamentos termo-higromecânicos (THM) têm uma vantagem importante sobre os tratamentos químicos, uma vez que não incorporam agentes químicos na madeira. Estes processos baseiam-se na aplicação de força mecânica sobre a madeira em condições de temperatura e umidade. A aplicação de processos THM permite melhorar a estabilidade dimensional, reduzir a higroscopicidade da madeira, aumentar a resistência aos microorganismos, libertar tensões internas (NAVI e SANDBERG, 2011). O processo de densificação foi o mais investigado; consiste na modificação da madeira por forças compressivas na direção transversal (SADATNEZHAD et al., 2017).

A aplicação de uma carga constante sobre a madeira produz uma deformação elástica linear. Se a carga for mantida ao longo do tempo, ocorrerá deformação adicional (BODIG e JAYNE, 1982). Quando esta deformação é influenciada pela ação conjunta da temperatura e humidade, falamos de fluência termo-higromecânica (SEPÚLVEDA et al., 2013).

As respostas dependentes e não dependentes do tempo de materiais viscoelásticos podem ser medidas por meio de testes dinâmicos e quase-estáticos (SALMÉN e HAGEN, 2000). Estes últimos podem ser obtidos explicitamente numa escala temporal, enquanto os testes dinâmicos dão uma função complexa em termos de frequência (SALMÉN e HAGEN, 2001). O efeito do aumento da temperatura acelera a fluência (HOLZER et al., 1989), tal como o CH, uma vez que a água atua como plastificante (BODIG e JAYNE, 1982).

A disposição hierárquica da estrutura da parede celular de madeira define em grande parte as suas propriedades mecânicas. Compreender o comportamento das propriedades da madeira à nanoescala é fundamental para elucidar as alterações ou modificações das suas propriedades quando sujeitas a um processo de fluência. A técnica da nanoindentação permite determinar as propriedades mecânicas da camada S2 da parede celular e da lamela média à nanoescala (MOON et al., 2006). Desta forma, a dureza (H) e o módulo elástico (E) podem ser obtidos em função do ângulo de fibrilação da celulose (GINDL e SCHOBBERL, 2004), localização do anel de crescimento (TZE et al., 2007), madeira do início versus madeira tardia (WIMMER et al., 1997) e outros.

Existem diferenças entre as propriedades mecânicas da parede secundária e da lamela média, devido à presença de componentes estruturais, pelo que o E é claramente reduzido na lamela média (WIMMER e LUCAS, 1997). Contudo, a H da lamela média é semelhante ao da parede secundária (GINDL e SCHOBERL, 2004). Em um estudo, em que as paredes celulares do abeto norueguês foram recuadas, verificou-se que na área deformada pelo recuo, os resultados mostram que o E tanto no eixo longitudinal como no transversal tem influência nas propriedades mecânicas (GINDL e SCHOBERL, 2004).

Usando a técnica de medição contínua da nanoindentação, foram avaliadas as H e E de fibras individuais de *Pinus taeda* ao longo de 10 anéis de crescimento. Os investigadores encontraram um padrão previsível de E em função do ângulo microfibrilar, no entanto, estes valores são inferiores aos estimados a partir de modelos de parede celular. Isto sugere que a diferença dos valores obtidos experimentalmente em relação aos valores previstos pode ser altamente influenciada pelos valores das constantes elásticas dos constituintes da parede celular e pelos níveis de umidade das amostras durante o processo de indentação (TZE et al., 2007).

Considerando a potencial aplicação do *Pinus radiata* como madeira estrutural, o presente trabalho visa estudar o efeito de um tratamento termo-higromecânico do tipo fluência sobre as propriedades nanomecânicas da estrutura celular do *Pinus radiata*.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

Foi utilizada madeira de *Pinus radiata* de plantações localizadas na Região do Bío-Bío, Concepción, Chile. As peças de madeira foram cortadas na direção radial e dimensionadas para obter exemplares de tipo I de acordo com a ASTM D638 (ASTM, 2014). Contudo, as amostras foram preparadas em forma retangular, para este efeito, a seção estreita das amostras foi aumentada para 19 mm. Foram testadas cinco amostras por tratamento (Quadro 1) e um teor de umidade de 12%; foram utilizadas amostras livres de nós, fendas, ataque fúngico, insetos ou outros defeitos que pudessem aumentar o erro na pesquisa.

