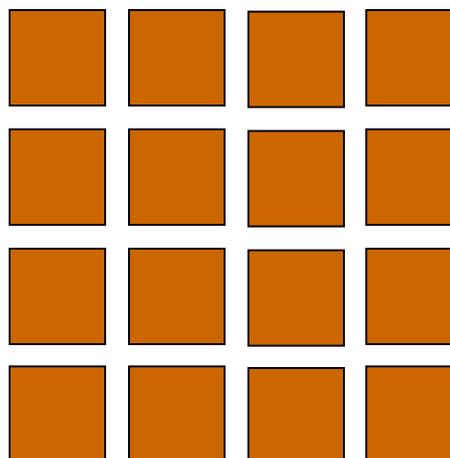


CARACTERIZACIÓN FÍSICO-MECÁNICA DE MADERA RECONSTITUIDA

Javier Ramón Sotomayor Castellanos

Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Morelia, Michoacán, México. 7 junio 2015



ISBN: 978-607-00-9082-0

Caracterización físico-mecánica de madera reconstituida/
Javier Ramón Sotomayor Castellanos

Primera Edición 7 junio 2015
Morelia, Michoacán, México
Derechos Reservados conforme a la ley

Responsable de la edición: Javier Ramón Sotomayor Castellanos. Diseño y formación: Laboratorio de Mecánica de la Madera, de la División de Estudios de Posgrado, de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México. Portada: Joel Benancio Olguín Cerón y Javier Ramón Sotomayor Castellanos.

Derechos reservados.

ISBN: 978-607-00-9082-0

© Javier Ramón Sotomayor Castellanos
Calle Llano Grande 295
Fraccionamiento Valle de Los Sauces
C.P. 58190
Morelia, Michoacán, México

© Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Edificio "TR", Ciudad Universidad
Avenida Francisco J. Mújica s/n., C.P. 58030
Teléfono: 01 443 322 3500, Morelia Michoacán

El Contenido de esta obra es propiedad del autor y de las instituciones patrocinadoras de la publicación, queda prohibida conforme a la ley su reproducción total o parcial. Derechos reservados: ©Laboratorio de Mecánica de la Madera, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera y ©Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Editado digitalmente en México / Electronically edited in Mexico (2838 KB)

Consulta electrónica:

www.cic.umich.mx
www.academia.edu
www.researchgate.net
<http://laboratoriodemecanicadelamadera.weebly.com/>

Sotomayor Castellanos, J.R. 2015. *Caracterización físico-mecánica de madera reconstituida*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 228 p.



Contenido

Presentación	4
Capítulo 1	7
Influencia del Perfil de densidad en las propiedades mecánicas y físicas de tableros de fibra de madera.	
Capítulo 2.....	52
Módulo de elasticidad y resistencia interna de tableros de <i>Picea abies</i> con adhesivos a base de soya y de trigo.	
Capítulo 3.....	71
Módulo de elasticidad de tableros de partículas de madera evaluado con métodos no destructivos.	
Capítulo 4.....	107
Caracterización mecánica con métodos no destructivos.	
Capítulo 5.....	136
Caracterización mecánica con vibraciones transversales.	
Capítulo 6.....	176
Higro-contracción e higro-expansión.	
Capítulo 7.....	204
Caracterización mecánica en flexión estática.	
Conclusiones.....	224



PRESENTACIÓN

El libro *Caracterización físico-mecánica de madera reconstituida* es una selección de trabajos de investigación desarrollados en el Laboratorio de Mecánica de la Madera, de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en Morelia, Michoacán, México.

El libro está formado por 7 artículos publicados en la revista *Investigación e Ingeniería de la Madera*, publicación del Laboratorio y de la cual el autor es el Editor. El periodo de difusión va de 2003 a 2015. Alumnos y profesores de la Facultad que participaron en los trabajos, así como los colaboradores de otras instituciones, son citados como coautores en los textos originales y en el comité editorial de la revista. Las instituciones que favorecieron las investigaciones son igualmente referidas en los artículos publicados.

Los artículos son:

1. Sotomayor Castellanos, J.R.; Ohashi, K.; Hatano, Y.; Shibusawa, T. 2006. Influencia del Perfil de densidad en las propiedades mecánicas y físicas de tableros de fibra de madera. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 2(1): 3-36.
2. Sotomayor Castellanos, J.R.; Metzger, M.T. 2007. Módulo de elasticidad y resistencia interna de tableros de *Picea abies* con adhesivos a base de soya y de trigo. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 3(1):3-15.
3. Sotomayor Castellanos, J.R. 2008. Caracterización mecánica de madera reconstituida. Módulo de elasticidad de tableros de partículas de madera evaluado con métodos no destructivos. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 4(1):3-26.



