

CARACTERIZACION MECÁNICA DE MADERA RECONSTITUIDA MÓDULO DE ELASTICIDAD DE TABLEROS DE PARTÍCULAS DE MADERA

EVALUADO CON METODOS NO DESTRUCTIVOS

Sotomayor Castellanos, J.R.¹

RESUMEN

La confección de productos de madera reconstituida es la tendencia tecnológica contemporánea en Ingeniería de la Madera. El resultado de esta corriente es la aparición en el mercado de productos industriales con características tecnológicas más homogéneas y predecibles. La investigación versa sobre el estudio de Tableros de Partículas de Madera (TPM) de una fábrica del Estado de Michoacán. Los paneles fueron elaborados con una mezcla de especies de madera de *Pinus spp.*, *Abies spp.* y *Quercus spp.* utilizando una resina de tipo urea-formaldehído. Los objetivos de la investigación son: Evaluar el Módulo de Elasticidad (MOE), utilizando Métodos de Evaluación No Destructivos, comparar y relacionar estadísticamente los resultados según los diferentes métodos de evaluación empleados y proponer una clasificación para la muestra de material estudiada, conforme a la Standard ANSI A208.1. Los tres procedimientos de evaluación fueron: Vibraciones Transversales, Ondas de Esfuerzo y Flexión Estática. Estos Métodos **NO** Destructivos demostraron ser útiles en la determinación del Módulo de Elasticidad de TPM. A juzgar por su densidad, los TPM clasifican como tableros de media densidad, conforme a la Standard ANSI A208.1. Por otra parte, según la Standard ANSI A208.1, y de acuerdo con los valores de sus MOE, los TPM clasifican como tableros 1-M-3 al ser evaluados con métodos dinámicos y según el método de flexión estática, se catalogan como tableros 1-M-2. Los resultados experimentales indican igualmente que en los TPM estudiados, el MOE en la dirección transversal al sentido de la línea de producción, es superior en comparación al MOE en la dirección paralela. Finalmente, los MOEs están estadísticamente relacionados de manera importante entre sí, resultado que confirma la hipótesis fundamental para la aplicación de Métodos **NO** Destructivos (MND) en el estudio de materiales de madera.

Palabras clave: Tableros de Partículas de Madera, Densidad, Módulo de Elasticidad, Vibraciones Transversales, Ondas de Esfuerzo, Flexión Estática.

¹División de Estudios de Posgrado. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Edificio D, Ciudad Universitaria. Morelia, Michoacán, MÉXICO. ✉:madera999@yahoo.com

ABSTRACT

Wood composites and wood engineered products conception is the contemporary tendency in wood engineering. As a result, new industrial products can be found in the wood market with improved technological characteristics, more homogeneous and predictable. This research is focused in the study of a Particleboard sample from an industrial facility in the State of Michoacán. The panels were manufactured with a *Pinus spp.*, *Abies spp.* and *Quercus spp.* wood species mixture. Urea-formaldehyde resin was used as adhesive. The objectives of the research are: to evaluate the Modulus of Elasticity (MOE) using Non Destructive Evaluation (NDE) Methods; to compare and relate the studied sample statistics results up to the different methods of evaluation used, and propose a classification according to the Standard ANSI A208.1. The three NDE methods applied were: Transversal Vibrations, Stress Waves and Static Bending. After testing, the NDE demonstrated to be useful to determine the MOE of Particleboard, In agreement with sample density results, the experimental material classifies as a Medium Density Particleboard, as prescribed in Standard ANSI A208.1. According to the MOE values found, the Particleboard classifies as 1-M-3 when is evaluated with dynamic NDE. In contrast, when the Particleboard is evaluated in Static Bending, it classifies as 1-M-2, as prescribed in Standard ANSI A208.1 Also, the transversal direction with respect to the panel line of production denoted higher values of MOE, in contrast with results for the parallel direction. Finally, the MOE showed a strong statistical relationship within them. This result confirms the fundamental hypothesis concerning the NDE application in wood products research.

Keywords: Particleboard, Density, Modulus of Elasticity, Transversal Vibrations, Stress Waves, Static Bending.

INTRODUCCIÓN

La confección de productos de madera reconstituida es la tendencia tecnológica contemporánea en Ingeniería de la Madera. Esta técnica pretende resolver el inconveniente de la variabilidad en las propiedades físicas del material y la complejidad en sus singularidades constitutivas. El resultado de esta inquietud es la aparición en el mercado de productos industriales con características tecnológicas más homogéneas y predecibles, lo cual es deseable para el empleo industrial de la madera, material de origen biológico. Estas mejoras de las propiedades de la madera, se logran mediante innovadores procesos industriales, incorporando adhesivos adecuados en el ensamblado de madera de pequeñas y medianas dimensiones: Placas, astillas, fibras y partículas de madera (Smulski, 1997).

Los Tableros de Partículas de Madera (TPM), es el termino genérico para paneles manufacturados a partir de material ligno-celulosico, combinado con una resina sintética y fraguado con presión y temperatura, definición aceptada por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales, (ASTM por sus siglas en Ingles), en su Standard D-1554 (ASTM. 2000). Los TPM encuentran principalmente aplicación como productos aislantes y de armado en la industria de muebles y de la construcción (Carll, 1986; Forest Products Laboratory, 1999). Para su empleo práctico, los TPM requieren de propiedades técnicas específicas, por ejemplo la densidad (ρ) utilizada como índice de calidad y el Módulo de Elasticidad (E) aplicado en diseño de productos y estructuras. Estas particularidades pueden ser controladas en el proceso de manufactura, en oposición a las características mecánicas propias de la madera, materia prima de origen forestal.

Los procedimientos para determinar estas **cotas** fisico-mecdnicas **están** normalizados por la ASTM, en la Standard D-1037 (ASTM, 2000). Los TPM **deben** satisfacer igualmente, requisitos mínimos de calidad, asociados estos a una **clasificación** para su uso específico, por ejemplo, los requeridos por el Instituto Nacional Americano de Estándares (ANSI por sus siglas en Inglés), en la Standard A208.1 (ANSI, 1993).

El factor **fundamental** que refleja el comportamiento **mecánico** de un TPM estd intimamente ligado a las propiedades de la **materia** prima que lo constituye. El **tamaño**, **forma** y **orientacibn** espacial de las **partículas** que **forman** un Tablero de Partículas de Madera, las propiedades y **distribución** del pegamento y/o aditivos empleados, así como su **perfil** de **densidad** en la **dirección** perpendicular al plano del panel, son las variables que **más** influyen en sus características **mecánicas** (Kollmann y col. 1975; Kelly, 1977; Bodig, 2001).

Por otra parte, el comportamiento mecánico de la madera sólida denota un **carácter** fuertemente **anisotrópico**. Por ejemplo, el radio entre los **módulos** de elasticidad entre las direcciones longitudinal y **tangencial** de la madera, es de aproximadamente de 24 a 1 (Bodig y Jayne, 1993). Si la **madera** tiene un **carácter** anisotrópico en sus características **mecánicas**, esta peculiaridad puede ser incorporada al comportamiento mecánico de los TPM, pues la **madera** es su **compo-** nente principal.

Para mantener a los TPM en el mercado como un **producto** comercialmente **competitivo**, es necesario identificar su resistencia **mecánica** y sus propiedades **tecnológicas**, con el objeto de **proporcionar** al usuario de TPM las propiedades de **calidad** que identifiquen la aptitud de los TPM para usos apropiados. Sin embargo, es **notoria** la **escasa** información sobre el **Módulo** de Elasticidad de TPM en la literatura especializada.

El estudio del cardcter **anisotrópico** del comportamiento mecánico de productos de **madera** reconstituida, es un **tópico** bdsico en el campo de la **investigación** en Ciencias de la Madera. Los resultados de **investigación** demuestran que los TPM y otros materides compuestos de **madera**, como la **madera** laminada con placas, exhiben propiedades de anisotropía diferentes a los de la **madera** sólida, pero con una similitud limitada al comportamiento **elástico** correspondiente a la especie de **madera** con la cual **están** fabricados (Janowiak y col. 2001).

Respecto a la calidad **de** los TPM, el ANSI en su Standard A208.1, especifica **intervalos** para los valores de propiedades **físicas** y **mecánicas** para la **clasificación** referente a su uso industrial. Sin embargo, el ANSI no establece la **dirección** relativa en el tablero en la cual los tests y resultados **deben** presentarse (ANSI, 1993). La norma ASTM D-1037, **tampoco** establece la selección de **probetas** para determinar el Modulo de Elasticidad (MOE) respecto al **sentido** de la línea de **producción** del TPM (ASTM, 2000). Estas **normas** asumen para fines de evaluación, que los TPM son **isotrópicos** en el plano que **forman** la **dirección** paralela y transversal a la línea de **producción**.

De otta parte, McNatt (1973), propone un esquema para el recorte de probetas en TPM para **evaluación** de sus propiedades bdsicas de Ingeniería. En su método el autor sugiere seleccionar **probetas** en las direcciones transversal y **paralela** al **sentido** de la línea de **producción** del TPM. Sin embargo, sus resultados no especifican la **orientación** de la probeta. Para fines de **diseño** y **clasifi-**

cación de TPM, es necesario proporcionar información actualizada sobre características físicas y mecánicas de TPM, especificando su orientación con referencia al plano del panel y llenar así la ausencia de datos en la literatura.

Aparte de los métodos de ensayo normalizados, existe una pluralidad de procedimientos para establecer las propiedades mecánicas de la madera. Estas prácticas no están aún normalizadas, sin embargo, son de uso común. Un ejemplo son las técnicas de evaluación utilizando Métodos No Destructivos (MND). Este enfoque se refiere a la técnica de evaluación de características físicas y mecánicas del material, sin alterar permanentemente sus propiedades para su uso final (Bodig, 2001; Bucur, 1999; Ross *et al.* 2000; Sasaki, 2001; Schad, 1995; Wang *et al.* 2000).

Las principales ventajas de la utilización de MND son la rapidez para obtener resultados precisos y la adaptabilidad para su empleo In-Situ y en contexto industrial, entre otras. Además, gracias a su repetitividad en las mediciones, los MND permiten analizar pequeñas muestras de material, evitando estudios necesitando numerosos especímenes de ensayo (Bodig, 2001; Ross y Pellerin, 1994; Forest Products Laboratory, 2000). Este argumento permite realizar investigaciones intensivas sobre una muestra pequeña de material, sin poner en juego la validez de los resultados.

