

CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO MECÁNICAS DE ESPECIES, PINO (*Pinus patula*) Y TORNILLO (*Cedrelinga cateniformis*) PROVENIENTES DEL PERÚ UTILIZANDO TECNICAS NO DESTRUCTIVAS

CHARACTERIZATION OF THE PHYSICAL MECHANICS PROPERTIES OF THE PERUVIAN SPECIES, PINO (*Pinus patula*) AND TORNILLO (*Cedrelinga cateniformis*) BY USING NON DESTRUCTIVES TECHNIQUES

¹Yoza L., ²Baradit E. & ³Acevedo M.

Resumen

El objetivo del presente trabajo, fue la determinación de las propiedades físico mecánicas de 2 especies de maderas de bosques peruanos el pino patula y el tornillo, utilizando métodos no destructivos de ultrasonido, especies maderables usadas en estructuras de madera. En el cálculo de estructuras a nivel de ingeniería, comúnmente se usa la información de las propiedades básicas como el módulo de elasticidad de flexión, módulo de compresión paralela y módulo de cizallamiento longitudinal. En los últimos años gracias al avance alcanzado con los métodos no destructivos de ultrasonido se han podido determinar con mas facilidad los módulos de elasticidad en las otras direcciones como, E(RR); E(TT), y de cizallamiento G(RL), G(TR) permitiendo, con esta información, mejorar el diseño de estructuras y la reducción de costos en materiales. En el presente trabajo, usando el equipo de ultrasonido Parametric PR 5800 y transductores con frecuencia de 1MHz se caracterizaron las 2 especies mencionadas. Para lo cual, primeramente se midieron las velocidades de propagación de las ondas ultrasónicas tanto longitudinales como transversales en las direcciones principales y luego se calcularon los módulos elásticos respectivos obteniéndose valores comparables con los obtenidos en las pruebas mecánicas tradicionales, siendo esta la primera vez que se obtienen en el Perú con este método.

Palabras claves: Maderas peruanas, ultrasonido, módulos de elasticidad.

Abstract

The objective of this study was the determination of the physical mechanics properties of 2 species of Peruvian forest, Pino patula and Tornillo using non-destructive methods, species used very common in the design of wood structures.

The structures design at the level of engineering commonly uses the information on the basic properties as the transverse elasticity module, module compression and shearing module. In recent years thanks to the advances achieved with ultrasound acoustic non-destructive methods have been able to determine the modulus of elasticity in other directions such as, E (RR); (E) (TT), G (RL), G (TR) allowing improving the design of structures managing the reduction of costs in materials. In this paper using a Parametric PR 5800 Ultrasound 1 MHz frequency equipment, to characterize these 2 species which were first measured velocities of propagation of longitudinal and transverse acoustic waves in the main directions and then calculated the elastic respective elastic modules obtaining values comparable with those obtained in traditional mechanical tests. Point out, that is first time that we get in Peru with this method.

Key words: Peruvian Woods, ultrasound, elastic modulus.

1. Introducción

El conocimiento de las propiedades físico-mecánicas de la madera juega un rol importante en el momento de determinar su uso tanto en la industria de la construcción como en la de muebles. En este sentido se hace cada vez más necesario mejorar el conocimiento de las propiedades físico-mecánicas de las especies de nuestros bosques por un lado para optimizar el uso del recurso

y por otro lado para hacer más competitiva la industria maderera nacional. Para lo cual, haremos uso de las técnicas acústicas no destructivas y pruebas mecánicas tradicionales para caracterizar las especies pino patula y tornillo. En este sentido, el pino (*Pinus patula*) es una especie que viene introduciéndose en el mercado por lo cual presenta un interés creciente para su explotación. La otra madera es tornillo (*Cedrelinga cateniformis*) especie muy utilizada en el diseño de estructuras la cual servirá

¹Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú. E-mail: lyoza@lamolina.edu.pe

²Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad del Bío Bío, Concepción, Chile.

³Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

como referencia comparativa en el presente estudio, y valorar el uso del pino como madera estructural.