2.2 MÉTODOS

2.2.1 Ensaio de tração

As amostras de madeira foram submetidas a ensaios de tração em uma máquina universal Zwick Roell Z020 com uma célula de carga de 20 kN. Foi utilizada uma velocidade de ensaio de 5 mm/min. O módulo de elasticidade (E) foi determinado pela inclinação da curva na zona elástica do gráfico de força (N) de deformação (mm).

2.2.2 Processo termo-higromecânico

Para determinar os níveis de carga no teste, as amostras foram sujeitas a tensão para determinar a força no limite proporcional (FLP). Foram estabelecidas três condições de teste (Tabela 1). O primeiro, foi baseado em $\frac{1}{3}$ e $\frac{2}{3}$ da força obtida no LP. O segundo, tempos de aquecimento 0s e 30s a 20°C e 80°C, respectivamente. Depois, as peças foram submetidas a um processo *da fluência* durante 30 minutos. A terceira condição era tempo de tratamento pós-repasse (0h e 48h). Após este tempo, o módulo de elasticidade (E) foi determinado e as propriedades de nanoescala da madeira foram avaliadas.

Tabela 1: Tratamentos de ensaio

Tratamento	Carga (N)	Tempo de aquecimento (s)	Tempo de repouso (h).
T1	1096	0	0
T2	1096	0	48
T3	1096	30	0
T4	1096	30	48
T5	2192	0	0
T6	2192	0	48
T7	2192	30	0
T8	2192	30	48
Controlo			

2.2.3 Nanoindentação

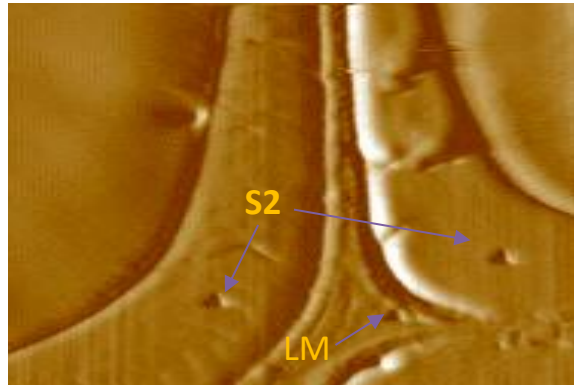
Para o teste de nanoindentação, foram obtidas amostras de madeira temporã a partir da parte central dos espécimes tratados com fluência. As amostras foram cortadas na forma de um cubo truncado em seções de 2x2x3 mm em dimensões radiais, tangenciais e longitudinais. As amostras foram colocadas no vácuo durante 30 minutos e curadas em um forno a 70°C durante aproximadamente 8 horas. Depois, estes espécimes foram fixados em um micrótomo rotativo Leica RM2265 para que a seção transversal da madeira pudesse ser cortada; nivelando a madeira com uma faca de vidro

e depois com a faca de diamante foi obtida uma superfície completamente homogênea ou lisa, desta forma as fibras expostas podem ser nanoindentadas (WANG et al., 2006).

Antes das indentações serem feitas, o Hysitron TI900 nanoindenter, equipado com uma ponta de penetração de diamante de canto de cubo, foi calibrado usando o método de função de área. Isto permitiu a obtenção de valores confiáveis do módulo de elasticidade e dureza. Foi aplicado um ciclo múltiplo de 104s com uma carga nominal de 100 μ N.

As regiões da parede celular e da lamela média a serem nanoindentadas foram cuidadosamente selecionadas (Figura 1). As amostras foram examinadas ao microscópio para avaliar a posição e qualidade da indentação. Foram realizadas várias nanoindentações numa seção transversal de 2-3 paredes celulares para cada amostra.