4. Sotomayor Castellanos, J.R.; Correa Olivares, V.E.; García Mariscal, L.J.; Hernández Maldonado, S.A.; Moya Lara, C.E.; Olgúin Cerón, J.B.; Zurita Valencia, W. 2011. Caracterización mecánica de madera reconstituida. Tableros aglomerados, contrachapados y enlistonados de madera evaluados con métodos no destructivos. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 7(1):16-35.
5. Sotomayor Castellanos, J.R.; Arellano García, S.H. 2011. Caracterización mecánica de madera reconstituida. Tableros aglomerados, contrachapados y enlistonados de madera evaluados con vibraciones transversales. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 7(2):3-31.
6. Sotomayor Castellanos, J.R.; Hernández Corona, E.; Pérez López, M.; Soto Rangel, D. 2012. Caracterización mecánica de madera reconstituida. Tableros aglomerados, contrachapados y enlistonados de madera. Higo-contracción e higo-expansión. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 8(1):3-22.
7. Sotomayor-Castellanos, J.R.; Ramírez Pérez, M. 2015. Caracterización mecánica en flexión estática de madera reconstituida. Tableros aglomerados, contrachapados y enlistonados. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 11(1):3-22.

Las funciones del primer autor fueron establecer las preguntas de investigación y las hipótesis, guiar los procedimientos experimentales y el análisis de resultados. Finalmente, la preparación y la edición de los manuscritos originales estuvieron a su cargo.

Cada artículo forma un capítulo y está integrado por título, resumen, palabras clave, abstract, key words, introducción, objetivos, materiales y métodos, resultados, análisis, conclusiones, agradecimientos y referencias.



El objetivo de este libro es facilitar a los alumnos y a los ingenieros en Tecnología de la Madera, el acercamiento a los resultados de investigación generados en el Laboratorio de la Facultad.

Información sobre los trabajos del Laboratorio de Mecánica de la Madera, puede ser consultada en las páginas de la red:

www.cic.umich.mx

www.academia.edu

www.researchgate.net

<http://laboratoriodemecanicadelamadera.weebly.com/>



CAPÍTULO 1

Influencia del perfil de densidad en las propiedades mecánicas y físicas de tableros de fibra de madera.

Resumen

La presente investigación es el estudio de la influencia del perfil de densidad en las características mecánicas y físicas de tableros de fibra de madera de *Cryptomeria japonica* D. Don. Las propiedades mecánicas estudiadas son: módulo de elasticidad dinámico, módulo de elasticidad estático, módulo de ruptura y la resistencia interna. Las características físicas son: perfil de densidad, densidad e higroscopicidad. Para cada uno de los diferentes tratamientos experimentales se obtuvieron perfiles de densidad particulares, donde la velocidad de prensado influyó de manera significativa en la formación del perfil de densidad: velocidades altas y medias produjeron perfiles tradicionales en forma de “U”, en comparación con el prensado de velocidad baja y el de dos velocidades que formaron perfiles de densidad más homogéneos. Los tratamientos de velocidades media y alta, proporcionaron valores de resistencia mecánica mayores a los obtenidos con los tratamientos de velocidad baja y de dos velocidades. Igualmente, los tratamientos de velocidades media y alta, proporcionaron valores de absorción y de variación dimensional menores a los obtenidos con los tratamientos de velocidad baja y de dos velocidades.

Palabras clave: *Cryptomeria japonica*, Ultrasonido, Flexión, Resistencia interna, Absorción de agua, Variación dimensional.

Abstract

The present research studies the influence of the density profile on the mechanical and physical characteristics of medium density fiberboards (MDF) of *Cryptomeria*



japonica D. Don. The mechanical properties studied are: dynamic modulus of elasticity, static modulus of elasticity, modulus of rupture in bending and internal bond. The physical properties are: density profile, density and higroscopicity. For each of the experimental treatments, particular density profiles were obtained, where the pressing speed influenced significantly in the formation of the density profile: high and intermediate pressing speeds produced traditional “U” shaped density profiles in comparison with the slow pressing speed and two speed pressing which formed more homogeneous density profiles. The treatments with high and intermediate speed resulted in higher values of mechanical strength, in contrast with low speed and two speed-pressing treatments. Likewise, high and intermediate speed treatments provided lower absorption and swelling values than those obtained with with low speed and two speed pressing treatments.

Key words: *Cryptomeria japonica*, Ultrasound, Bending, Internal Bond, Water absorption, Swelling.

Introducción

Una de las industrias de productos forestales de mayor crecimiento es la de fabricación de tableros de fibra de madera. Esta rama industrial tiene como estrategia desarrollar productos reconstituidos de partículas y fibra de madera con un menor costo energético e impacto ecológico, con la finalidad de aprovechar integralmente las materias primas provenientes del bosque.

Por otra parte, el desarrollo de productos compuestos de madera requiere de información básica para el mejoramiento de su producción en escala industrial. De la misma manera, para optimizar los procesos de fabricación y de control de calidad, es recomendable el estudio de las características tecnológicas de tableros de fibra de madera confeccionados en condiciones de laboratorio, cuyos resultados pueden contribuir al diseño y manufactura de compósitos de madera.



En la presente investigación se estudia de la influencia del Perfil de densidad en las características mecánicas y físicas de tableros de fibra de madera. Para tal fin, se elaboraron en laboratorio cuatro tableros de fibra de media densidad con madera de *Cryptomeria japonica* D. Don. Cada uno de los tableros fue elaborado con diferente velocidad de prensado, resultando así diferentes formas en sus Perfiles de densidad.