La aplicación de MND en la caracterización mecánica de los productos de madera se basa en el siguiente enunciado: La madera y los materiales fabricados con ella pueden almacenar y disipar energía, por ejemplo, la propiedad de la madera de almacenar energía es manifestada por la velocidad a la cual una onda mecánica viaja a través de ella. En contraste, la capacidad de la madera para atenuar una onda de vibración denota su capacidad para disipar energía. Jayne en 1959 propuso la hipótesis fundamental de que estas propiedades de la madera para almacenar y disipar energía, están controladas por los mismos mecanismos que determinan su comportamiento mecánico en condiciones estáticas. Es decir, la estructura molecular y anatómica del material es a la base del comportamiento mecánico de la madera. Como consecuencia, es posible relacionar estadísticamente estas propiedades y el comportamiento mecánico, utilizando métodos de análisis numéricos tales como las correlaciones estadísticas. Esta proposición ha sido verificada experimentalmente por los trabajos de Jayne (1959); Pellerin (1965); Kaiserlik y Pellerin (1977); Ross y Pellerin (1988); Ross *et al.* (1977); y más recientemente por: Sandoz *et al.* (2000 y 2002).

Por otra parte, estudios recientes han demostrado la eficiencia de los Métodos No Destructivos, en la evaluación de las propiedades mecánicas de productos de madera reconstituida. La velocidad del sonido y su relación con el Módulo de Elasticidad en TPM de media densidad y en paneles estructurales ha sido estudiada recientemente. Además los resultados corroboran una estrecha relación estadística entre la velocidad del sonido en los TPM y otras propiedades mecánicas (Pellerin y Morschauer, 1974; Ross, 1985; Ross y Pellerin, 1988; Vogt, 1985 y 1986; Bucur, 1984 y 1995). Sin embargo, la diversidad de métodos y estándares para la evaluación de las propiedades mecánicas de TPM resultan en valores diferentes y particulares para cada proceso de fabricación y variedad de productos.

La tabla 1 presenta un resumen bibliográfico referente al Módulo de Elasticidad de TPM y el método de determinación, así como los valores mínimos requeridos para la clasificación de la ANSI, para TPM formados con resinas de Urea-Formaldehído (NPA, 1993).

Del análisis de la Tabla 1, se deduce la diferencia de resultados según la materia prima y el adhesivo utilizados en la fabricación de TPM. Igualmente, para una misma densidad, el MOE varía si un método distinto de solicitación es utilizado - aún para un mismo autor y en condiciones similares de ensayo -. Por estas razones, es notorio el interés tecnológico por comparar características mecánicas para un mismo material utilizando métodos distintos de evaluación.

Tabla 1. Resumen bibliográfico de valores la Densidad, del Módulo de Elasticidad de Tableros de Partículas de Madera, del tipo de materia prima y de la técnica empleadas en su determinación.

Materia Prima y Adhesivo	Densidad (gr/cm³)	MOE (MPa)	Técnica aplicada	Referencia
Astilla de coníferas, Resina UF	0.68	2300	MND Ultrasonido	Grundström, 1998
Astilla de coníferas, Resina UF	0.68	2500	MND Vibraciones	Grundström, 1998
Astilla de coníferas, Resina UF	0.71	1765	ASTM D-1037	McNatt y Link, 1989
Astilla de Douglas-Fir, Resina UF	0.55	3400	ASTM D-1037	Hann <i>et al.</i> , 1962
Astilla de Douglas-Fir, Resina FF	0.53	3580	ASTM D-1037	Hann <i>et al.</i> , 1962
Astilla de Douglas-Fir, Resina MF	0.53	3600	ASTM D-1037	Hann <i>et al.</i> , 1962
Astilla de <i>Pinus spp.</i>, Resina UF	0.72	3000	BS 1811	Chapman, 1979
Astilla de <i>Pinus spp.</i>, Resina UF	0.74	4200	BS 1811	Chapman, 1979
Astilla de Douglas-Fir y residuos, Resina FF	0.66	4320	ASTM D-1037	Geimer <i>et al.</i> 1974
TPM 1-M-1	0.64- 0.80	+ 1725	Clasificación	ANSI A208.1 (NPA, 1993)
TPM 1-M-2	0.64- 0.80	+ 2225	Clasificación	ANSI A208.1 (NPA, 1993)
TPM 1-M-3	0.64- 0.80	+ 2750	Clasificación	ANSI A208.1 (NPA, 1993)
UF: Urea-Formaldehído; MF: Melamina-Formaldehído; FF: Fenol-Formaldehído.				

OBJETIVOS

Los objetivos de la investigación son:

- Objetivo 1) Evaluar el Módulo de Elasticidad de una muestra industrial de Tableros de Partículas de Madera, utilizando diferentes métodos de evaluación no destructivos.
- Objetivo 2) Comparar los resultados según los métodos de evaluación empleados.
- Objetivo 3) Contrastar los resultados conforme a las direcciones paralela y transversal de la línea de producción de los Tableros.
- Objetivo 4) Relacionar estadísticamente las características estudiadas.
- Objetivo 5) Proponer una clasificación para la muestra del material estudiado, sobre la base de su Densidad y de sus Módulos de Elasticidad, y conforme a la Standard ANSI A208.1.

El alcance de la investigación se limita a realizar un estudio intensivo en una muestra de material industrial, con un carácter comparativo entre tres procedimientos de evaluación no destructivos: Dos de carácter dinámico: Vibraciones Transversales y Ondas de Esfuerzo; y uno de Flexión Estática.

MATERIAL EXPERIMENTAL

El material para ensayo proviene de una muestra de diez tableros de partículas de madera con dimensiones comerciales de 2440 x 1220 x 16.6 mm., extraídos al azar del almacén de producción de una fábrica de TPM en el Estado de Michoacán. Los paneles fueron elaborados con una mezcla de especies de madera de *Pinus spp.*, *Abies spp.* y *Quercus spp.*, originarias de las áreas boscosas de los estados de Michoacán y México. En su fabricación, fue utilizada resina de urea-formaldehído en un porcentaje de 7 a 10 % con respecto al peso de sólidos (Información proporcionada por el fabricante). De la muestra se seleccionaron dos tableros y en cada uno se recortaron sistemáticamente 16 probetas, (de las cuales la dimensión mas larga fue utilizada como portada durante los ensayos). Ocho de ellas en la dirección paralela al sentido de la línea de producción y otras ocho en la dirección transversal, como se muestra en la figura 1.

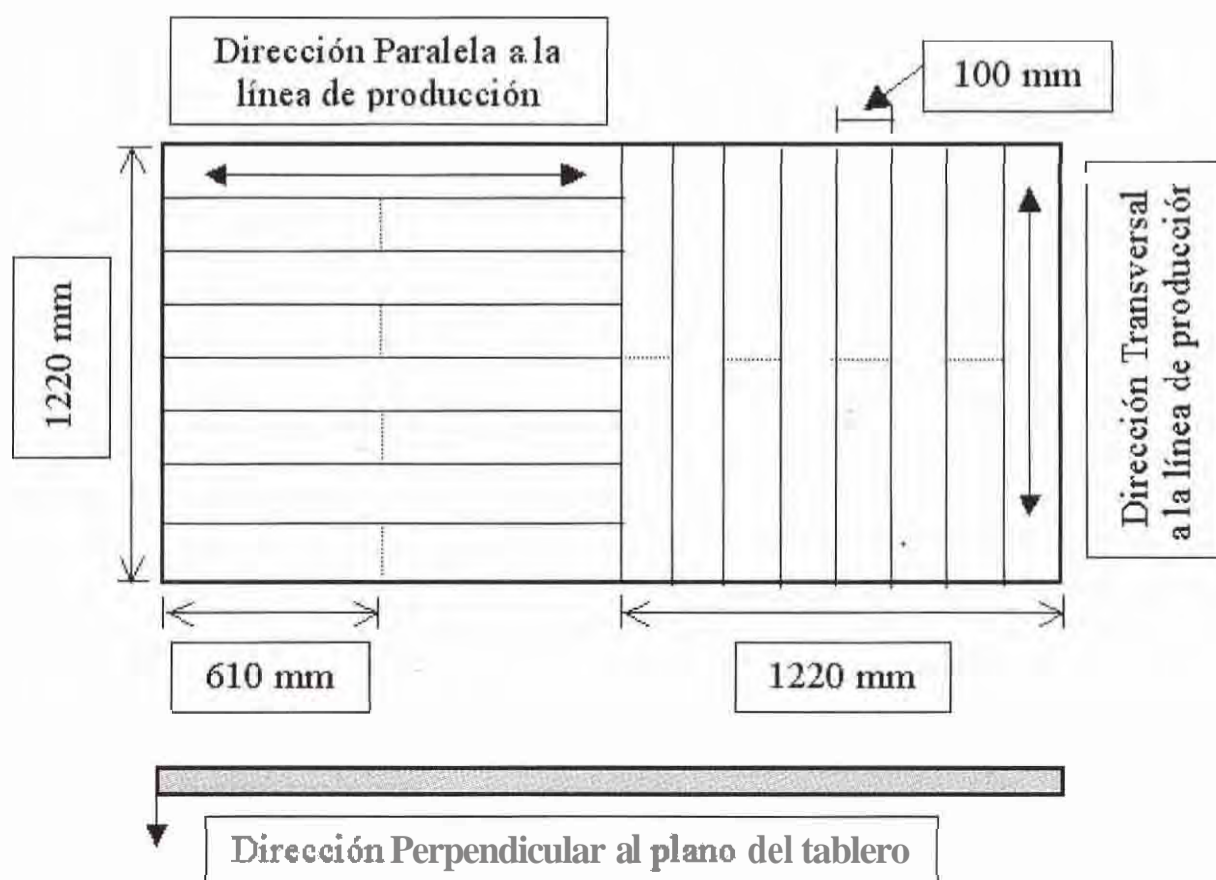


Figura 1. Estrategia para la selección de probetas en un tablero de dimensiones comerciales.