Figura 1 - Nano-inclusões em células de *Pinus radiata* em camada S2 e lamela média



Os dados de carga-deslocamento dos testes de nanoindentação foram utilizados para calcular a dureza e o módulo de elasticidade. A dureza (H) das amostras para uma profundidade de indentação (h) foi calculada a partir da seguinte equação (WANG et al., 2006):

$$H = \frac{P_{max}}{A} \quad (1)$$

Onde, P_{max} é a carga medida a uma profundidade máxima de penetração (h) num ciclo de indentação e A é a área projetada de contacto entre o indentor e a amostra em P_{max} .

O módulo do sistema combinado ou módulo de indentação reduzida (E_r) foi determinado a partir da seguinte expressão (OLIVER e PHARR, 1992):

$$E_r = \frac{dP}{dh} \frac{1}{2} \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}} \quad (2)$$

Onde dP/dh é o declive da linha tangente à curva de descarga inicial na parcela de carga-deslocamento.

O módulo de amostra (E_s) foi determinado pela seguinte equação:

$$E_s = (1 - \nu_s^2) \left(\frac{1}{E_r} - \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} \right)^{-1} \quad (3)$$

Onde ν_s e ν_i são os razões de Poisson da amostra e do indentador, respetivamente, e E_i é o módulo do indentador.

2.2.4 Análise estatística

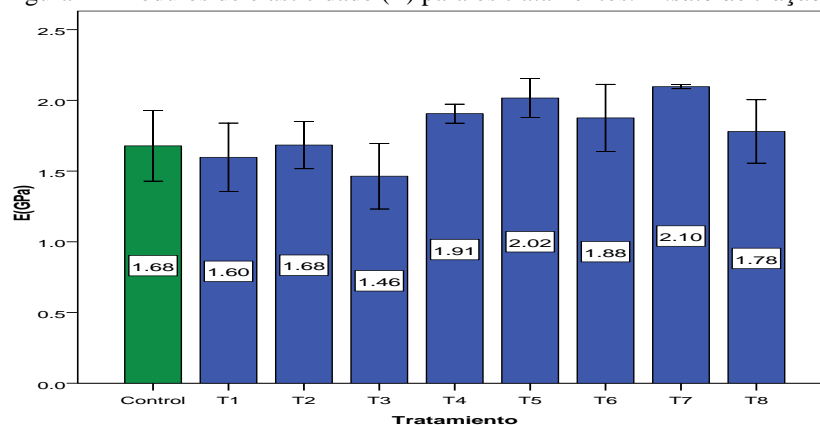
Foi realizada uma análise de variância de três fatores (ANOVA) para estudar o efeito do processo de fluência nas propriedades nanomecânicas da madeira de *Pinus radiata*. Foi utilizado um nível de significância de $\alpha = 0,05$. Os testes estatísticos requeridos na análise de variância, os testes de comparações múltiplas de Tukey, foram realizados. Foi realizada uma análise estatística utilizando o software SPSS 15.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 MÓDULO DE ELASTICIDADE (E)

A figura 2 mostra o módulo de elasticidade (E) obtido para cada tratamento.