Las propiedades mecánicas estudiadas fueron: Módulo de Elasticidad Dinámico, Módulo de Elasticidad Estático, Módulo de Ruptura y la Resistencia interna. Las características Físicas estudiadas fueron: Perfil de densidad, Densidad e Higroscopicidad.

Los tableros de fibra de madera son utilizados cada vez más en grandes dimensiones, en combinación con otros materiales y con recubrimientos plásticos. Por este motivo la caracterización de sus propiedades higroscópicas, por ejemplo la capacidad para absorber humedad y en consecuencia la variación de su geometría, son un tema importante de investigación.

Por otra parte, las características mecánicas de los tableros, por ejemplo los Módulos de Elasticidad y de Ruptura, son necesarios en el cálculo de elementos de resistencia y en los elementos estructurales en Ingeniería de la madera. Además, la Resistencia interna a la tracción en el sentido transversal de tableros de fibra de madera es un buen indicador de la calidad de la cohesión entre adhesivo y madera, lo que resulta de su vocación para usos específicos.

Además la aplicación de métodos de evaluación no destructivos como el ultrasonido, son actualmente utilizados para la determinación de propiedades tecnológicas y el control de calidad en la producción de tableros de fibra.

Un tablero de fibra de madera de media densidad es definido por una densidad promedio comprendida entre 0.50 y 0.70 gr/cm³ según la norma de la Asociación Americana de Pruebas y Normalización (American Society for Testing and Materials,



2000) y por una densidad promedio comprendida entre 0.35 y 0.80 gr/cm³ según la norma de la Asociación Japonesa de Estándares (Japanese Standards Association, 2003).

En el proceso de manufactura de un tablero y particularmente durante la operación de prensado del colchón, la interacción entre el calor, la humedad y la presión, producen una deformación no uniforme a la matriz formada por el adhesivo y las fibras de madera. Dado que la temperatura de las placas de la prensa tienen una temperatura de alrededor de 150 °C, la humedad en el colchón se transforma en vapor en las regiones cercanas a la superficie del tablero. Este vapor plastifica la madera permitiendo consolidar y densificar las regiones cercanas a la superficie del tablero. Este fenómeno local y temporal se desarrolla dependiendo del espesor del tablero y antes de que penetre suficiente calor hacia su interior para continuar con la plastificación de la región central de la sección transversal.

Al mismo tiempo, mientras ocurre la penetración del calor hacia el centro del tablero, sus caras ya se están densificando y el proceso de curado de la resina-adhesivo se está llevando a cabo. Como resultado, la densidad local se intensifica ocasionando de esta forma un gradiente en la compactación de la madera a través de la sección transversal del tablero, produciendo así una distribución no uniforme de densidad a lo largo de la sección, es decir, en el espesor del tablero. De acuerdo con Maloney (1993), este fenómeno es característico durante la fabricación de tableros de partículas y de fibra de madera.

En tableros convencionales de fibra de madera, la distribución de su densidad a través de su espesor se compara con una forma de “U” con densidades mayores cerca de las superficies del tablero y la densidad menor en su región central (ver figura 1). De acuerdo con Kelly (1977), este perfil vertical de densidad, es decir, el valor de la densidad a escala local a través del espesor del tablero, influye en varias propiedades mecánicas y físicas del material, como su resistencia elástica y a la ruptura y su estabilidad dimensional.



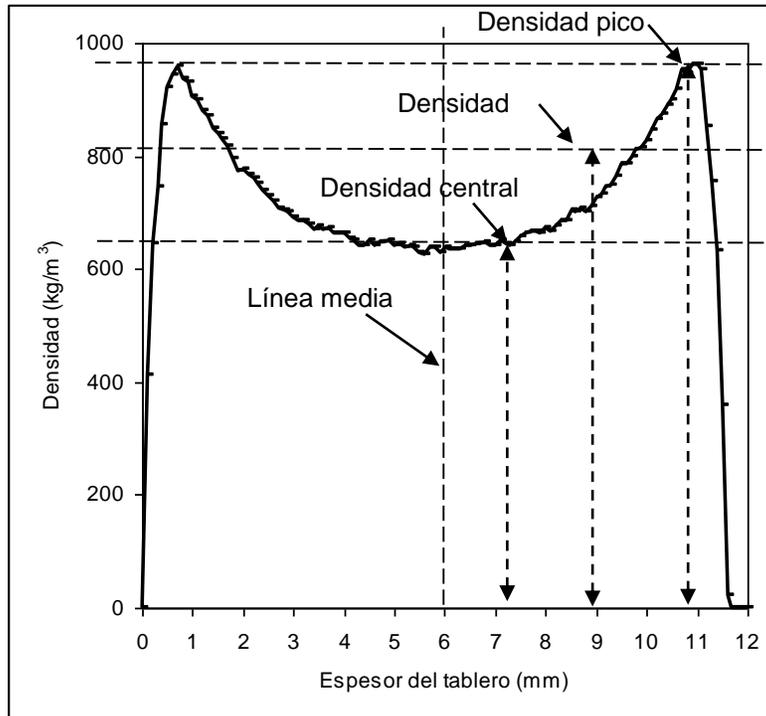


Figura 1. Definiciones del perfil de densidad según Strickler (1959).

