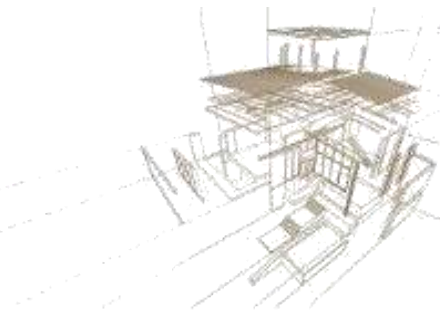




CLEM
2019 | 18 al 20 de noviembre
Hotel Cottage
Montevideo - Uruguay



4º CONGRESO
LATINOAMERICANO
DE ESTRUCTURAS
DE MADERAS

TÓPICO: X. Educación

**ENSAYOS NO DESTRUTIVOS PARA ESTIMAR LAS CARACTERÍSTICAS
FÍSICO-MECÁNICAS DE LAS MADERAS BRASILEÑAS**

**NON-DESTRUCTIVE TESTS TO ESTIMATE PHYSICAL-MECHANICAL CHARACTERISTICS
OF BRAZILIAN WOODS**

Costa Alves, Rejane¹; V. Mantilla Carrasco, Edgar²

¹Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil ;

²Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

Resumen

Con la devastación del bosque ocasionó la preocupación por la utilización de maderas correctamente caracterizadas y el desarrollo de métodos y análisis más rápidos, que generasen menores pérdidas. En este contexto, se introducen los métodos no destructivos para la evaluación del material. El presente trabajo trata de la evaluación de la madera por métodos no destructivos. Se utilizaron los métodos locales (resistencia a la penetración y resistencia a la perforación) y globales (propagación de ondas). Para la validación de los ensayos no destructivos se realizaron ensayos destructivos de densidad aparente, compresión, cizalla y dureza Janka, en las tres direcciones de los cuerpos de prueba, longitudinal, tangencial y radial, utilizando la norma NBR 7190 (1997). Todos los ensayos destructivos se han corregido para el contenido de humedad del 12%. Para las correlaciones se adoptaron para siete maderas: angelim pedra (*Hymenolobium petraeum*), angelim vermelho (*Dinizia excelsa*), castanheira (*Bertholletia excelsa*), garapa (*Apuleia leiocarpa*), muiracatiara (*Astronium lecointei*), pequi (*Caryocar villosum*) e roxinho (*Peltogyne discolor*), en el intervalo de densidad de 650 a 1150 kg.m⁻³, media a alta densidad. Para la estimación de la densidad aparente, dureza Janka y tensión de cizallamiento, el método no destructivo más indicado fue el método de resistencia a la perforación. Para la tensión de cizalla en la dirección paralela a las fibras, el método que presentó mejor aproximación estadísticamente fue el de penetración en la madera. Finalmente, para el módulo de elasticidad, el ensayo con propagación de ondas longitudinales fue más eficiente.

Palabras clave: Ensayos no destructivos, madera, propiedades físico-mecánicas.

Abstract

With the devastation of the forest caused the concern for the use of properly characterized woods and development of methods and faster analyzes, which generated lower losses. In this context, non-destructive methods for material evaluation are introduced. This study deals with assessment of wood by non-destructive methods. Local testing methods (penetration resistance and puncture resistance) and global testing methods (wave propagation) were used. For validation of the non-destructive methods, destructive testing of apparent density, compression, shear strength and Janka hardness were performed in the three directions of the test specimens, longitudinal, tangential and radial. All the destructive tests were corrected for a moisture content of 12%. Seven types of wood were adopted for the correlations: angelim pedra (*Hymenolobium petraeum*), angelim vermelho (*Dinizia excelsa*), castanheira (*Bertholletia excelsa*), garapa (*Apuleia leiocarpa*), muiracatiara (*Astronium lecointei*), pequi (*Caryocar villosum*) e roxinho (*Peltogyne discolor*), in the density range of 650 to 1150 kg.m⁻³. For estimate of apparent density, Janka hardness and shear strength, the most recommended non-destructive method was the puncture resistance test. As for shear strength in the direction parallel to the grain, the method that showed best statistical approximation was that of penetration in the wood. Finally, for the modulus of elasticity, the analysis with longitudinal wave propagation was more efficient.