Figura 2 - Módulos de elasticidade (E) para os tratamentos. *Ensaio de tração.*

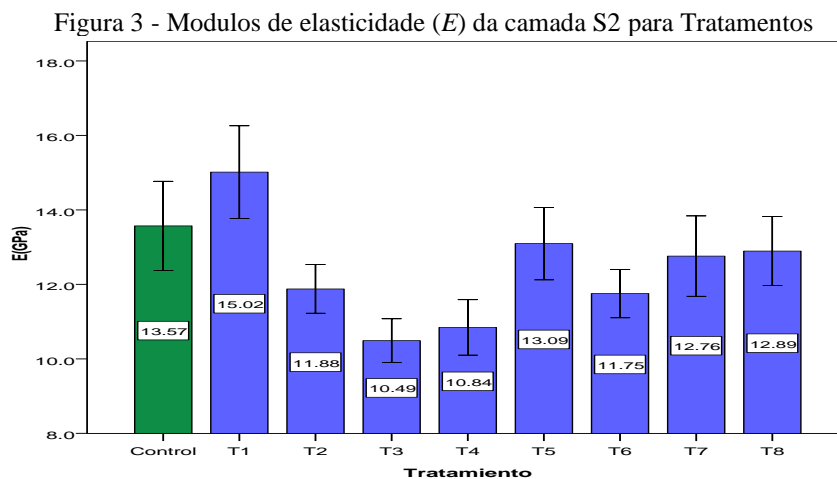


Observa-se que os tratamentos T1 e T3 apresentaram valores de E inferiores em relação ao controle, enquanto que o T2 apresentou um E semelhante ao controle. Por outro lado, dos tratamentos, aos quais foi aplicada uma força de 1096 N, T4 apresentou o valor E mais elevado, com um aumento de 14% em relação ao controle. Por outro lado, é

evidente que quanto maior for a força (2192 N) e o efeito do tempo de aquecimento, maior é o aumento de E em comparação com as amostras de controle. O T7 mostrou um E de 2,1 GPa, sendo o módulo mais elevado de todos os tratamentos com um aumento de 25% em comparação com o controle. De acordo com a ANOVA realizada, os tratamentos diferiram significativamente com um $\alpha=0,05\%$. É importante notar que a geometria da amostra, ao testar materiais como a madeira, afeta os valores do módulo de elasticidade, como evidenciado neste estudo particular, que relata valores E inferiores aos encontrados por outros investigadores (WATT e TRINCADO, 2017), que determinaram para o *Pinus radiata* valores E que vão de 3,41 GPa a 8,52 GPa (YING et al., 1994).

3.2 NANOINDENTAÇÕES DA CAMADA S2 DA PAREDE CELULAR

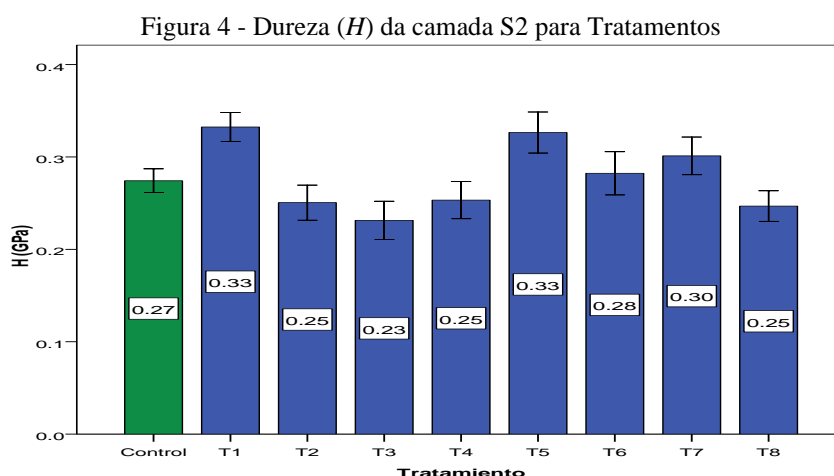
A figura 3 mostra o valor E para a camada S2 da parede celular do *Pinus radiata*. Os valores E para todos os tratamentos variam de 10,49 GPa a 15,02 GPa. Estes tratamentos mostraram diferenças significativas em $\alpha =0,05$. O tratamento 1 (T1) apresentou valores E médios de 15,02 GPa, semelhantes aos relatados por (GINDL et al., 2003; TANGUY et al., 2016). Este tratamento provou ter um melhor efeito sobre as propriedades nanomecânicas. Embora os outros tratamentos apresentem módulos de elasticidade inferiores ao controle, os testes de comparações múltiplas de Tukey mostraram a formação de um subconjunto entre o T5 e o controle.