Con esta estrategia, se prepararon 32 especímenes en dos direcciones: 16 en la dirección paralela (P) al sentido de la línea de producción y 16 en la dirección Transversal (T). Las dimensiones de las probetas fueron de 1220 mm. de largo x 100 mm. de ancho x 16.5 mm. de espesor. Su peso promedio fue de 1.480 kg., para un contenido de humedad de las probetas del 7 %. Después de ser estudiadas en vibraciones y con ondas de esfuerzo, se procedió a recortar la mitad de las probetas a un largo de 610 mm., con el objeto de estudiar diferentes portadas de ensayo, totalizando 40 especímenes para las pruebas siguientes. Gracias a esta estrategia de muestreo, una misma probeta fue estudiada por tres diferentes métodos de ensayo.

El análisis experimental en la investigación, está cimentado en la teoría de Vibraciones y de la Resistencia de Materiales. Para fines prácticos, las observaciones y el análisis en la investigación están limitados por varias hipótesis simplificatrices. Para el caso que nos ocupa, las probetas elaboradas a partir de TMP son idealizadas como vigas rectas, en forma de paralelepípedo, demasiado delgadas en comparación con su portada de ensayo. La viga es geoméricamente uniforme, de medio continuo, macroscopicamente homogénea y localmente isotrópica. Además, el material es solicitado con pequeñas deformaciones unitarias, únicamente en el dominio elástico y obedece a la ley de Hooke. Finalmente, suponemos que durante el proceso de deformación de la viga-probeta, sus secciones transversales con relación al eje de la portada, permanecen planas.

Igualmente la temperatura y humedad al interior de la probeta son constantes durante la realización de las pruebas y no influyen en la evaluación de las características mecánicas.

En la presente investigación, aceptamos también la hipótesis de que la estructura del material de ensayo (matriz madera-adhesivo) es homogénea y con un perfil de densidad uniforme. Esta suposición pretende simplificar el análisis de las deformaciones y la distribución de esfuerzos internos en las probetas, los cuales son evaluados globalmente durante los diferentes tipos de sollicitaciones mecánicas aplicadas al material.

Para el caso de ensayos de Flexión Estática, de Ondas de Esfuerzo y de Vibraciones Transversales, esta hipótesis permite ignorar las variaciones locales en la sección transversal de las probetas, respecto a la densidad y a la homogeneidad del medio, y simplificar así la evaluación del Modulo de Elasticidad.

ENSAYOS DE VIBRACIONES TRANSVERSALES

El principio teórico del experimento de vibraciones transversales radica en el estudio del comportamiento de una probeta de TPM, idealizada como una viga continua, uniforme y homogénea. El sistema estudiado, es decir la probeta de TMP, es representado por su diagrama de cuerpo libre, en la figura 2 y es explicado por el modelo reológico de tipo cuerpo de Kelvin, de un solo grado de libertad, por la figura 3.

Probeta de TPM

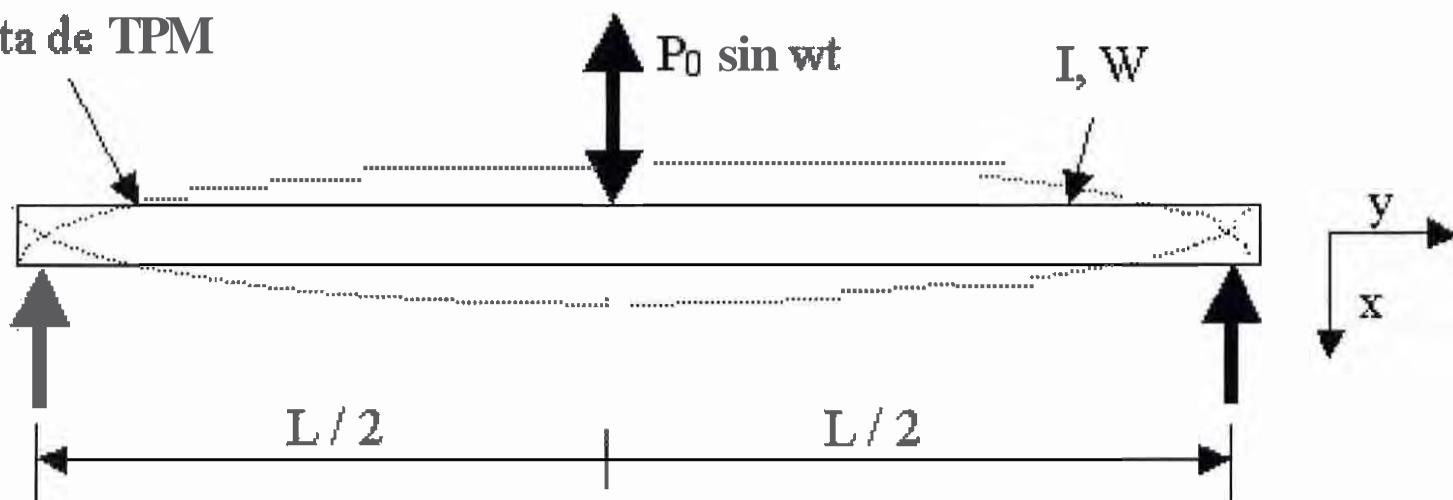


Figura 2. Diagrama de cuerpo libre del sistema estudiado. Donde: I es el Momento de Inercia de la probeta, W es el Peso de la probeta, L es la Portada de la probeta y $P_0 \sin \omega t$ es la Función de la Fuerza aplicada de frecuencia ω . x es la dirección transversal a la probeta. y es la dirección a lo largo de la portada.

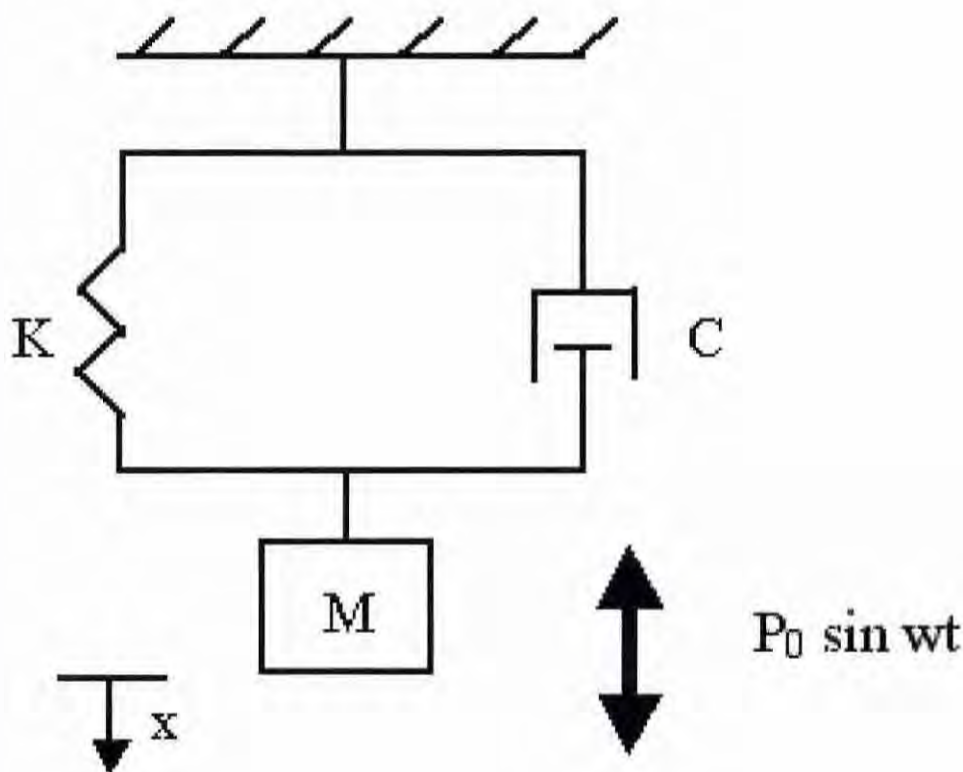


Figura 3. Modelo reológico (cuerpo de Kelvin) del sistema. Donde: M es la Masa del sistema, D es la Constante de amortiguamiento, K es la Constante de Rigidez y $P_0 \sin \omega t$ es la Función de la Fuerza aplicada de frecuencia ω . x es la dirección transversal a la probeta.

La ecuación de movimiento del modelo presentado en la figura 3 es:

$$M \left(\frac{d^2 x}{dt^2} \right) + D \left(\frac{dx}{dt} \right) + K x = P_0 \sin \omega t \tag{1}$$

Donde:

M= Masa del sistema

D= Constante de amortiguamiento

K= Constante de Rigidez

$P_0 \sin \omega t$ = Función de la fuerza aplicada P_0 , de frecuencia ω .

Para una viga sobre apoyos simples en los extremos (Figura 2), una solución para K , despeja el Módulo de Elasticidad dinámico en vibraciones transversales, en nuestro caso, de la probeta de TPM, apoyada sobre soportes simples (Timoshenko et al. 1974):

$$\text{MOE}_{vt} = \frac{f_r^2 W L^3}{2.46 I g} \quad (2)$$

Donde:

MOE_{vt} = Módulo de Elasticidad dinámico en vibraciones transversales

f_r = Frecuencia natural del sistema

W = Peso de la probeta

L = Portada de la probeta

I = Momento de Inercia de la sección transversal de la probeta

g = Constante gravitacional

Los ensayos dinámicos de flexión en vibraciones transversales fueron llevados a cabo utilizando un equipo Metriguard Model 340 Transverse Vibration E-Computer (Metriguard, 1990). La portada experimental fue de 1194 mm. Después de calibrar el aparato para las probetas de TPM, las propiedades determinadas directamente por este aparato fueron la densidad (ρ) y el Módulo de Elasticidad dinámico en vibraciones transversales MOE_{vt} , utilizando la ecuación (2). La sollicitación para cada probeta fue reiterada 3 veces para cada ensayo y el promedio de valores fue considerado para análisis posterior.

ENSAYOS DE ONDAS DE ESFUERZO

La hipótesis de esta experiencia es la idea de que un impulso simple causa vibraciones en un cuerpo, es decir, una onda de esfuerzo en el sentido longitudinal, tal como se esquematiza en la figura 4. La onda se propaga a través del medio a una velocidad que depende de su densidad y de su rigidez.