Pino (*Pinus patula*)

Esta especie crece en las formaciones vegetales como el bosque húmedo o muy húmedo montano bajo. En su distribución natural forma parte de los bosques nublados y asociado con las especies: *Pinus ayacahuite*, *Pinus michoacana*, *Pinus lumholtzii* y *Pinus leiophylla*. En Colombia y otros países donde se ha introducido la especie, ha presentado un excelente desarrollo, convirtiéndose en una especie maderable y útil para programas de reforestación en zonas altas. En el Perú se encuentran en el Departamento de Cajamarca. Es un árbol de 10 a 25m de altura total, de corteza escamosa y roja, sobre todo en la parte superior del tronco, el tallo es generalmente recto, con trozas comerciales entre 10 y 20 m de longitud y diámetros entre 25 a 50cm. Las características de la madera son:

En condición seca al aire la albura es de color blanco amarillento y el duramen pardo amarillento a pardo marrón. Anillos de crecimiento no diferenciados. Grano recto, textura fina y veteado en arcos superpuestos y bandas paralelas.

A nivel macro y microscópico el parénquima es ausente, traqueidas longitudinales: visibles con lupa 10x. Son células largas y anchas, con presencia de puntuaciones areoladas en su interior. Sin marcada diferencia entre traqueidas de primavera y traqueidas de verano. La longitud varía de 1150 a 4500 μm y su ancho de 30 a 60 μm . Las punteaduras en el campo de cruzamiento son del tipo pinoide. Los radios son uniseriados y fusiformes; estos últimos con presencia de canal resinífero cuya altura es de una a catorce células y de 141 a 471 μm . Presencia de canales resiníferos de dos tipos, longitudinales esparcidos entre las traqueidas longitudinales y radiales, incluidos dentro de los radios fusiformes. La figura 1 ilustra los cortes en secciones transversal y tangencial.

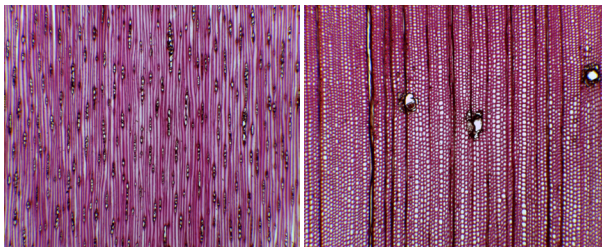


Figura 1. Vistas microscópicas de (40x) en corte transversal y longitudinal del pino.

Fuente: Laboratorio de Anatomía de la Madera UNALM

Tornillo (*Cedrelinga cateniformis*)

Esta especie se distribuye en la región amazónica de Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador y Perú en altitudes de hasta 700msnm. En el Perú se encuentran en los

Departamentos de Cuzco, Huánuco, Loreto, Madre de Dios, San Martín y Ucayali

Es un árbol de 20 a 40m de altura total y de 15 a 30m de altura comercial, fuste cilíndrico y diámetro de 0,15 a 1,2m. Su nombre científico es *Cedrelinga cateniformis*, cuyas características son:

En condición seca al aire la albura es de color rosado claro y el duramen rosado oscuro. Anillos de crecimiento no diferenciados. Grano recto a entrecruzado, textura gruesa y veteado ausente.

A nivel macro y microscópico los poros son visibles a simple vista, solitarios de forma ovalada. Porosidad difusa, mayormente solitarios de forma ovalada y escaso múltiple radiales de 2 a 4 poros. Diámetro tangencial promedio de 280 a 320 μm ; con 1 a 5 poros/ mm^2 . La longitud promedio de los elementos vasculares va de 405 a 445 μm , platina de perforación simple, punteaduras intervascuales alternas de forma redonda y apertura incluida. Parénquima visible con lupa 10x, paratraqueal vasicéntrico; con presencia de parénquima apotraqueal difuso, en corte longitudinal no estratificado. Presencia de inclusiones gomosas. Los radios visibles con lupa 10x, finos y pocos contrastados en sección radial. En sección tangencial uniseriados, con altura entre 240 y 345 μm . En sección radial homocelulares formado por células procumbentes. Con 5 a 10 radios/ mm ; no estratificados. Punteaduras radiovasculares similares a las intervascuales. Presencia de inclusiones gomosas. Las fibras son libriformes con puntuaciones simples, no estratificadas; con longitud entre 1300 y 1450 μm , diámetro total de 15 μm y espesor de pared celular de 1,4 μm . En la Figura 2 se ilustra los cortes transversal y tangencial.