Uma razão possível para encontrar módulos mais baixos do que o controle é devido às paredes muito finas das células de madeira primitivas avaliadas com o nanoindenter. Por outro lado, o efeito de aumentar a carga aplicada durante o teste de

fluência produz um efeito diretamente proporcional sobre o módulo elástico pós-tratamento.

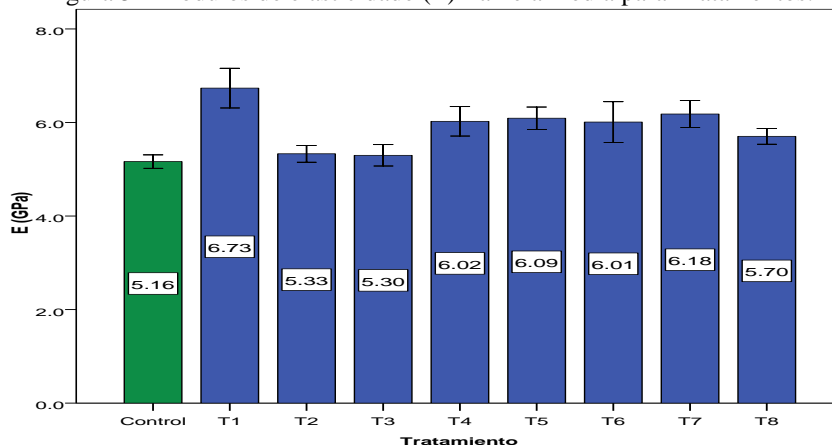
Em relação à dureza da camada S2 (Figura 4). T1 e T5 mostram os valores E médios mais altos com 0,33 GPa. Dos oito tratamentos avaliados, quatro eram superiores ao controle (T1, T5 e T7). Em T6, o valor médio era muito semelhante ao do controle. Tal como no E da camada S2, quanto maior a força aplicada, maior o aumento do E . Estes valores são semelhantes aos reportados para a madeira de *Pinus radiata* não tratada (GINDL et al., 2002; MOON et al., 2009).



3.3 NANOINDENTAÇÕES DE LAMELAS MÉDIAS

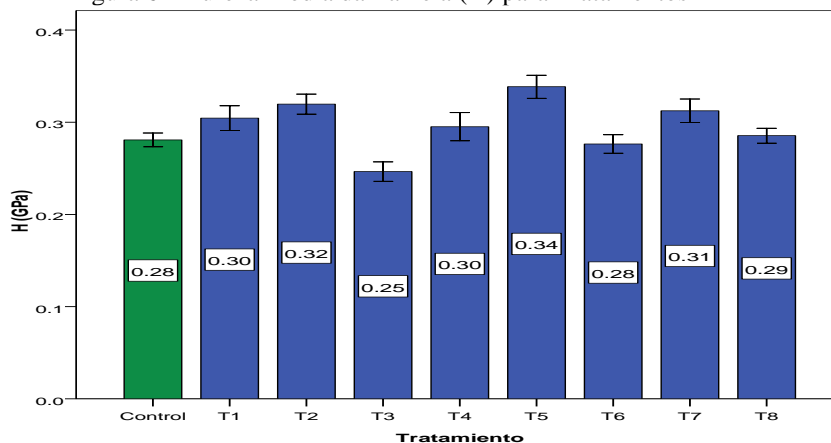
Como mostra a Figura 5, os valores E médios para todos os tratamentos são superiores ao controle, refletindo que as condições avaliadas nesta investigação influenciam o aumento do módulo de elasticidade ao nível da lamela média. Da mesma forma, como na camada S2, T1 tinha o valor E mais alto de 6,73 GPa. Seguiram-se os T7, T5, T4 e T5 com valores E de 6,18 GPa, 6,09 GPa, 6,02 GPa e 6,01 GPa, respetivamente, o que representa um aumento entre 16 e 30% em relação ao controle.