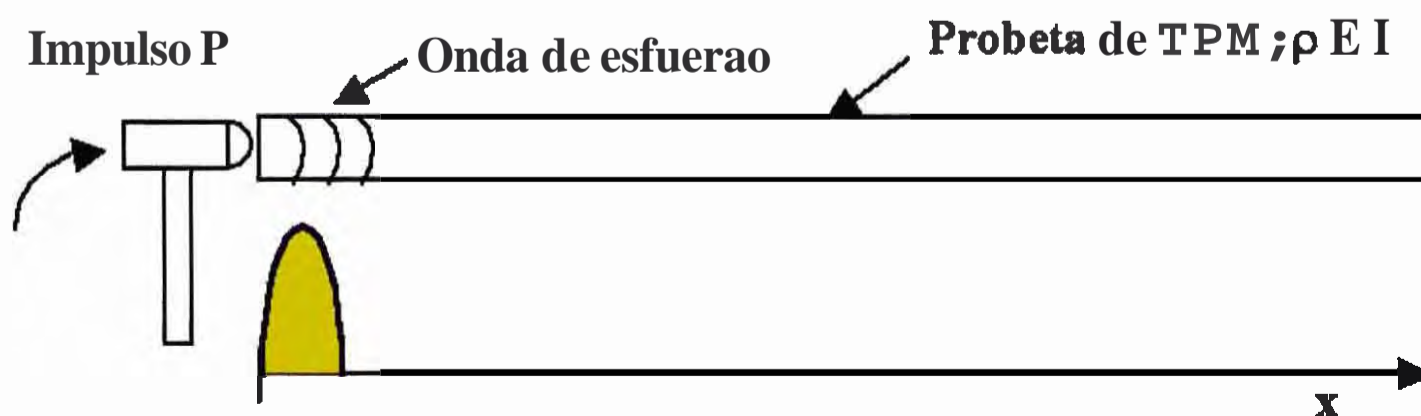


Figura 4. Diagrama de un impulso iniciado en el extremo de la probeta de TPM.

Para el caso de un medio continuo en vibraciones longitudinales, la ecuación de movimiento de la probeta de la figura 4 es:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (3)$$

con:

$$c^2 = \frac{E}{\rho} \quad (4)$$

Donde:

c = Velocidad del sonido

E = Módulo de Elasticidad

ρ = Densidad

De acuerdo a la ecuación (4), el sonido se propaga a través de un medio continuo con una velocidad que corresponde a su rigidez y a su densidad. Si la geometría y la densidad de un cuerpo homogéneo son constantes y conocidas, el Módulo de Elasticidad dinámico en ondas de esfuerzo, puede ser calculado utilizando ondas de esfuerzo con la ayuda de la formula (Krautkrämer, 1980):

$$MOE_{sw} = \rho c^2 \left(\frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)} \right) \quad (5)$$

Donde:

MOE_{sw} = Módulo de Elasticidad dinámico en ondas de esfuerzo

ρ = Densidad

c = Velocidad del sonido

μ = Relación de Poisson

En los productos de madera, la relación de Poisson es muy pequeña y difícil de determinar, (Bodig y Goodman, 1973; Guitard, 1985). Además, los TPM no son un material completamente homogéneo y su perfil de densidad en la dirección perpendicular al plano de producción no es lineal. En consecuencia, la ecuación (5) puede simplificarse a:

$$MOE_{sw} = \rho c^2 \quad (6)$$

Ecuación utilizada comúnmente por investigadores en mecánica de la madera (Ross, 1985; Ross y Pellerin, 1988 y 1991; Ross *et al.* 2000; Bucur, 1984 y 1995; Schad 1995).

Los ensayos dinámicos de flexión por ondas de esfuerzo se realizaron utilizando un equipo Metriguard Model 239A Stress Wave Timer (Metriguard, 1986). Las dos portadas experimentales fueron de 1168 y 559 mm. El aparato mide el tiempo de propagación de la onda de esfuerzo a través de la probeta, entre los extremos de apoyo. Usando la ecuación (6), fue calculado el Módulo de Elasticidad dinámico en ondas de esfuerzo MOE_{sw} . La sollicitación sobre cada probeta fue reiterada 3 veces para cada ensayo, y el promedio de valores fue considerado para análisis posterior.

ENSAYOS DE FLEXIÓN ESTÁTICA

A partir de la ecuación de la curvatura de una viga apoyada sobre soportes simples y considerando en elemento diferencial de la viga-probeta, presentado en la figura 5:

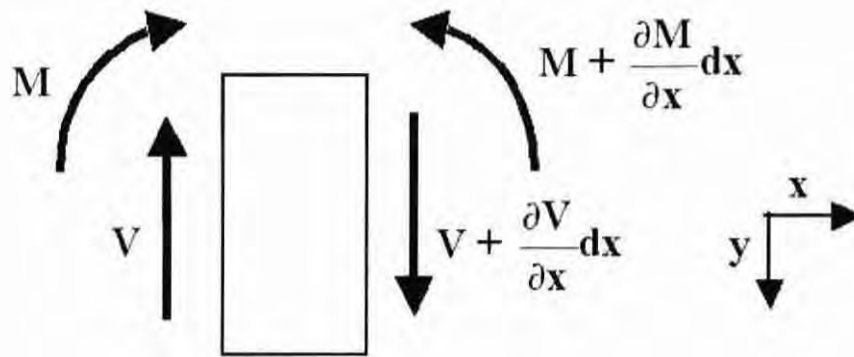


Figura 5. Diagrama de cuerpo libre de un elemento diferencial de una viga solicitada en flexión. Donde: M es el Momento de flexión y V es la Fuerza cortante. x es la dirección longitudinal de la viga. y es la dirección transversal de la viga.

Y de acuerdo a la teoría de la Resistencia de Materiales, se puede deducir la ecuación para calcular el Módulo de Elasticidad en Flexión de la viga:

$$MOE_{st} = \frac{P}{y_{st}} \frac{L^3}{48 I} \quad (7)$$

Donde:

MOE_{st} = Módulo de Elasticidad en Flexión

P = Fuerza aplicada en $L/2$

y_{st} = Flecha de la probeta en $L/2$

L = Portada de la viga

I = Momento de Inercia de la sección transversal de la probeta

Los ensayos de flexión estática en tres puntos fueron realizados utilizando una máquina Universal para Ensayos mecánicos con capacidad de 4000 kg. Los tests fueron aplicados a probetas con tres diferentes portadas de ensayo: 1000, 750 y 500 mm. La velocidad de carga fue en promedio de 333, 250 y 200 MPa./min. respectivamente. Los Especímenes fueron solicitados hasta la ruptura, y del dominio lineal del diagrama Fuerza-Flexión (P/y_{st}), fue calculado el Módulo de Elasticidad en Flexión Estática en tres puntos MOE_{st} , utilizando la ecuación (7).

RESULTADOS

La Tabla 2, presenta los estadísticos de los resultados experimentales. Para cada característica estudiada, los valores se agruparon según el tipo de ensayo administrado (Vibraciones Transversales "vt", Ondas de Esfuerzo "sw" y Flexión Estática "st"), según la orientación de la probeta en el plano del tablero (Transversal "T", Paralelo "P"), y según su combinación (T+P). Los resultados se agruparon

además, haciendo referencia a la portada de ensayo de la probeta. La Tabla 2 propone igualmente una clasificación para TPM, de acuerdo a la Standard A208.1 del Instituto Nacional Americano de Estándares (ANSI, 1993).

Para cada grupo, se calculó su valor promedio, su error estándar y su coeficiente de variación. El análisis se llevó a cabo usando estadística descriptiva, construyendo correlaciones lineales de tipo $y = a + bx$, y calculando su coeficiente de correlación lineal (R). Los cálculos se efectuaron utilizando un paquete comercial estadístico computarizado.

En acuerdo con los resultados presentados en la tabla 2, la densidad promedio de la muestra es de 0.726 gr/cm^3 , catalogando a los TPM como tableros de "Media Densidad" (M), de acuerdo a la clasificación de la Standard ANSI A208.1.

El coeficiente de variación de la densidad es de 1.39 % y es aceptable, bien que se refiere solamente a la muestra industrial de TPM estudiada. Igualmente, para los resultados referentes al coeficiente de variación de los MOEs no obstante que los valores son bajos (1.20-12.06 %), y aceptables en caracterización mecánica de productos de madera (Chapman, 1979; Geimer *et al.* 1974; McNatt, 1973; Hoyle, 1973), esta variación se refiere únicamente a la muestra del material estudiado. Es decir, estos resultados sólo explican la variabilidad de la densidad y del MOE al interior de la muestra de probetas ensayadas. Para identificar un valor representativo en condiciones de producción industrial, es necesario proceder a un muestreo continuo y con un diseño experimental apropiado.

De igual forma, conforme a los resultados presentados en la tabla 2, los TPM son clasificados como tableros 1-M-3 y 1-M-2. El primer índice 1 de la clasificación, se refiere a los TPM que son fabricados con resina de urea-formaldeído como aglutinante. Esta resina permite cierta resistencia del tablero a la humedad y normalmente es recomendado para uso en ambientes de interior donde el producto este protegido del intemperismo (ANSI A208.1; Carll, 1986). De acuerdo con la Standard ANSI A208.1, los TPM de esta categoría son destinados a la industria del mueble, donde son recubiertos con chapas finas, plásticos y laminados (NPA, 1993).

El segundo índice numérico de la clasificación, se refiere a una escala ascendente del valor del MOE del tablero. Es decir, la clasificación 1-M-3 requiere valores mínimos del MOE de 2750 MPa. (ver tabla 1). Y con respecto a la clasificación 1-M-2 el valor mínimo aceptado de MOE es 2225 MPa. (ver tabla 1). De aquí que sea interesante el resultado de la clasificación según el tipo de ensayo aplicado: Los ensayos dinámicos proporcionan valores de MOEs mayores en comparación a los MOEs obtenidos por flexión estática. Si utilizamos valores de MOE obtenidos por métodos dinámicos, los TPM se clasifican como 1-M-3, (ver tabla 2), Sin embargo, si aplicamos valores de MOE provenientes de ensayos estáticos, obtendremos una clasificación 1-M-2, que refiere a un material con valores inferiores de MOE.

Estos resultados nos permiten alcanzar los objetivos de la investigación en lo referente a la determinación del Módulo de Elasticidad de una muestra industrial de Tableros de Partículas de Madera, utilizando diferentes métodos de evaluación no destructivos, y proponer una clasificación preliminar para la muestra de material estudiada sobre la base de su Densidad y de sus Módulos de Elasticidad conforme a la Standard ANSI A208.1.