Esta madera se usada en crucetas, puntales, encofrados, tijerales, vigas, viguetas, puertas, ventanas, tabiquería, machihembrado, mobiliario en general, parihuelas y carrocerías.

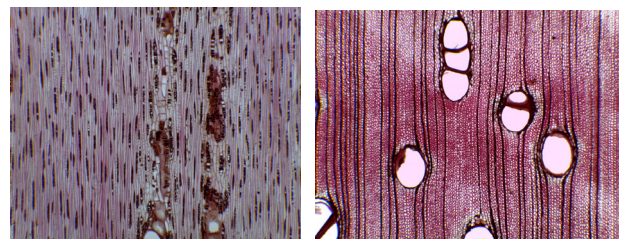


Figura 2. Vistas microscópicas (40x) en corte transversal y tangencial del tornillo.

Fuente: Laboratorio de Anatomía de la Madera UNALM

Evaluación no destructiva.

Comúnmente, la información de las propiedades físico-mecánicas proviene como resultado de la realización de diferentes mediciones tradicionales en los que una máquina de ensayos juega el papel preponderante. Sin embargo, en los últimos años se han implementado diferentes técnicas no destructivas tanto para la evaluación de los materiales, como para diferentes procesos de clasificación. Entre

estas técnicas una de las más utilizadas es la basada en la propagación de ondas mecánicas de diferente frecuencia, fundamentalmente en la banda ultrasónica. Cuya ventaja es usarlas por ejemplo, para determinar las constantes elásticas de diferentes materiales tales como en maderas (Baradit 2012, Kranitz 2012) y también en hormigón y morteros (Rodríguez 2003, Lawson *et al.* 2011).

En particular los módulos de elasticidad de Young (E) se obtienen para las tres direcciones principales del árbol por medio de la siguiente ecuación.

$$E_i = \rho v^2 \quad (1)$$

Donde $i=1,2,3$ indica cada uno de los ejes principales y V es la velocidad de propagación longitudinal del pulso ultrasónico (Bucur 2006). Los módulos de cizallamiento G se obtienen por medio de una expresión similar.

$$G_{ij} = \rho v^2 \quad (2)$$

Donde $i \neq j$, V es la velocidad de propagación del pulso con polarización transversal.

2. Materiales y métodos

Muestras.

Las muestras fueron seleccionadas de 5 árboles por especie de pino y tornillo. Las probetas para las pruebas mecánicas fueron preparadas de acuerdo con la norma ASTM D143 (2008). Las pruebas de flexión estática se efectuaron con un método secundario con las dimensiones de las muestras 25x25x410mm con un total de 6 muestras para el pino y 8 para el tornillo. Las pruebas de compresión paralela se hicieron muestras de dimensiones 50X50X200mm, con un total de 6 muestras para el pino y 8 para el tornillo. Para las pruebas de cizallamiento se usaron 9 muestras para el pino y 16 para el tornillo respectivamente.

Las muestras para las pruebas de ultrasonido fueron tomadas conjuntamente con las de las pruebas mecánicas preparándose cubos de 30x30x30 mm orientados en las

direcciones L.R.T de los 5 árboles escogidos por especie obteniéndose 19 muestras para la especie Pino y 18 para el tornillo.

Equipos

El montaje experimental se muestra en el diagrama de bloque de la figura 3 y consiste en un generador de ultrasonido marca Panametric PR 5800 y un osciloscopio marca Tektronic. Los transductores utilizados fueron de 1 MHz de frecuencia tanto para la generación de ondas de polarización longitudinal como transversal.

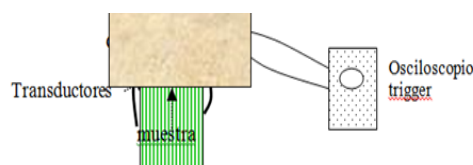


Figura 3. Disposición del equipamiento de medición.