Figura 5 - Módulos de elasticidade (E) Lamela média para Tratamentos.



É também importante salientar que a temperatura teve um efeito no aumento de E . A análise de variância encontrou diferenças significativas em $\alpha=0,05$ nos tratamentos, de modo que quando o teste de comparações múltiplas de Tukey foi realizado, foram formados 3 subconjuntos. Por outro lado, os valores médios da dureza da lamela mostraram diferenças significativas em $\alpha=0,05$, tendo os tratamentos 3 e 6 os valores mais baixos do módulo de elasticidade de 0,24 GPa e 0,276 GPa, respectivamente (Figura 6).

Figura 6 - Dureza Média da Lamela (H) para Tratamentos



Os tratamentos T5, T2 e T7, cujos valores H de 0,33, 0,31 e 0,31 GPa, respectivamente, apresentaram os valores de dureza mais elevados, enquanto que o tratamento de controle reportou uma dureza de 0,28 GPa. Ao analisar os valores da camada S2 e da lamela média, é evidente que esta última mostrou uma melhor resposta às condições de tratamento termo-higromecânico.

4 CONCLUSÕES

As propriedades mecânicas da madeira de *Pinus radiata* aumentaram quando sujeita a condições de carga e temperatura. Do mesmo modo, as propriedades nanomecânicas foram favorecidas pelos tratamentos, sendo a lamela média a estrutura que apresentou maiores alterações, especialmente o módulo de elasticidade. Em alguns tratamentos, não foram observadas alterações principalmente devido à morfologia das paredes celulares, que eram muito finas; nesta linha, é necessário mais estudo para reduzir a variabilidade dos resultados. Estes resultados mostram que o tratamento termohigromecânico pode melhorar as propriedades mecânicas e conseqüentemente a sua qualidade estrutural, tornando esta espécie um material que poderia ser potencialmente utilizado para produtos de alto valor.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D638-14: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. West Conshohocken, PA, 2014.

BODIG, J.; JAYNE, B. A. Mechanics of Wood and Wood Composites. New York: Van Nostrand Reinhold, 1982.

BURDON, R. D.; MOORE, J. R. Adverse Genetic Correlations and Impacts of Silviculture Involving Wood Properties: Analysis of Issues for Radiata Pine. *Forests*, v.9, n.6, p. 1-17, 2018.

CAVE, I.; WALKER, J. Stiffness of Wood in Fastgrown Plantation Softwoods: The Influence of Microfibril Angle. *Forest Products Journal*, v.44, n.5, p. 43–48, 1994.

CONAF. Plantaciones Forestales. Disponible en <http://www.conaf.cl/nuestros-bosques/plantaciones-forestales/>. Acesso 15 Oct. 2019.

COWN, D. J.; HEBERT, J.; BALL, R. Modelling Pinus Radiata Lumber Characteristics. Part 1: Mechanical Properties of Small Clears. *New Zealand Journal of Forestry Science*, v.29, n.2, p. 203–213, 1999.

GARAY, R. M.; MacDONALD, F.; ACEVEDO, M. L.; CALDERÓN, B.; ARAYA, J.M. 2009. Particleboard Made with Crop Residues Mixed with Wood from Pinus Radiata. *BioResources*, v. 4, n. 4, p. 1396–1408, 2009.

GINDL, W. H.; GUPTA, S.; GRUNWALD, C. Lignification of Spruce Tracheids Secondary Cell Walls Related to Longitudinal Hardness and Modulus of Elasticity Using Nano-Indentation. *Canadian Journal of Botany*, v. 80, n.10, p. 1029–1033, 2002.

GINDL, W.; ZARGAR-YAGHUBI; F.; WIMMER, R. Impregnation of Softwood Cell Walls with Melamine- Formaldehyde Resin. *Bioresource Technology*, v. 87, p. 325–330, 2003.

GINDL, W.; SCHOBERL, T. The Significance of the Elastic Modulus of Wood Cell Walls Obtained from Nanoindentation Measurements. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v.35, n.12, p. 1345-1349, 2004.