De los diferentes detalles que conforman el perfil de densidad considerado simétrico en relación a la línea media del espesor del tablero (ver figura 1), la Densidad pico (D_p) y la Densidad central (D_c) son los principales parámetros que controlan las propiedades de los tableros de fibra y partículas de madera de acuerdo con Wong y col. (1998). La Densidad pico se refiere al promedio de las densidades más altas medidas en cada mitad del perfil. La densidad central es el promedio de densidades medidas en el 20% de la región central de la sección transversal (espesor) del tablero.

De acuerdo con Winandy y Kamke (2004), un tablero con vocación para acabados de superficie, pegado y laminado superficial, procura un Perfil de densidad con valores locales importantes cerca de las superficies. Igualmente, las características de resistencia mecánica en flexión son mejores en los perfiles con gradientes importantes, en comparación con tableros de perfiles homogéneos, es decir, tableros con valores de densidad local similares. Por otra parte, los investigadores concluyen que un perfil de densidad con altas densidades cerca de las superficies,



es un buen indicador de bajo hinchamiento ocasionado por la exposición del tablero a altos contenidos de humedad.

Igualmente, las investigaciones de Wang y Dai (2004) confirmaron que un tablero de fibra de madera de media densidad con densidad mayor en las capas cercanas a la superficie tiene buena calidad para procesos de laminado, pegado y terminado de superficie. Un tablero con un perfil más homogéneo es deseable para procesos de taladrado, moldurado y maquinado en general, así como para una mejora en sus propiedades de resistencia interna a la tensión en el sentido transversal.

Antecedentes

Varios investigadores han examinado anteriormente las propiedades del espesor de tableros de madera, particularmente su densidad a lo largo de la sección transversal con respecto a la línea de producción, es decir su Perfil Vertical de Densidad, o de manera más simple, Perfil de densidad. De acuerdo con Strickler (1959), el Perfil de densidad es definido por las relaciones entre las capas de alta densidad cerca de las superficies del tablero y por una baja densidad en la región central del espesor, tal como se ilustra en la figura 1.

Sotomayor (2003) y Ohashi y col. (2004 y 2006) publicaron anteriormente resultados parciales de la presente investigación. Los investigadores demostraron que las propiedades de resistencia mecánica se incrementan y la higroscopicidad de los tableros disminuye si la Densidad pico se localiza cerca de su superficie. Además, sus resultados proponen que el ultrasonido es útil en el estudio de las propiedades de tableros de fibra con diferentes Perfiles de densidad.

Por su parte, Moslemi (1974), Kelly (1977) y Maloney (1993), demostraron experimentalmente que el Perfil vertical de densidad en un tablero de fibra de madera es el resultado de la acción combinada de la velocidad de prensado, de la distribución de la presión y de la temperatura al interior del colchón-tablero, de la



distribución del contenido de humedad y del desarrollo de esfuerzos internos, variables necesarias para la consolidación del colchón.

De acuerdo a los resultados de Wong y col. (1998, 1999 y 2000), una de las variables que influyen de manera importante en la formación del Perfil de densidad durante la fabricación de tableros de fibra de madera es la velocidad de prensado del colchón, es decir, el tiempo que tarda la prensa en cerrarse a partir del contacto con el colchón, operación necesaria para lograr la consolidación y el espesor deseados del tablero.

Miyamoto y col. (2002) estudiaron el efecto de la velocidad de prensado durante la consolidación del colchón en la variación dimensional de tableros de partículas de madera. Entre sus principales conclusiones, los investigadores sugieren que la forma del Perfil de densidad es afectada de manera importante por el tiempo de prensado. Cuando éste se incrementa, la densidad pico se crea en el centro del espesor del tablero y disminuye hacia su superficie, incrementando así la densidad local en el centro del tablero.

Wong y col. (1998) investigaron los efectos del contenido de humedad y la velocidad de prensado en la formación del Perfil de densidad de tableros de madera con el objeto de establecer correlaciones entre los factores que influyen en la formación del Perfil de densidad y las propiedades de tableros de partículas. A partir de sus principales resultados los autores concluyen que las altas velocidades de prensado reducen la distancia de la densidad pico en relación con la superficie del tablero y no interviene de manera importante en la formación de su densidad central.

Wong y col. (1999) estudiaron las relaciones entre el Perfil de densidad y las propiedades de tableros de madera con Perfiles homogéneos y convencionales. Los autores concluyen que en comparación con tableros de Perfil homogéneo y para niveles equivalentes de densidades, los Módulos de Elasticidad y de Ruptura en flexión en tableros con Perfiles convencionales en forma de "U" son superiores



debido a las altas densidades cerca de sus superficies. Asimismo, los autores concluyen que las propiedades de resistencia interna (Internal Bond) en tableros con Perfiles convencionales en forma de “U” son inferiores debido a la presencia de bajas densidades en su región central. Finalmente los investigadores proponen que además del coeficiente de compactación y del contenido de humedad del colchón, la estabilidad dimensional de los tableros estudiados depende de los parámetros asociados a la densidad pico del material.