3. Resultados y Discusión

Los resultados de las velocidades en las distintas direcciones son mostrados en las tablas 1 y 2. El comportamiento de las velocidades es muy similar en ambas especies cumpliéndose la relación típica $V(LL) > V(RR) > V(TT)$. Otras típicas relaciones están vinculadas con la simetría de las velocidades de corte $V(LR) = V(RL)$, $V(LT) = V(TL)$ y $V(RT) = V(TR)$. Estas igualdades como resultado de las mediciones experimentales son obviamente aproximadas (tabla 1 y 2).

Podemos señalar para el caso del tornillo que los coeficientes de variación para las velocidades V_{TT} , V_{TL} y V_{LT} son significativamente más altos comparados con el pino, posiblemente porque fueron extraídas de bosque naturales.

Tabla 1. Velocidad de la onda longitudinal y transversal para el *Pinus patula*.

Velocidad (m/s)	V_{LL}	V_{RR}	V_{TT}	V_{RL}	V_{TL}	V_{TR}	V_{LR}	V_{LT}	V_{RT}
media	4578	2022	1257	1523	1335	541	1603	1341	537
DS.	231	120	27	82	113	47	125	86	35
CV.(%)	5,0	5,9	2,2	5,4	8,4	8,7	7,8	6,4	6,5

Tabla 2. Velocidad de la onda longitudinal y transversal para el *Cedrelinga cateniformis*.

Velocidad (m/s)	V_{LL}	V_{RR}	V_{TT}	V_{RL}	V_{TL}	V_{TR}	V_{LR}	V_{LT}	V_{RT}
media	4495	1860	1231	1411	1204	676	1330	1205	696
DS.	247	58	156	75	160	53,0	71	137	40
CV.(%)	5,5	3,1	12,7	5,3	13,2	7,8	5,4	11,3	5,7

Los resultados de las velocidades de polarización longitudinal muestran una anisotropía elástica en relación a los tres ejes principales similar es para ambas especies. En el caso del pino 1:2,3:3,6 mientras que para el tornillo 1:2,4:3,6. Dichos valores de anisotropía son levemente más altos que para maderas coníferas (softwoods) chilenas pero más bajos que para latifoliadas (hardwoods), (Baradit 2012).

En las tablas 3 y 4 se presentan los valores de los módulos elásticos tanto para el pino y tornillo. Los módulos de elasticidad de Young se muestran muy similares para ambas especies y sólo en la dirección radial se observa una pequeña diferencia, mientras tanto, para los módulos de corte la diferencia entre ambas especies es más significativa.

Tabla 3. Modulo de elasticidad y cizallamiento para el *Pinus patula*.

	Densidad (kg/m ³)	E _{LL} (MPa)	E _{RR} (MPa)	E _{TT} (MPa)	G _{LR} (MPa)	G _{TL} (MPa)	G _{TR} (MPa)
media	508	10780	2077	805	1240	908	153
DS.	55,4	2087,2	98,8	10,5	139,9	85,0	34,6
CV.	10,9	19,4	4,8	1,3	11,3	9,4	22,6

Tabla 4. Modulo de elasticidad y cizallamiento para el *Cedrelinga cateniformis*.

	Densidad (Kg/m ³)	E _{LL} (MPa)	E _{RR} (MPa)	E _{TT} (MPa)	G _{LR} (MPa)	G _{LT} (MPa)	G _{RT} (MPa)
media	528	10702	1831	814	997	777	251
DS.	28,9	1321,2	188,3	216,6	118,3	150,2	39,2
CV.	5,3	12,3	10,3	26,6	11,9	19,3	15,6

En la tablas 5 y 6 se muestran los valores de las propiedades mecánicas para ambas especies.

Señalándose los resultados de las pruebas en flexión estática: pl, esfuerzo al límite proporcional, (proportional limite stress); MOR, módulo de ruptura (modulus of rupture); MOE, módulo de elasticidad (modulus of

elasticity) y las de compresión paralela al grano: pl_L, esfuerzo limite proporcional (proportional limite stress longitudinal), MOR_L, módulo de ruptura (modulus of rupture longitudinal); MOE_L, módulo de elasticidad (modulus of elasticity longitudinal) y además del cizallamiento paralelo al grano, SHEAR_L (shear strenght, longitudinal).

Tabla 5. Propiedades mecánicas del *Pinus patula*.