HOLZER, S. M.; LOFERSKI, J. R.; DILLARD, D. A. A Review of Creep in Wood: Concepts Relevant to Develop Long-Term Behavior Predictions for Wood Structures. *Wood and Fiber Science*, v.21, n.4, p.376–392, 1989.

INFOR. 2019. Plantaciones Forestales. Disponible en <https://ifn.infor.cl/>. Acesso 10. Oct. 2019.

MOON, R., FRIHART, C.; WEGNER, T. Nanotechnology Applications in the Forest Products Industry. *Forest Products Journal*, v.56, n.5, p.4–10, 2006.

MOON, R.; JAKES, J.; BEECHER, J.; FRIHART, C.; STONE, D. Relating Nanoindentation to Macroindentation of Wood. 2009, Proceedings of the Advanced Biomass Science and Technology for Bio- Based Products, Beijing, China. p.145-159

MOORE, J. Growing Fit-for-Purpose Structural Timber What Is the Target and How Do We Get There? New Zealand Journal of Forestry, v.57, n.3, p.17–24, 2012.

NAVI, P.; SANDBERG, D. Thermo-Hydro-Mechanical Processing of Wood. New York: EPFL Press. 2011.

OLIVER, W.; PHARR, D. G. An Improved Technique for Determining Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments. Journal of Material Research, v.7, n.6, p.1564–1583, 1992.

SADATNEZHAD, S.H.; KHAZAEIAN, A.; SANDBERG, D.; TABARSA, T. Continuous Surface Densification of Wood: A New Concept for Large-Scale Industrial Processing. BioResources, v.12, n.2, p. 3122–3132, 2017.

SALMÉN, L.; HAGEN, D. Viscoelastic Properties. In: MARK, R.; HABEGER, C., BORCH Jr. J.; Lyne, M. B. Handbook of Physical Testing of Paper. New York: Marcel Dekker Inc, 2000. p. 77–113.

TANGUY, M.; BOURMAUD, A.; BALEY, C. Plant Cell Walls to Reinforce Composite Materials: Relationship between Nanoindentation and Tensile Modulus. Materials Letters, v.167, p.161–164, 2016.

TZE, W. T.; WANG, S.; RIALS, T. G.; PHARR, G. M.; KELLEY, S.S. Nanoindentation of Wood Cell Walls: Continuous Stiffness and Hardness Measurements. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, v.38, n.3, p. 945–953, 2007.

WANG, S.; SEUNG-HWAN, L.; TZE, W.; PHARR, G.; RIALS, T. Investigating Nano-Mechanical Properties of the Wood and Its Composites by Continuous Nanoindentation, 2006, Proceedings of the 8th Pacific Rim Bio-Based Composites Symposium. p. 328–33.

WATT, M. S.; TRINCADO, G. Modelling the Influence of Environment on Juvenile Modulus of Elasticity in Pinus Radiata Grown in Chile.” Forest Ecology and Management, v.400, p. 238-245, 2017.

WIMMER, R.; LUCAS, B. Comparing Mechanical Properties of Secondary Cell Wall and Cell Corner Middle Lamella in Spruce Wood. IAWA Journal, v.18, p.77–88, 1997.

WIMMER, R.; LUCAS, B.; OLIVER, W.C.; TSUI, T. Y. Longitudinal Hardness and Young’s Modulus of Spruce Tracheid Secondary Walls Using Nanoindentation Technique. Wood Science and Technology, v. 31, p.131–141, 1997.

YING, L.; KRETSCHMANN, D. E.; BENDTSEN, B.A. Longitudinal shrinkage in Fast-Grown Loblolly Pine Plantation Wood. Forest Products Journal, v. 44, n.1, p.58–62, 1994.

ZHANG, S. Wood Specific Gravity-Mechanical Properties Relationship at Species Level.
Wood Science and Technology, v.31, p.181–191, 1997.