Tabla 2. Resultados estadísticos y clasificación de los Tableros de Partículas de Madera.

Característica estudiada	Valor promedio (MPa)	Error standard de la muestra	Coefficiente de Variación (%)	Portada de ensayo (mm)	Clasificación según ANSI A208.1
Densidad (C.H. = 7 %)	0.726	0.0017	1.39	1194	Media (M)
Ensayos de Vibraciones Transversales					
MOE _{vt} (T)	3740	38.25	4.09	1194	1-M-3
MOE _{vt} (P)	3290	17.58	2.13	1194	1-M-3
MOE _{vt} (T+P)	3515	45.81	7.32	1194	1-M-3
Ensayos de Ondas de Esfuerzo					
MOE _{sw} (T)	3480	18.89	2.17	1169	1-M-3
MOE _{sw} (P)	3095	9.28	1.20	1169	1-M-3
MOE _{sw} (T+P)	3290	35.97	6.18	1169	1-M-3
MOE _{sw} (T)	2670	95.16	10.13	559	1-M-2
MOE _{sw} (P)	2840	48.77	4.98	559	1-M-3
MOE _{sw} (T+P)	2755	56.29	8.21	559	1-M-3
Ensayos de Flexión Estática					
MOE _{st} (T)	2790	105	9.19	1000	1-M-3
MOE _{st} (P)	2425	20	2.03	1000	1-M-2
MOE _{st} (T+P)	2600	75	9.93	1000	1-M-2
MOE _{st} (T)	2755	125.72	11.21	750	1-M-3
MOE _{st} (P)	2395	80.48	8.26	750	1-M-2
MOE _{st} (T+P)	2575	89.42	12.06	750	1-M-2
MOE _{st} (T)	2620	31.22	3.37	500	1-M-2
MOE _{st} (P)	2395	47.12	5.56	500	1-M-2
MOE _{st} (T+P)	2510	39.98	6.37	500	1-M-2
P: dirección Paralela al sentido de la línea de producción del tablero					
T: dirección Transversal al sentido de la línea de producción del tablero					
MOE_{vt} : Módulo de Elasticidad dinámico en vibraciones transversales					
MOE_{sw} : Módulo de Elasticidad dinámico en ondas de esfuerzo					
MOE_{st} : Módulo de Elasticidad estático en flexión tres puntos					
C.H. = Contenido de Humedad de la probeta de TPM					

COMPARACIÓN DE RESULTADOS SEGÚN EL MÉTODO DE ENSAYO UTILIZADO

La figura 6, presenta un gráfico de los valores obtenidos para cada probeta y según los diferentes métodos experimentales aplicados. La tendencia general demuestra que el método dinámico de flexión en vibraciones transversales proporciona valores de MOE_{vt} superiores a aquellos emanados de ensayos por ondas de esfuerzo (MOE_{sw}). Además, los valores de MOE provenientes de ensayos en flexión estática (MOE_{st}), son más inferiores a aquellos de flexión dinámica (tabla 2 y figura 6). Estos resultados satisfacen el objetivo de la investigación en lo referente a comparar los resultados según los diferentes métodos de evaluación empleados.

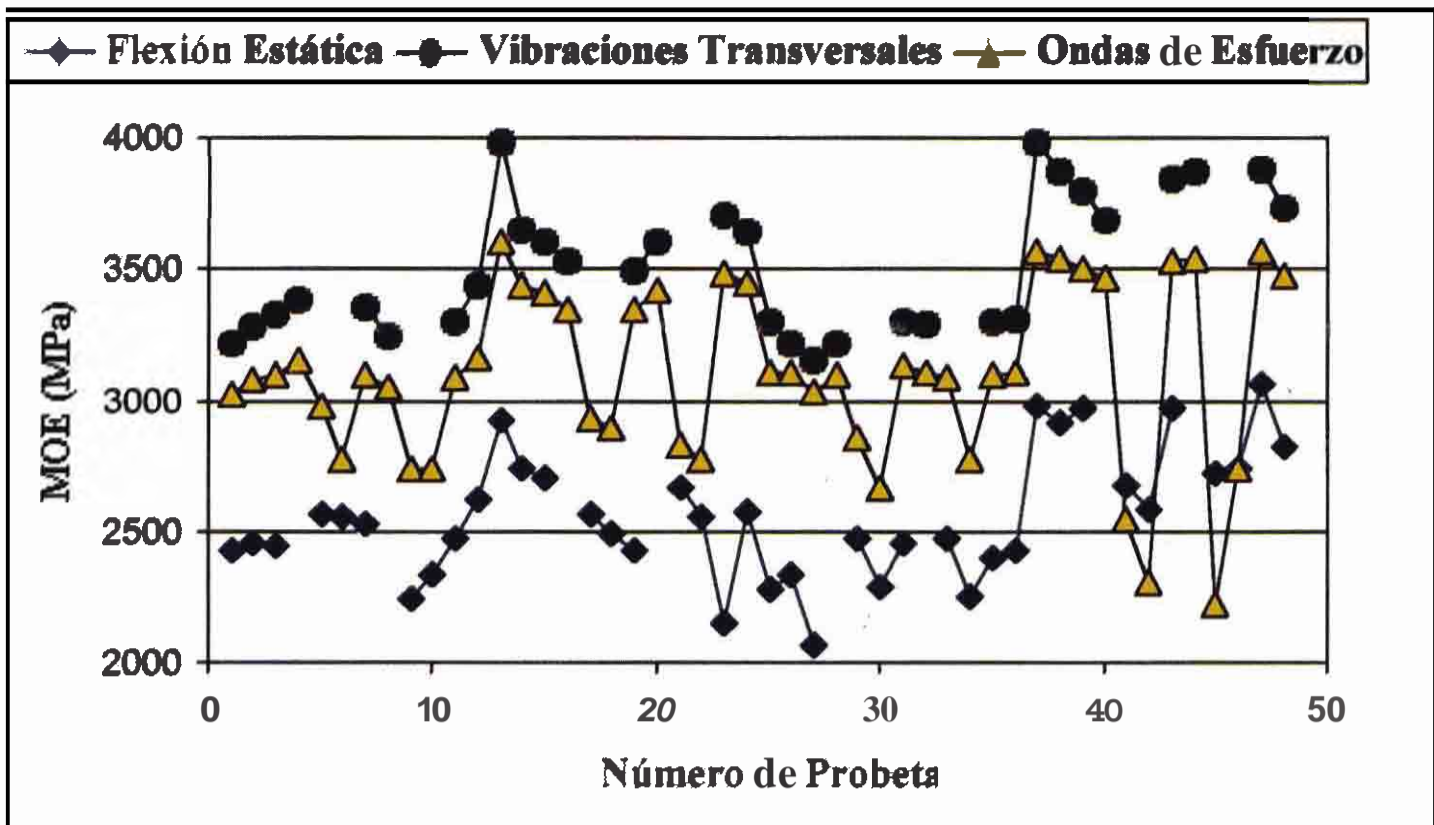


Figura 6. Valores del Módulo de Elasticidad según el método utilizado para su determinación.

En la caracterización del comportamiento mecánico de la madera sólida es común encontrar valores superiores del MOE determinado en condiciones dinámicas, en comparación al MOE proveniente de ensayos donde la velocidad de sollicitación es cuasi estática. Niemz y col. (1997) reportan un cociente de 1.15 a 1.20 entre MOE_{vt} y MOE_{st} para Tableros de Media Densidad. Los autores atribuyen esta diferencia al perfil de densidad del TPM, dado que la teoría de vibraciones es simplificada para materiales homogéneos. Igualmente, Grundstrom (1998), obtiene resultados similares y considera que la diferencia es debida al esfuerzo cortante presente durante la deformación de la probeta.

Si utilizamos en el análisis de resultados el modelo reológico de tipo visco-elástico propuesto para los ensayos de vibraciones transversales (figura 3), la diferencia entre los resultados dinámicos y estáticos, puede explicarse por el efecto de la constante de amortiguamiento que es función de la tasa de sollicitación y que interviene en condiciones dinámicas, pero que permanece pasiva durante un proceso de deformación estática. La influencia de la velocidad de sollicitación en la resistencia mecánica de productos de madera reconstituida ha sido demostrada con anterioridad por Gerhards (1977). En este contexto, la propiedad de amortiguamiento de vibraciones de la madera puede ser propuesta como una propiedad intrínseca presente también en los TPM. Esta proposición está apoyada por los trabajos anteriores de Jayne (1959), James (1962) y Gerhards (1977), los cuales han demostrado la influencia de la rapidez de la carga en los resultados de la caracterización mecánica de productos de madera.

La tabla 3, presenta los cocientes obtenidos según diferentes técnicas de ensayo aplicadas. Los cocientes entre resultados de vibraciones transversales y flexión estática son hasta de 1.36, valores superiores al cociente entre ondas de esfuerzo y flexión estática.

Tabla 3. Cocientes entre Módulos de Elasticidad según el método de ensayo empleado.

Relación	Cociente	Relación	Cociente	Relación	Cociente
$\frac{MOE_{vt}(T)}{MOE_{st}(T)}$	1.34	$\frac{MOE_{vt}(T)}{MOE_{sw}(T)}$	1.05	$\frac{MOE_{sw}(T)}{MOE_{st}(T)}$	1.25
$\frac{MOE_{vt}(P)}{MOE_{st}(P)}$	1.36	$\frac{MOE_{vt}(P)}{MOE_{sw}(P)}$	1.06	$\frac{MOE_{sw}(P)}{MOE_{st}(P)}$	1.28
$\frac{MOE_{vt}(T+P)}{MOE_{st}(T+P)}$	1.35	$\frac{MOE_{vt}(T+P)}{MOE_{sw}(T+P)}$	1.07	$\frac{MOE_{sw}(T+P)}{MOE_{st}(T+P)}$	1.26

La utilización de MND con fines comparativos, demuestra la influencia de la velocidad de la sollicitación, resultando en diferentes valores de MOE, según la velocidad de sollicitación. La velocidad de sollicitación en los ensayos de vibraciones transversales fue de 11.30 Hz, la de los ensayos de ondas de esfuerzo de 3030 m/sec, en comparación con la velocidad de carga casi estática en los ensayos de flexión tres puntos.