Keywords: Non-destructive testing, wood, physico-mechanical properties.

INTRODUCCIÓN

La madera es un material heterogéneo, anisotrópico, con gran resistencia mecánica y baja densidad, en comparación con otros materiales. Sin embargo, con la devastación del bosque ocasionó la preocupación por la utilización de maderas correctamente caracterizadas y el desarrollo de métodos y análisis más rápidos, que generasen menores pérdidas. En este contexto, se introducen los métodos no destructivos para la evaluación del material.

La aplicación de técnicas no destructivas (NDT) viene siendo difundida desde la década de 1960 (DEL MENEZZI et al., 2010). La utilización de métodos no destructivos para caracterizar las propiedades físicas y mecánicas de la madera está siendo utilizada de forma creciente con el propósito de eliminar la extracción del cuerpo de prueba en análisis de campo y la rapidez en sus verificaciones.

En Brasil, cuando se refiere a métodos no destructivos para evaluación de madera, generalmente se asocia a técnicas de ultrasonido (STANGERLIN et al., BALLARIN y NOGUEIRA (2005), CARRASCO y AZEVEDO JÚNIOR (2003), GONÇALEZ et al. (2001), MINÁ et al. (2004), del MENEZZI et al. (2010), STANGERLIN et al., CANDIAN y SALES (2009) y OLIVEIRA et al. (2006), LATORRACA et al. (2011)). Sin embargo, la preocupación por el desarrollo de otras metodologías y técnicas no destructivas está ganando fuerza. Por el hecho de que no es necesario la toma de muestras de madera de la estructura. Los ensayos con los métodos de resistencia a la penetración y de perforación se han destacado en la literatura actualmente. El ensayo con el aparato de emisión acústica es una técnica que está empezando a ser abordada recientemente para la madera, y tiene

dificultades de ser empleado en función de la necesidad de altas frecuencias, y así generar gran atenuación.

Objetivo general

Determinar propiedades físicas y mecánicas en cuerpos de prueba de madera, por medio de ensayos no destructivos locales y globales y comparar sus resultados con ensayos destructivos.

Objetivos específicos

- Determinar las correlaciones entre los resultados de los ensayos no destructivos con las propiedades de densidad aparente, módulo de elasticidad estática, tensión de cizalla y dureza Janka en la dirección longitudinal, y normal las fibras;
- Verificar qué tipo de ensayo no destructivo es más indicado para estimar cada propiedad de la madera;

MATERIAL Y MÉTODOS

Los ensayos destructivos y no destructivos se realizaron en el Centro de Investigación Avanzada de Madeira y nuevos Materiales (CPAM3), de la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG). Las maderas ensayadas fueron angelim piedra (*Hymenolobium petraeum*), angelim rojo (*Dinizia excelsa*), castaña (*Bertholletia excelsa*), garapa (*Apuleia leiocarpa*), muiracatiara (*Astronium lecointei*), pequi (*Caryocar villosum*) y roxinho (*Peltogyne discolor*). De cada especie se han confeccionado siete cuerpos de prueba para cada dirección analizada (longitudinal, y normal a las fibras).

Los CPs utilizados para los ensayos no destructivos también se utilizaron para determinar el contenido de humedad, densidad aparente, módulo de elasticidad a compresión, resistencia al cizallamiento y dureza Janka. Los procedimientos de ensayo para determinación de características mecánicas siguieron las prescripciones de la NBR 7190 de la Asociación Brasileña de Normas Técnicas - ABNT (1997) y los estándares rigurosos de los requisitos y procedimientos del sistema de calidad implantados en los laboratorios del Centro de Investigación Avanzado de Madeira y nuevos Materiales (CPAM3).