Wang y col. (2004) estudiaron la formación del Perfil de densidad en compósitos de madera durante el prensado en caliente. Los autores estudiaron particularmente varias secuelas de prensado y observaron durante esta operación la temperatura, la presión y la formación de la densidad y su distribución a través del espesor de tableros de fibra de madera de media densidad. Sus principales conclusiones indican que el Perfil de densidad se forma por una combinación de acciones que ocurren durante el periodo de compactación del colchón y aún después de que la prensa alcanza la posición final para densificar el material hasta un espesor deseado. La diferente distribución de temperatura interna en el colchón-tablero y la intensidad de la presión ejercida por la prensa son dos factores que contribuyen a la diferente densificación de la madera y aditivos utilizados, según su posición relativa en el espesor del colchón-tablero. Las regiones cerca de las superficies del colchón-tablero, es decir cerca de las placas de la prensa, son compactadas y sus aditivos son curados en primera instancia. Posteriormente, la región central del colchón-tablero es densificada. De esta manera se forma en los tableros un Perfil de densidad, usualmente en forma de “U”.

Cai y col. (2004) estudiaron la influencia de la densidad de la madera, el tipo de astilla utilizado y la conformación del colchón sobre las propiedades físicas y mecánicas de tableros de partículas de madera. Los autores observaron que se puede modificar el Perfil de densidad de los tableros al colocar partículas más finas cerca de sus superficies, lo que resulta en un Perfil de densidad en forma de “U”. Este fenómeno es ocasionado por la facilidad relativa con que son prensadas las



partículas pequeñas -en relación a las partículas más grandes-, colocadas en las superficies del tablero y así formar una densidad mayor en estas regiones. Además, los autores concluyen que un Perfil de densidad “plano” es característico de buenas propiedades dimensionales y un tablero con Perfil de densidad en forma de “U” tiene buenas propiedades de resistencia en flexión.

Shibusawa y col. (1997) utilizaron la técnica de ultrasonido para estudiar la influencia del contenido de humedad de las propiedades mecánicas de materiales compuestos de madera. En sus resultados los autores demuestran la utilidad de las ondas de ultrasonido en su caracterización mecánica. Para el caso de tableros de partículas de madera concluyeron que durante el periodo del prensado del colchón, la resistencia elástica y la presión al interior del colchón-tablero varían a causa de la conducción del flujo de calor a través del colchón-tablero. Este resultado explica las diferentes etapas y regiones de consolidación de las partículas de madera y del fraguado del adhesivo que resultan en valores desiguales de densidad a través del espesor del tablero, produciendo así el gradiente de densidad vertical en el producto final.

Sun y Arima (1998 y 1999) estudiaron las relaciones entre la resistencia interna de tableros de partículas de madera y su densidad. Utilizando técnicas de ultrasonido, los investigadores encontraron importantes correlaciones estadísticas entre estas dos propiedades del material. Igualmente demostraron la utilidad de métodos de evaluación no destructivos en la caracterización tecnológica de compósitos de madera.

Wang y col (2001) desarrollaron una técnica óptica de carácter no destructivo y encontraron importantes correlaciones entre el grado de hinchamiento transversal de tableros de fibra de madera elaborados en laboratorio y la densidad de cada una de sus capas. Los autores concluyeron que las capas externas de los tableros, las cuales son más densas y compactas, se deforman más cuando son sometidas a gradientes de humedad.



Schulte y Frühwald (1996) estudiaron la resistencia interna y su relación con el Perfil de densidad de tableros de fibra de madera de media densidad. Los investigadores encontraron una correlación importante entre la resistencia interna y la densidad media de los tableros.

A manera de síntesis de la revisión de los trabajos anteriores acerca del tema de investigación que aquí se presenta, se puede suponer que la secuela de prensado de tableros de fibra de madera influye en la formación de su perfil de densidad, y éste a su vez, repercute en las propiedades mecánicas y físicas del material. De tal forma, se sugiere la siguiente hipótesis de trabajo.

“El Perfil de densidad de tableros de fibra de madera de media densidad influye en su comportamiento físico-mecánico”.

Esta hipótesis está restringida al estudio de cuatro tableros homogéneos de fibra de madera de *Cryptomeria japonica* D. Don, fabricados en laboratorio y variando únicamente la velocidad de prensado durante su elaboración. Para fines de la presente investigación, otros factores que influyen en la formación del Perfil de densidad de los tableros son considerados constantes.

Objetivos

Objetivo 1. Elaborar en laboratorio cuatro tableros de madera de fibra de media densidad, variando la velocidad de prensado y manteniendo constantes las otras variables durante su fabricación y produciendo de esta manera, diferentes Perfiles de densidad.