Como consecuencia, el Módulo de Elasticidad dinámico en vibraciones transversales MOE_{vt} , es de 1.05 a 1.07 veces superior al Módulo de Elasticidad también dinámico obtenido este por ondas de esfuerzo (MOE_{sw}). Esta diferencia se acentúa más en la dirección Paralela, en comparación con la dirección Transversal, y es superior para la combinación de direcciones (tabla 3).

Esta diferencia en los resultados entre ensayos, puede explicarse además, por el tipo de deformación al interior de la probeta sufrida durante la flexión: en vibraciones transversales, la viga esta sometida a un esfuerzo combinado de tensión, compresión y cortante. El ensayo en ondas de esfuerzo, - de tipo longitudinal, figura 4 -, la probeta sólo es sometida a esfuerzos de tensión-compresión y en una dirección privilegiada. Para el caso de un material como los TPM, el acomodo y la orientación de las astillas o partículas de madera pueden modificar las propiedades reológicas de la matriz resina-madera, en la cual están fundidas las partículas del TPM. Dado que la madera funciona de manera diferente según el tipo de esfuerzo, la respuesta del TPM a sollicitaciones diferentes es desigual, aún si los dos ensayos son dinámicos.

Por otra parte, el cociente entre los resultados de ensayos de ondas de esfuerzo y de flexión estática se mantiene en el orden de 1.25 a 1.28 en una escala intermedia (tabla 3). Los TPM mostraron ser más rígidos cuando son sollicitados rápidamente, lo que comprueba el carácter visco-elástico del TPM.

En general, las relaciones de la tabla 3 fueron en orden ascendente a partir de la dirección (T), (P) y en la combinación de los valores (T+P). Retomando los resultados de la tabla 2, el coeficiente de variación para el plano (P) fue inferior, resultado que sugiere que los tableros son más estables, desde el punto de vista mecánico, en el sentido paralelo a la línea de producción. En contraste, los valores de elasticidad son superiores en la dirección (T). Este resultado podría estar ligado a la tecnología de fabricación del TPM, particularmente en el modo de formación de la sabana y en el control de las variables de prensado.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS SEGUN LA ORIENTACION DE LA PROBETA EN EL PLANO DEL TABLERO

La tabla 4 presenta los Cocientes de Módulos de Elasticidad (MOE) entre la dirección Transversal (T) y la dirección paralela (P) al sentido de la línea de producción del tablero y según el método de ensayo empleado. De la inspección de la tabla 4, se deduce que el MOE evaluado en probetas donde la portada de flexión fue en la dirección transversal (T) al sentido de la línea de producción de los TPM, es superior al MOE determinado para portadas en la dirección Paralela (P). Únicamente en la relación $MOE_{sw}(T) / MOE_{sw}(P)$, de portada de 559 mm., el cociente fue menor que la unidad. Estos resultados satisfacen el objetivo referente a comparar los resultados de acuerdo con las direcciones paralela y transversal a la línea de producción de los Tableros.

Tabla 4. Cocientes de Módulos de Elasticidad entre la dirección Transversal y la dirección Paralela al sentido de la línea de producción del tablero.

Tipo de ensayo			
Vibraciones Transversales	Portada (mm)		
	1194	-	-
$\frac{MOE_{vt}(T)}{MOE_{vt}(P)}$	Cociente		
	1.14	-	-
Ondas de Esfuerzo	Portada (mm)		
	1169	-	559
$\frac{MOE_{sw}(T)}{MOE_{sw}(P)}$	Cociente		
	1.12	-	0.94
Flexión Estática	Portada (mm)		
	1000	750	500
$\frac{MOE_{st}(T)}{MOE_{st}(P)}$	Cociente		
	1.15	1.15	1.09

De acuerdo a las conclusiones de Janowiak (2001), la diferencia entre los MOEs en las direcciones Transversal y Paralela en TPM puede ser atribuida a fisuras y macroporosidad en el material. La falta de uniformidad en el índice de compactación del TPM, ocasionada por la variabilidad en las propiedades de las partículas de madera y por la tecnología en la operación de prensado, pueden explicar la anisotropía según la dirección de evaluación en el plano del panel (Kelly, 1977).

Por otra parte, la diferencia en los valores de la tabla 4 entre los MOEs según las direcciones (T) y (P), que van del 9 al 15 %, no implica necesariamente una deficiencia en la calidad del tablero. De acuerdo con McNatt (1973), este resultado es únicamente un indicador de la desproporción entre los valores de MOEs en el plano de los TPM: sus resultados con 9 muestras distintas de TPM industriales y de una muestra de laboratorio, reportan un 10 % de diferencia entre los MOEs según las direcciones (T) y (P).

Para las portadas más largas y equivalentes, los cocientes (TIP) son similares y con valores de 1.12 a 1.15. En cambio, la portada corta de 559 mm. en el ensayo de ondas de esfuerzo que es similar a las recomendaciones de la Standard D-1037 (ASTM, 2000), son discrepantes. Los resultados de ondas de esfuerzo con la portada menor (L = 559 mm.), variaron de manera importante. Este resultado sugiere la idea que los tableros no son homogéneos en su estructura respecto al plano. No obstante, dado el tamaño de la muestra estudiada, es necesario una investigación más detallada para confirmar esta proposición.

RELACIONES ESTADÍSTICAS ENTRE LAS CARACTERÍSTICAS ESTUDIADAS

La tabla 5 presenta las diferentes ecuaciones de correlación y sus coeficientes R para diferentes combinaciones de los MOEs obtenidos con los MND utilizados. Igualmente, las Figuras 7, 8 y 9 presentan los gráficos que relacionan los valores de MOEs según el ensayo aplicado. Estos resultados satisfacen el objetivo de relacionar estadísticamente las diferentes características estudiadas.

Tabla 5. Correlaciones estadísticas y coeficientes de correlación para Módulos de Elasticidad determinados por diferentes métodos no destructivos.

$y = a + b x$	x		
y	MOE _{vt}	MOE _{sw}	MOE _{st}
MOE _{vt}	-	$y = - 577 + 1.24 x$ R = 0.98	$y = 1452 + 0.803 x$ R = 0.83
MOE _{sw}	$y = 591 + 0.767x$ R = 0.98	-	$y = 1305 + 0.757x$ R = 0.90
MOE _{st}	$y = - 441 + 0.858 x$ R = 0.83	$y = - 871 + 1.06 x$ R = 0.90	-

Respecto a la relación entre el MOE_{st} y el MOE_{vt}. Los resultados de la tabla 5 son congruentes con los de Niemz *et al.* (1997), quienes reportan un R= 0.69 entre el MOE_{st} y el MOE_{vt} para Tableros de Media Densidad. Igualmente, Ross (1984) y Ross y Pellerin (1988), aplicando ondas de esfuerzo en una muestra de TPM industrial encontraron correlación entre MOE_{st} y MOE_{sw} de R= 0.96, y Vogt (1985), para TPM de media densidad encontró un R= 0.72 entre MOE_{st} y MOE_{sw}.

Los resultados de McNatt (1973), con TPM provenientes de nueve procedencias industriales, coinciden con los resultados de las tablas 2 y 5. Certidumbre que confirma la utilidad de la metodología empleada.

El mismo tipo de relaciones entre resultados se han encontrado para madera sólida y para madera en rollo utilizando MND: Illic (2001), encuentra correlaciones lineales comparables a las de las figuras 7, 8 y 9, entre el MOE_{st} y el MOE_{vt} en probetas de madera sólida de *Eucalyptus delegatensis*. Por su parte, Ross *et al.* (2000), también encontraron relaciones semejantes utilizando MND al evaluar MOEs en pruebas estáticas y dinámicas en trozas de pequeñas dimensiones.

El análisis estadístico entre el Módulo de Elasticidad MOE_{st} y el Módulo de Elasticidad MOE_{vt} (tabla 5 y figura 7), presenta una correlación importante entre estas características: R= 0.83. Las

configuraciones de ensayo son equivalentes y sólo la velocidad de sollicitación difiere entre los dos ensayos. Este resultado permite validar la idea que un método dinámico y de carácter no destructivo es de utilidad práctica para determinar una cota mecánica estática en TPM.

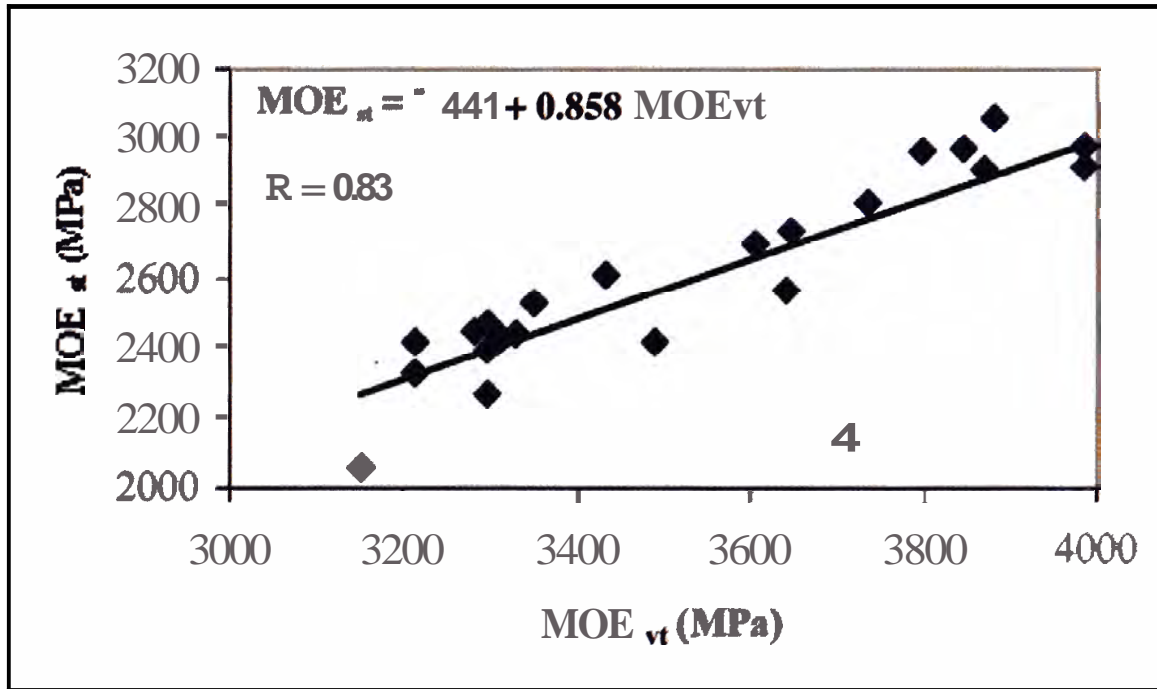


Figura 7. Correlación entre el Módulo de Elasticidad MOE_{st} y el Módulo de Elasticidad MOE_{vt}.