Para la determinación de la resistencia a la penetración se utilizó el aparato Pilodyn 6J, de la marca PROCEQ S.A. Ya para la resistencia a la perforación se utilizó el aparato resistógrafo, modelo F400, de la marca IML. La medición de la resistencia, o amplitud de perforación se efectúa mediante la determinación de la cantidad de energía necesaria para realizar el agujero. En el que se basa en la medida de la energía necesaria para mantener la velocidad de perforación constante. Esta energía necesaria es la amplitud de perforación de la aguja (AP). El principio de propagación de ondas ultrasónicas para correlacionar o estimar las propiedades de la madera fue realizado con el aparato de emisión acústica con la frecuencia de 2 MHz. El aparato de emisión acústica está compuesto por transductores, preamplificadores y procesadores de señal que permite detectar sonidos de mayores frecuencias e intensidades más bajas.

Se observa que los ensayos de propagación de la onda se realizaron a partir de dos transductores, que se acoplan en las secciones transversales del CP con ayuda de un gel.

El transductor emite la señal de la onda, que es captada por el otro transductor (transductor receptor).

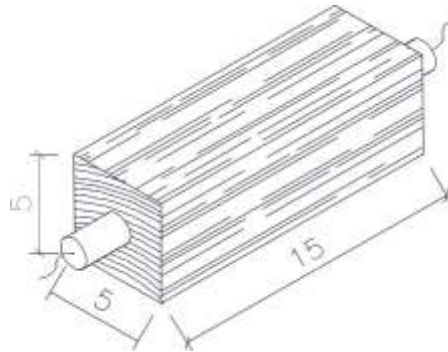


FIGURA 1 -Esquema de la prueba de propagación de onda por método directo de transmisión de señal.

Así como muchos autores que consideran los valores de constante de rigidez (CR) aproximados a los valores de Edin. En este trabajo se determinarán las CR en las tres direcciones longitudinal, tangencial y radial. A partir de la ecuación 1 adoptada por diversos autores (Sandoz (1990), Nogueira y Ballarin (2005), Gonçalves y Bartholomeu (2000), es posible calcular las CR de la madera conociéndose los valores de velocidad de propagación de la ola y de densidad aparente al 12% de humedad.

(1)

en que:

C.R = Constante de rigidez, MPa;

VO = Velocidad de propagación de la onda, m /

s; ρ = Densidad de la madera; kg / m³.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la TAB. 1 se encuentra el análisis de densidad aparente a 12% de humedad, módulo de elasticidad, dureza Janka y de la tensión de cizalla en las direcciones longitudinal, tangencial y radial. Los números en negrita son los promedios, los números en paréntesis la desviación estándar, y las letras son parámetros asignados por la prueba de Tukey al 5% de significancia. Las medias seguidas por la misma letra, en la misma línea, indican que no difieren entre sí. Se realizó también el análisis entre las direcciones longitudinal, tangencial y radial para verificar si las mismas diferencian entre sí.

Para el módulo de elasticidad y la tensión de cizallamiento, aun conociendo el comportamiento diferente entre las direcciones radial y tangencial y consecuentemente diferencias de comportamientos de estas dos direcciones en cuanto a comportamientos físicos y mecánicos de la madera, estadísticamente los resultados en la dirección radial y tangencial, no se se diferenciaron para estas dos propiedades. Mientras que para la dureza Janka, todas las direcciones son estadísticamente iguales. Contrariando los diferentes aspectos anatómicos, físicos y químicos entre estas tres direcciones.