Objetivo 2: Determinar para cada uno de los tableros fabricados, los Módulos de Elasticidad y de Ruptura en Flexión estática, los Módulos de Elasticidad dinámicos por ultrasonido, la Resistencia interna, el Perfil de densidad y los porcentajes de Variación dimensional y de Absorción de agua.



Objetivo 3. Analizar la influencia del Perfil de densidad de cada tipo de tablero fabricado sobre las características estudiadas.

Materiales y métodos

Elaboración de los tableros.

El material experimental provino de madera aserrada de *Cryptomeria japonica* D. Don. (Cedro Japonés), con la cual se prepararon cuatro colchones de fibra repartida de manera homogénea. Durante la elaboración de los colchones, se colocaron tres captosres de temperatura en cada colchón y se manufacturaron los tableros según cuatro tratamientos diferentes. La secuencia de preparación de la fibra de madera, de la elaboración del colchón y de la producción de los tableros se muestra en la figura 2.

Con el objetivo de medir la temperatura al interior del colchón durante la operación de prensado, se colocaron tres captosres en tres posiciones diferentes en el espesor del colchón. La posición de los captosres de temperatura al interior del colchón se presenta en la figura 3, y los diagramas de las temperaturas al interior del colchón durante la compactación de los tableros para los tratamientos A, B, C y D, se presentan en la figura 4.



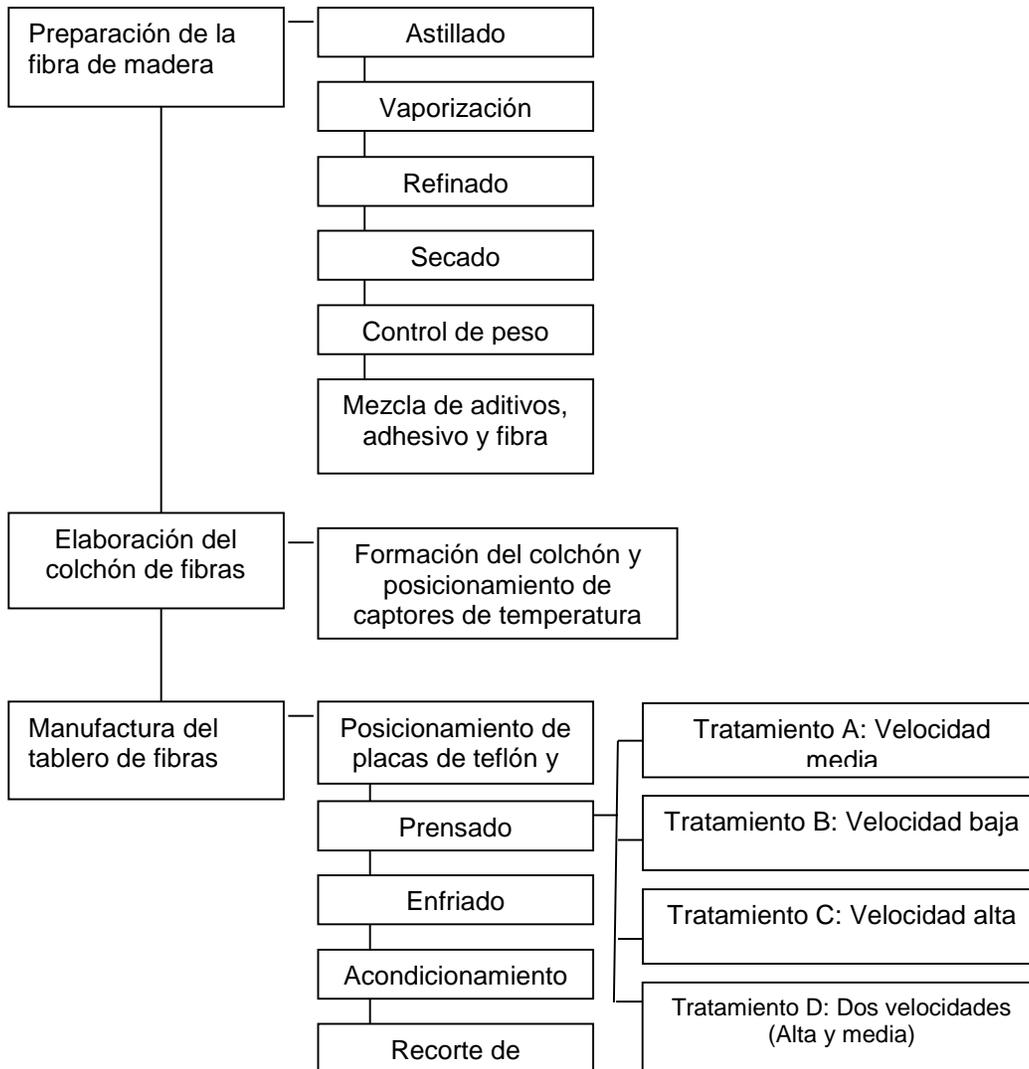


Figura 2. Secuencia de producción de los tableros.