El coeficiente R calculado entre el MOE_{sw} y el MOE_{st} es de R= 0.90 (tabla 5). En la tabla 2, se observa que los valores del MOE_{sw} de los tableros son sensibles a la orientación de la probeta y a la portada. Esta dispersión de valores es evidente en la figura 8, donde los valores obtenidos en la dirección transversal (T) se agrupan en un rango superior.

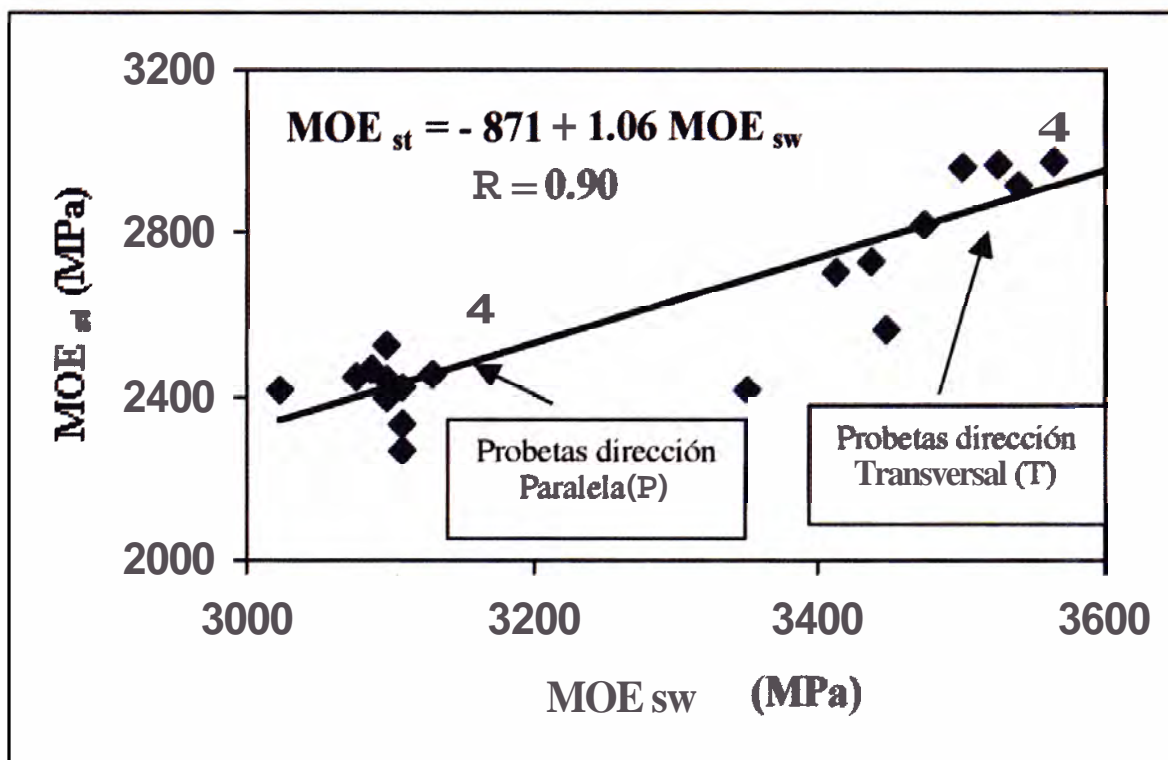


Figura 8. Correlación entre el Módulo de Elasticidad MOE_{st} y el Módulo de Elasticidad MOE_{sw}.

La correlación entre el MOE_{vt} y el MOE_{st} presentados en la figura 9, relaciona estas dos variables con un coeficiente $R= 0.98$. La correlación confirma además el efecto de la orientación de la probeta en el plano del tablero: Las probetas orientadas en la dirección transversal (T) se agrupan en valores superiores en comparación con las probetas provenientes de la dirección paralela (P) al sentido de la línea de producción del TPM. Además el conjunto total de las probetas guarda una correlación importante. Los métodos de vibraciones transversales y de ondas de esfuerzo resultan útiles para la evaluación de MOE en TPM y para evidenciar el carácter anisotrópico del MOE en el plano del TPM estudiado.

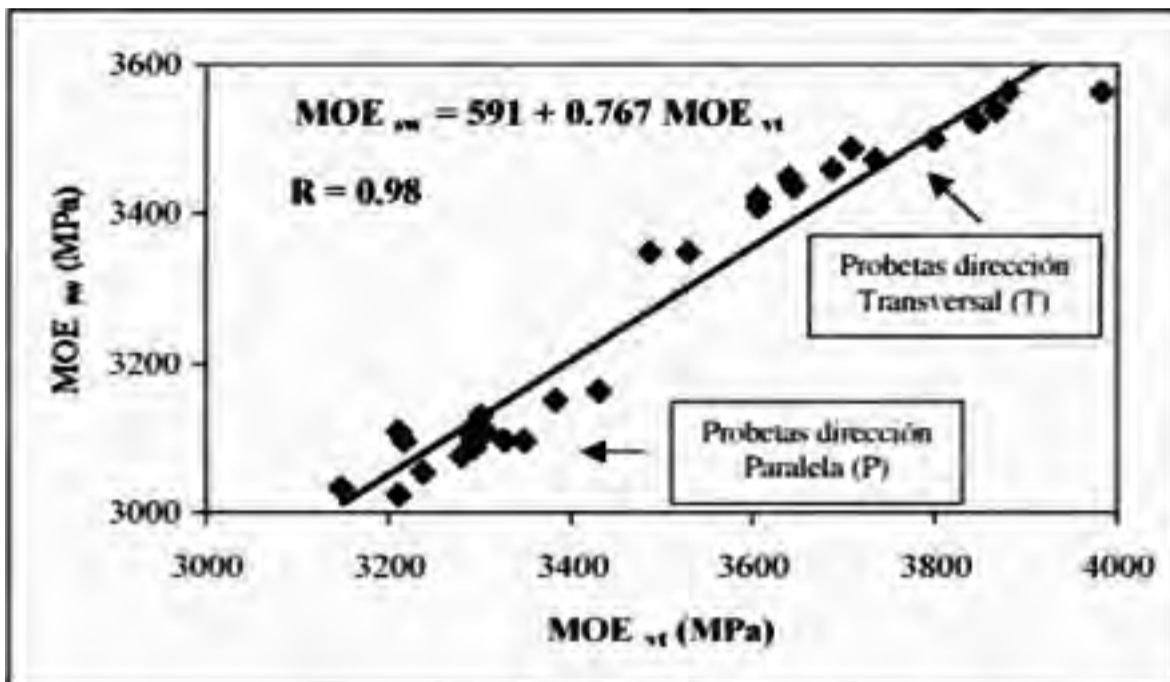


Figura 9. Correlación entre el Módulo de Elasticidad MOE_{vt} y el Módulo de Elasticidad MOE_{st} .

CONCLUSIONES

El cálculo de los Módulos de Elasticidad de los Tableros de Partículas de Madera fue rápido y sencillo, lo que demuestra que los métodos de evaluación mecánica de carácter no destructivo de Flexión por Vibraciones Transversales, Ondas de Esfuerzo y Flexión Estática, son convenientes en la caracterización mecánica de materiales de madera.

De acuerdo a la Estándar ANSI A208.1, la muestra industrial de Tableros de Partículas de Madera estudiados, se clasifican como tableros de media densidad.

El Módulo de Elasticidad varía según el método de ensayo utilizado en su determinación: Para una misma muestra, los métodos dinámicos practicados, estiman Módulos de Elasticidad superiores al Módulo de Elasticidad obtenido en Flexión Estática. Igualmente, por los valores de sus Módulos de Elasticidad, y de acuerdo a la Estándar ANSI A208.1, los tableros se clasifican como tableros 1-M-3 al ser evaluados con métodos dinámicos, y se clasifican como tableros 1-M-2, según el método de flexión estática.

Los resultados experimentales indican que los Tableros de Partículas de Madera investigados exhiben un carácter anisotrópico en el Módulo de Elasticidad según las direcciones paralela y

transversal a la línea de producción. Para la muestra de Tableros de Partículas estudiada, el Módulo de Elasticidad en la dirección Transversal a la línea de producción, es superior al Módulo de Elasticidad en la dirección Paralela.

Los Módulos de Elasticidad obtenidos por diferentes métodos de evaluación están estadísticamente relacionados de manera importante entre sí, resultado que confirma la hipótesis fundamental para la aplicación de Métodos No Destructivos en el estudio de Tableros de Partículas de Madera.

Los resultados de la investigación demostraron la utilidad de los Métodos No Destructivos en condiciones de laboratorio. Un objetivo en este campo de estudio es verificar su conveniencia en condiciones de producción industrial de materiales compuestos de madera y su extensión al estudio de estructuras en edificaciones de madera.

AGRADECIMIENTOS

La investigación fue financiada por la Coordinación de la Investigación Científica, por la Secretaría Académica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) y por la División de Estudios de Posgrado, de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, UMSNH, Morelia, Michoacán.

Agradecemos la colaboración profesional y cordial del Profesor Mike Milota, Ph.D., y del Asistente de Investigación Milo Clauson, Ing., durante los trabajos experimentales efectuados en el Department of Wood Science & Engineering, Oregon State University, Corvallis, OR., U.S.A.

Así mismo, apreciamos la ayuda indispensable del M.C. Roberto Calderón Muñoz, en la preparación de las probetas de ensayo en el laboratorio "Ing. Francisco Carreón Reyes", de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, UMSNH.

El material experimental fue donado por la compañía REXCEL S. A. de C.V., de Zitácuaro, Michoacán.

Igualmente manifestamos nuestro reconocimiento a la especialista en Ciencias de la Comunicación Rocio Olmedo Sotomayor (Universidad Latina de Arriñica, Morelia, Michoacán), por su colaboración en la corrección de estilo del texto original.