Tabla 1 - Valores medios de las características de las maderas (medias seguidas por la misma letra en la misma línea, no difieren entre sí, por el test de Tukey al 5% de probabilidad)

		Castanheira	A. pedra	Muiracatiara	Pequi	Roxinho	Garapa	A. vermelho
Densidad aparente (kg.m ⁻³)		696 D (35)	761 C (42)*	780 C (63)	783 C (38)	933 B (23)	946 B (17)	1131 A (20)
Módulo de elasticidad (MPa)			12077			12024A		
	EL	9007 CD (1173)	AB (1174)	8729 CD (923)	7345 D (1553)	B (1999)	12258A (1448)	9909 BC (808)
	ET	678 D (169)	750 CD (94)	788 CD (267)	821 CD (84)	911 BC (85)	1048 AB (169)	1228 A (92)
	ER	969 C (78)	1052 BC (226)	1055 BC (152)	911 BC (85)	1486 A (275)	1483 A (114)	1600 A (237)
Dureza Janka (MPa)						116,36		
	DL	55,29E (4,21)	73,17D (10,99)	61,82DE (13,58)	70,58 D (7,54)	B (8,24)	101,47C (4,62)	154,06A (5,19)
	DT	44,00 D (3,47)	61,50 C (10,62)	67,56 C (9,23)	71,47 C (6,49)	107,25 (6,97)	103,52 B (5,59)	131,61 A (6,28)
	DR	45,70 D (1,85)	70,64 C (11,38)	65,85 C (16,08)	70,55 C (11,67)	108,52 (9,67)	109,09 B (4,68)	129,00 A (8,71)
Tensión de cizallamiento (MPa)						10,61		
	τ _{CL}	13,45 C (1,1)	13,53 BC (2,22)	15,54 C (1,78)	13,79 C (1,72)	21,74 A (1,13)	17,71 BC (0,29)	19,35 AB (2,47)
	τ _{CT}	5,13 C (0,92)	7,51 C (3,13)	6,23 C (0,71)	6,13 C (1,16)	AB (1,92)	7,63 BC (1,43)	12,04 A (4,5)
	τ _{CR}	5,61 C (0,61)	6,09 C (2,34)	7,66 C (1,23)	7,63 C (1,83)	13,42 A (2,97)	8,68 BC (1,04)	11,85 AB (4,37)

A. rojo = Ángel rojo; A. pedra = Angelín piedra. EL, ET y ER son módulos de elasticidad longitudinal, tangencial y radial, respectivamente. DL, DT y DR son dureza Janka longitudinal, tangencial y radial, respectivamente. τ_{CL}, τ_{CT} y τ_{CR} son tensiones de cizalla longitudinal, tangencial y radial, respectivamente. * Desviación estándar, en kg.m⁻³ o MPa.

En la TAB. 2 se muestran los coeficientes de determinación entre el IP y las propiedades de la madera. Se observa que para las maderas analizadas, el método de penetración mostró ser eficiente para inferir la densidad aparente, la dureza Janka y la tensión de cizallamiento. Se destaca que para tensión de cizalla en las direcciones tangencial y radial, y para dureza Janka en la dirección radial, el método presenta bajo coeficiente de determinación. Se resalta que el IP no se hace adecuado para la determinación del Eest, ya que sus coeficientes de determinación fueron bajos.

Para la dureza Janka y la resistencia a la penetración, los valores de R^2 fueron del 82%, 72% y 42% para las direcciones longitudinal, tangencial y radial, respectivamente. En cuanto a la tensión de cizallamiento, así como en la dureza Janka y densidad aparente, hubo una relación alta en la dirección longitudinal ($R^2 = 79\%$), sin embargo presentó bajos coeficientes para las direcciones tangenciales ($R^2 = 36\%$) y radial ($R^2 = 35\%$).