Con el fin de fabricar tableros de diferentes perfiles de densidad, los colchones fueron prensados utilizando cuatro velocidades. Las variables del proceso de fabricación y los parámetros para la aplicación de los tratamientos experimentales se presentan en la tabla 1. La densidad objetivo fue de 0.700 gr/cm^3 . El espesor objetivo fue de entre 11 y 13 mm, considerando el efecto de recuperación (Springback, en inglés).



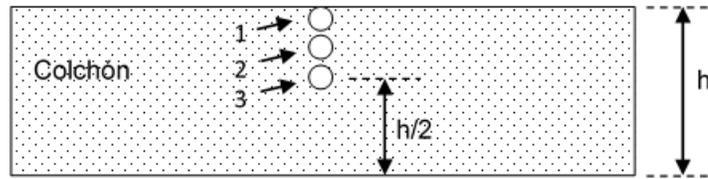


Figura 3. Esquema de la posición de los captore de temperatura. 1 captor superior, 2 captor medio y 3 captor central. h: espesor del colchón (1300 mm). Los captore fueron colocados aproximadamente 20 centímetros en el sentido transversal al interior del colchón.

Tabla 1. Parámetros de los tratamientos experimentales.

Parámetro	Unidades	Tratamiento			
		A Velocidad media	B Velocidad baja	C Velocidad alta	D Dos velocidades
Variables del proceso de fabricación					
Velocidad de la prensa	mm/s	2	0.5	10	10 - 2
Temperatura final	°C	-	107.4	113.7	-
Temperatura máxima	°C	117.4	110.4	118.9	101.4
Propiedades de los colchones					
Contenido de humedad de la fibras	%	6.8	6.8	6.8	6.8
Peso de las fibras	gr	1973	1973	1973	1973
Peso del adhesivo	gr	421	421	421	422
Peso del endurecedor	gr	42.1	42.02	42.01	42.06
Peso del agua	gr	8.72	8.72	8.77	8.74
Peso total	gr	2451	2451	2451	2452
Espesor promedio	mm	1268	1335	1222	1296
Dimensiones de los tableros					
Espesor promedio	mm	11.28	12.00	11.46	12.26
Largo promedio	mm	500	500	500	500
Ancho promedio	mm	500	500	500	500

Después de un periodo de 400 horas de preparación en una cámara de acondicionamiento a 20 °C de temperatura y 65 % de humedad relativa, los tableros fueron recortados en probetas según la Norma Industrial Japonesa para tableros de fibra (Japanese Standards Association, 2003). Esta estrategia es presentada en la figura 5. La prueba para cada probeta, su identificación, número y dimensiones se presentan en la tabla 2



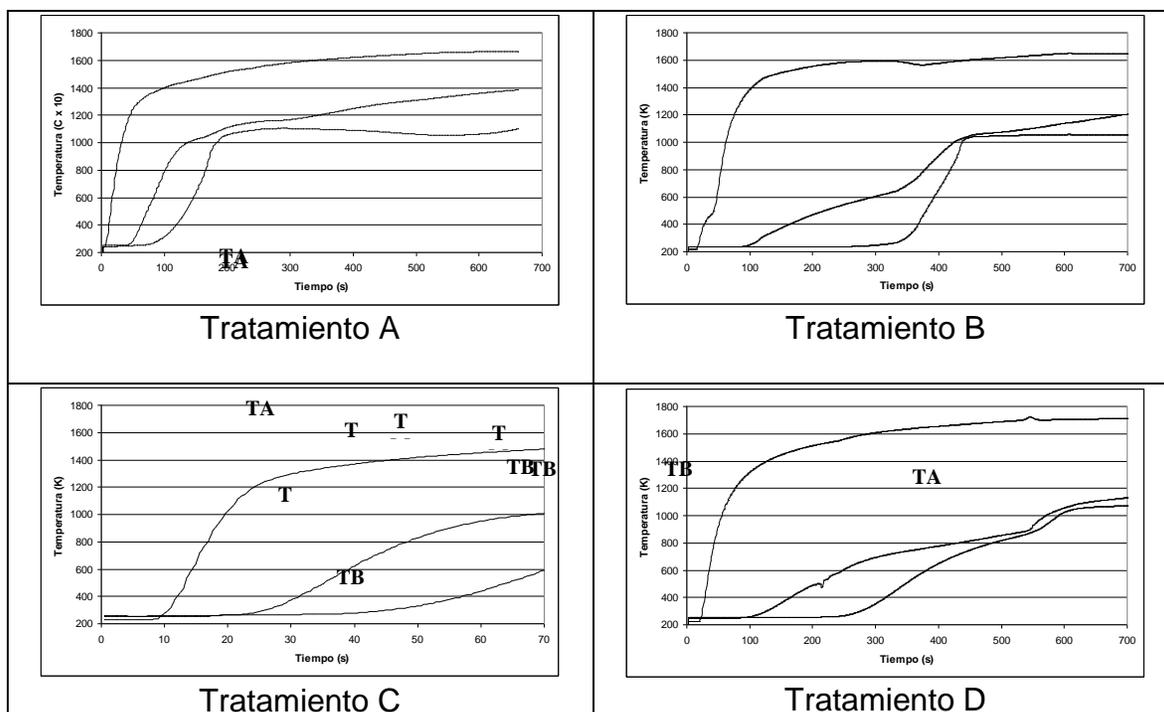


Figura 4. Temperaturas al interior del colchón durante la compactación del tablero. A: Tratamiento con velocidad media (Perfil en U); B: Tratamiento con velocidad baja (Perfil en M); C: Tratamiento con velocidad alta (Perfil en U); D: Tratamiento con dos velocidades (Perfil convexo). TA: Temperatura en el sensor en la posición alta en el tablero; TM: Temperatura en el sensor en la posición media en el tablero; TB: Temperatura en el sensor en la posición baja en el tablero.