	Flexión Estática, M(12%) (MPa)			Compresión, M(16%) (MPa)			Cizallamiento, M(14%) (MPa)
	pl	MOR	MOE	pl _L	MOR _L	MOE _L	Cizallamiento _L
media	72	110	8012	19	25	8453	10
SD.	25,5	33,7	1999,2	2,7	3,2	1858,6	2,3
CV.(%)	35,6	30,8	24,9	14,2	12,7	22,0	22,8

Tabla 6. Propiedades mecánicas del *Cedrelinga cateniformi*.

	Flexión Estática, M(12%) (MPa)			Compresión, M(17%) (MPa)			Cizallamiento, M(12%) (MPa)
	pl	MOR	MOE	pl _L	MOR _L	MOE _L	Cizallamiento _L
media	35	58	8268	22	30	10404	10
SD.	6,2	9,45	1198,3	1,9	2,5	1455,5	1,2
CV.(%)	17,5	16,2	14,5	8,7	8,2	14,0	11,0

Se observa que para los ensayos de flexión los módulos de elasticidad son similares para ambas especies, siendo para el tornillo más alto en solo unos 200 MPa, mientras que el módulo de ruptura para el tornillo es casi la mitad que para el pino. En compresión paralela, el módulo de elasticidad para el tornillo resultó unos 2000 MPa mayor que para el pino, mientras que los módulos de ruptura son similares en ambas especies.

4. Conclusiones

El comportamiento de las velocidades es muy similar en ambas especies cumpliéndose la relación típica V(LL)>V(RR)>V(TT) y cumpliendo las relaciones de simetría de las velocidades de corte V(LR)=V(RL), V(LT)=V(TL) y V(RT)=V(TR). Podemos señalar que para tornillo que los coeficientes de variación para las

velocidades V_{TT} , V_{TL} y V_{LT} son significativamente más altos comparados con el pino, posiblemente porque fueron extraídas de bosque naturales. Mostrando velocidades polarizadas longitudinalmente anisotropías elástica de 1:2,3:3,6 y 1:2,4:3,6. para el pino y tornillo respectivamente. Los módulos de elasticidad de Young se muestran muy similares para ambas especies, mientras tanto, para los módulos de corte la diferencia es más significativa.

En ensayos mecánicos de flexión los módulos de elasticidad son similares para ambas especies, siendo para el tornillo mayor en 200 MPa, mientras que el módulo de ruptura para el tornillo es casi la mitad que para el pino. En compresión paralela, el módulo de elasticidad para el tornillo resultó 2000 MPa mayor, mientras que los módulos de ruptura son similares en ambas especies.

En estudios futuros se recomienda la medición de los coeficientes de Poisson así como la evaluación de maderas de tornillo perteneciente a plantación

5. Literatura citada

ASTM (American Standard Test Methods) D143. Standard Test Methods. 2008. for small clear specimens of timber.

Baradit, E. and Niemz, P. 2012. Some Elastic Constants of the Chilean Wood Species: tepa, olivillo, laurel, lenga, alerce and manio using ultrasound techniques. Wood Research 57(3):497-504.

Baradit, E.; Keunecke, D. and Niemz, P. 2012. Stiffness Moduli of various extraneous species determined with ultrasound. Wood Research 57(1):173-178.

Bucur, V. 2006. Acoustic of Wood, Springer. Berlin.

Kranitz, K.; Baradit E.; Dobrowolska E.; Plotze M. and Niemz, P. 2012. Untersuchungen zu Eigenschaften von Mooreiche. Holztechnologie 53(1):11-17.

Lawson, I.; Danso H. C.; Odoi, H. C.; Adjei, C. A.; Quashie, I. I.; Mumuni, I. I. and Ibrahim, I. S. 2011. Non-Destructive evaluation of concrete using ultrasound pulse velocity. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 3(6):499-504.

Rodríguez, G. S. y Pazini, E. 2003. Módulo de elasticidad estático del hormigón determinado por medio de pruebas de ultrasonido. Materiales de Construcción, 53 (271-272): 47-55.

Rosell, J. R. y Cantalapiedra, I. R. 2011. Método simple para determinar el módulo de Young dinámico a partir de una excitación por impacto aplicado a morteros de cal y cemento. Materiales de Construcción, 61 (301): 39-48.