Tabla 2 - Análisis de regresión entre el índice de penetración y las propiedades de la madera

Propiedades	Direção								
	Longitudinal			Tangencial			Radial		
	R ² ajust (%)	R ² (%)	p-valor	R ² ajust (%)	R ² (%)	p-valor	R ² ajust (%)	R ² (%)	p-valor
ρ a 12%	75	76	0,000	68	68	0,000	58	59	0,000
D.J.	81	82	0,000	72	72	0,000	41	42	0,000
Eest	15	17	0,004	44	45	0,000	17	18	0,003
τ _c	79	79	0,000	35	36	0,000	34	35	0,000

ρ a 12% = densidad aparente al 12% de humedad. D.J. = dureza Janka. Eest = Módulo de elasticidad estática. τ_c = tensión de corte.

La TAB. 3 muestra el coeficiente de determinación entre la AP y las propiedades de la madera. Se observa que para las maderas analizadas, el aparato resistógrafo muestra ser un equipo eficiente para la determinación de la densidad aparente, dureza Janka y tensión de cizallamiento. Destacando que para tensión de cizalla el aparato se mostró moderadamente eficiente. Se resalta que el aparato resistógrafo no se hace adecuado para la determinación del Eest, ya que sus coeficientes de determinación fueron bajos.

Tabla 3- Análisis de regresión entre la amplitud de perforación (%) y las propiedades de la madera

Propiedades	Direção								
	Longitudinal			Tangencial			Radial		
	R ² ajust	R ²	p-valor	R ² ajust	R ²	p-valor	R ² ajust	R ²	p-valor
ρ a 12%	80	80	0,000	90	91	0,000	92	92	0,000
D.J.	90	90	0,000	89	89	0,000	85	85	0,000
Eest	9	11	0,021	44	45	0,000	60	61	0,000
τ _c	58	59	0,000	74	75	0,000	60	61	0,000

ρ a 12% = densidad aparente al 12% de contenido de humedad. D.J. = dureza Janka. Eest = Módulo de elasticidad estática. cuc = tensión de corte. R^2 = coeficiente de determinación (%). R^2 ajust = coeficiente de determinación ajustado (%).

El análisis de regresión entre los Edin y Eest en la dirección longitudinal (TAB 4), indicó una moderada correlación, determinado por el coeficiente de determinación (R^2) del 53%. Este resultado está justificado por la heterogeneidad estructural del leño en la dirección longitudinal. Sin embargo, en las direcciones tangencial y radial, se observó mayor correlación entre los módulos y las constantes de rigidez, de acuerdo con los valores del R^2 obtenidos del 94% y del 92% para las direcciones tangencial y radial, respectivamente.

Tabla 4 - Análisis de regresión entre el módulo de elasticidad estática y la constante de rigidez en cada dirección analizada

Dirección	R^2 ajustado	R^2	p-valor
Longitudinal	53,2	52,2	0,000
Tangencial	94,4	94,2	0,000
Radial	92,0	91,8	0,000

R^2 - coeficiente de determinación, en%.

5 CONCLUSIÓN

El presente trabajo permitió concluir con base en 147 CPs y utilización de 3 técnicas no destructivas, que:

- Hay una relación entre la densidad aparente de la madera y la velocidad de propagación de la onda en medios finitos;
- Para determinar la densidad aparente, en orden de significancia, los métodos que mejor estimaron fueron: el de resistencia a la penetración y resistencia a la perforación en la madera.
- Para estimar el E estático el método de propagación de ondas ultrasónicas con utilización del aparato de emisión acústica se mostró eficiente. Los aparatos no destructivos locales no se mostraron como buena herramienta para determinar esta propiedad;
- Para evaluar la dureza Janka, en orden de significancia, los métodos que mejor respondieron estadísticamente fueron: resistencia a la perforación y resistencia a la penetración. La propagación de onda no se mostró una herramienta eficiente para estimar esta propiedad;
- Para la estimación de la tensión de cizallamiento, los métodos que mejor respondieron estadísticamente, en orden de significancia, para la dirección longitudinal fueron a la resistencia a la penetración seguida de la resistencia a la perforación. Para la dirección tangencial y radial sólo el método de resistencia a la penetración. La propagación de onda no se mostró una herramienta eficiente para estimar esta propiedad;