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE. 1993. ANSI A208.1-1993. Particleboard, Mat-Formed Wood. Composite Panel Association. Washington, D.C. U.S.A.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. 2000. Annual Book of ASTM Standards. Section Four; Construction, Volume 04.10, Wood. U.S.A. 707 p.

- BODIG, J. **2001**. The Process of NDE Research for Wood and Wood Composites. NDT.net - March 2001, Vol. 6, No. 03. 17 p.
- BODIG, J.; GOODMAN, J. R. **1973**. Prediction of Elastic Parameters for Wood. WoodScience. Vol. 5. No. 4: 249 - 264.
- BODIG, J.; JAYNE, B. A. **1993**. Mechanics of Wood Composites. Reprinted edition, Kreiger Publishing Company. Malabar, FL. U.S.A. 712 p.
- BUCUR, V. **1995**. Acoustics of Wood. CRC Press. New York. U.S.A. 284 p.
- BUCUR, V. **1999**. Acoustics as a Tool for the Nondestructive Testing of Wood. NDT.net - November 1999, Vol. 4, No. 11. 9 p.
- BUCUR, V.; ARCHER, R.R. **1984**. Elastic constants for wood by an ultrasonic method. *Wood Science and Technology*, 18: 255-265.
- CARLL, C. **1986**. Wood particleboard and flakeboard: Types, grades, and uses. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-53. Madison, WI. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 9 p.
- CHAPMAN, K.M. **1979**. Improved uniformity in medium density fiberboard. In: Proceedings of the 13th International Particleboard Symposium. Edited by Thomas M. Maloney. Washington State University. Pullman, WA, U.S.A. pp: 237-265.
- CLAUSEN, C.A.; KARTAL, S.; MUEHL, J. **2000**. Properties of particleboard made from recycled CCA-treated wood. In: 31st Annual Meeting Proceedings of The International Research Group On Wood Preservation. Section 5. Kona, Hawaii, U.S.A. 6 p.
- FOREST PRODUCTS LABORATORY. **1999**. Wood handbook-Wood as an Engineering Material. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113. Madison, WI: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 463 p.
- FOREST PRODUCTS LABORATORY. **2000**. Stress Wave Timing Nondestructive Evaluation Tools for Inspecting Historic Structures. A Guide for Use and Interpretation. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-119. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest service, Forest Products laboratory. 15 p.
- GEIMER, R.L.; LEHMANN, WF.; McNATT, J.D. **1974**. Engineering Properties of Structural Particleboard from Forest Residues. In: Proceedings of the 8th International Particleboard Symposium. Edited by Thomas M. Maloney. Washington State University. Pullman, WA, U.S.A. pp: 119-143.
- GERHARDS, C.C. **1977**. Effect of Duration and Rate of Loading on Strength of Wood and Wood-Based Materials. USDA Forest Service. Research Paper FPL 283. U.S. Department of agriculture, Forest Service. Forest Products Laboratory. Madison WI, U.S.A. 24 p.

- GRUNDSTRÖM, F. **1998**. Non-destructive testing of particleboard with ultra sound and eigen frequency methods. Master of Science programme in Mechanical Engineering. Wood technology. Lulea Tekniska Universitet. Norway. 58 p.
- GUITARD, D. **1987**. Mécanique du Materiau Bois et Composites. Cepadues-Editions, France. 238 pp.
- HANN, R.A.; BLACK, J.M.; BLOMQUIST, R.F. **1962**. How Durable is Particleboard? *Forest Products Journal*, December 1962. pp: 577-584.
- HOYLE JR., R.J. **1973**. Factors Required for Establishing Structural Particleboard Design Properties. In: Proceedings of the 7th International Particleboard Symposium. Edited by Thomas M. Maloney. Washington State University. Pullman, WA, U.S.A. pp: 401-413.
- ILLIC, J. **2001**. Relationship among the dynamic and static elastic properties of air-dry *Eucalyptus delegatensis* R. Baker. *Holz als Roh- und Werkstoff* 59 (2001): 169-175.
- JAMES, W.L. **1962**. Dynamic strength and elastic properties of wood. *Forest Products Journal*, 12 (6): 253-260.
- JANOWIAK, J.J.; HINDMAN, D.P.; MANBECK, H.B. **2001**. Orthotropic Behavior of Lumber Composite Materials. *Wood and Fiber Science*, 33(4): 580-594.
- JAYNE, B.A. **1959**. Vibrational properties of wood as indices of quality. *Forest Products Journal*. 9(11): 413-416.
- KAISERLIK, J.H.; PELLERIN, R.F. **1977**. Stress wave attenuation as an indicator of lumber strength. *Forest Products journal*. 27(6): 39-43.
- KELLY, M. W. **1977**. Critical literature review of relationships between processing parameters and physical properties of particleboard. Gen. Tech. Rep. FPL-10. Forest Products Laboratory. Forest Service. U.S. Department of Agriculture. U.S.A. 66 p.
- KOLLMANN, F.F.P.; KUENZI, E.W.; STAMM, A.J. **1975**. Principles of Wood Science and Technology. Volume II: Wood Based Materials. Springer-Verlag. Ney York, NY. U.S.A. 703 p.
- KRAUTKRÄMER, J.; KRAUTKRÄMER, H. **1980**. Werkstoffpriifung mit Ultraschall. Springer-Verlag, Berlin.
- M McNATT, J.D. **1973**. Basic Engineering Properties of Particleboard. In: Proceedings of the 8th International Particleboard Symposium. Edited by Thomas M. Maloney. Washington State University. Pullman, WA, U.S.A. pp: 367-385.
- M McNATT, J.D.; LINK, C.L. **1989**. Analysis of ASTM D 1037 accelerated-aging test. *Forest Products Journal*, 39(10): 51-57.

- METRIGUARD. 1986.** Metriguard Model 239A Stress Wave Timer, Manual. Metriguard Inc. U.S.A. 17 p.
- METRIGUARD. 1990.** Metriguard Model 340 Transverse Vibration E-Computer, Operation Manual. Metriguard Inc. U.S.A. 20 p.
- NIEMZ, P., KUCERA, L.J.; BERNATOWICZ, G. 1997.** Untersuchungen zur Bestimmung des E-Moduls von MDF-Platten mittels Schallgeschwindigkeit- und Resonanzfrequenzmessung. *Annals of Warsaw Agricultural University - SggW, Forestry and Wood Technology*, No. 48 (1997), pp: 123-129.
- NPA. 1993.** Particleboard, ANSI A208.1-1993. Gaithersburg, MD: National Particleboard Association.
- PELLERIN, R.F. 1965.** A vibrational approach to nondestructive testing of structural lumber. *Forest Products Journal*. 15(3): 93-101.
- PELLERIN, R.F.; MORSCHAUSER, C.R. 1974.** Nondestructive testing of particleboard. In: Proceedings, 7th international particleboard symposium; 1973 March; Pullman, WA: Washington State University. U.S.A. 6 p.
- ROSS, R.J. 1984.** Stress wave speed and attenuation as predictors of tensile and flexural properties of wood-based particle composites. Pullman, WA: Washington State University. U.S.A. PhD. Dissertation.
- ROSS, R.J. 1985.** Stress wave propagation in wood products. In: Proceedings, 5th nondestructive testing of wood symposium; 1985 September; Pullman, WA: Washington State University. U.S.A. pp: 291-318.
- ROSS, R.J.; PELLERIN, R.F. 1988.** NDE of wood-based composites with longitudinal stress waves. *Forest Products journal*, 38(5): 39-45.
- ROSS, R.J.; PELLERIN, R.F. 1991.** NDE of green material with stress waves: preliminary results using dimension lumber. *Forest Products Journal*, 41(6): 57-59.
- ROSS, R.J.; PELLERIN, R.F. 1994.** Nondestructive testing for assessing wood members in structures: A review. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-70 (Rev.). Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest service, Forest Products Laboratory. 40 p.
- ROSS, R.J. ET AL. 1977.** Relationship between log and lumber modulus of elasticity. *Forest Products Journal*, 47(2): 89-92.
- ROSS, R.J. ET AL. 2000.** Comparison of Several Nondestructive Evaluation Techniques for Assessing Stiffness and MOE of Small-Diameter Logs. In: Proceedings of the 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. University of Western Hungary, Sopron. September 2000. p: 155-163.

- SANDOZ, J.L. 2000.** Wood Testing Using Acousto-Ultrasonic. Publication IBOIS 00:23, Institut de Statique et Structures IBOIS. Construction en Bois. In: Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE 2000). Whistler Resort, British Columbia, Canada. 6 p.
- SANDOZ, J.L. 2002.** High Performance Timber by Ultrasonic Grading. Publication IBOIS 00:20, Institut de Statique et Structures IBOIS. Construction en Bois. In: Proceedings of the 7th World Conference on Timber Engineering (WCTE 2002). MARA University of Technology, Selangor, Malaysia. 7 p.
- SASAKI, Y. 2001.** Ultrasonic Measurement of Applied Stresses in Wood by Acoustoelastic Birefringent Method. NDT.net - March 2001, Vol. 6, No. 03. 12 p.
- SCHAD, K. ET AL. 1995.** Stress wave Techniques for Determining Quality of Dimensional Lumber from Switch Ties. Res. Note FPL-RN-0265. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 12 p.
- SMULSKI, S. EDITOR. 1997.** Engineered Wood Products. A Guide for Specifiers, Designers and Users. PFS Research Foundation. Wisconsin. U.S.A. 294 p.
- TIMOSHENKO, S.; YOUNG, D.H.; WEAVER, W.JR. 1974.** Vibration problems in Engineering. 4th. John Wiley & Sons Ed. New York, NY. U.S.A.
- VOGT, J.J. 1985.** Evaluation of the tensile and flexural properties and internal bond of medium density fiberboard using stress wave speed and attenuation. Pullman, WA: Washington State University, M.S. Thesis.
- VOGT, J.J. 1986.** Longitudinal stress waves as predictors of internal bond strength. In: Proceedings, 12th international particleboard/composite materials symposium; 1986 March; Pullman, WA: Washington State University.
- WANG, X. ET AL. 2000.** Nondestructive Evaluation of Standing Trees with Stress Wave Methods. In: Proceedings of the 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. University of Western Hungary, Sopron. September 2000. pp: 197-206.