Tabla 2. Identificación y dimensiones de las probetas.

Prueba	Probetas		
	Identificación (figura 5)	Total	Dimensiones (mm)
Perfil de densidad	61, 65, 67, 83, 85, 89	6	12 x 50 x 50
Ultrasonido estado seco	1, 3, 5, 7, 11, 13, 16	7	12 x 50 x 230
Flexión estado seco	1, 3, 5, 7, 11, 13, 16	7	12 x 50 x 230
Flexión estado húmedo	2, 4, 9, 10, 12, 14, 15	7	12 x 50 x 230
Resistencia interna	61, 63, 65, 67, 69, 82, 84, 86, 88	9	12 x 50 x 50
Absorción lenta de agua	62, 64, 66, 68, 83	5	12 x 50 x 50
Absorción rápida de agua	62, 64, 66, 68, 83	5	12 x 50 x 50
Variación dimensional lenta	62, 64, 66, 68, 83	5	12 x 50 x 50
Variación dimensional rápida	62, 64, 66, 68, 83	5	12 x 50 x 50



1	2	3	4	5	61	7	81	9
					62		82	
					63		83	
					64		84	
					65		85	
10	11	12	13	14		15		16
					66		86	
					67		87	
					68		88	
					69		89	

Figura 5. Selección de las probetas.

Diseño experimental.

Las probetas seleccionadas en cada uno de los tableros resultantes de los cuatro diferentes tratamientos (A, B, C y D), se destinaron a tres tipos de pruebas: Pruebas mecánicas no destructivas, destructivas y pruebas físicas, según se explica en la estrategia experimental presentada en la figura 6.

Para los ensayos destructivos de resistencia mecánica en flexión, se prepararon dos grupos de probetas: un primer grupo con un contenido de humedad del 12% llamado “estado seco” y un segundo grupo con un contenido de humedad saturado de la fibra de madera denominado “estado húmedo” (Contenido de humedad > 30%). Así mismo, para las pruebas físicas de absorción de agua y de variación dimensional, se realizaron dos conjuntos de probetas: un primer grupo llamado rápido y otro lento.



partir de las velocidades correspondientes a los tres modos de transmisión, se calcularon el Módulo de Elasticidad dinámico en transmisión directa (E_d TD), el Módulo de Elasticidad dinámico en transmisión superficial (E_d TS) y el Módulo de Elasticidad dinámico en transmisión transversal (E_d TT). La figura 7 ilustra la configuración del ensayo y la figura 8 presenta el ensayo de ultrasonido en transmisión superficial

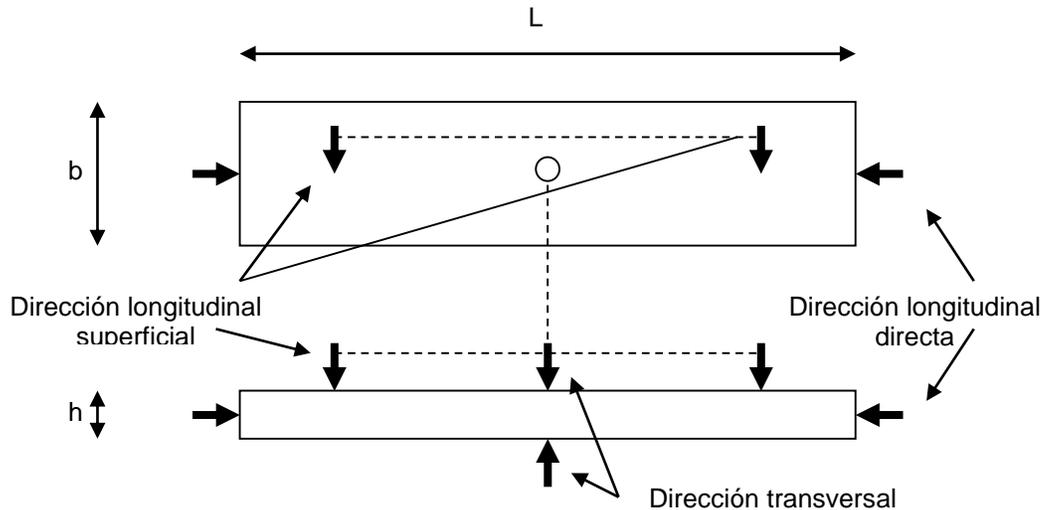


Figura 7. Configuración del ensayo de ultrasonido.

El Módulo de Elasticidad dinámico fue calculado con la fórmula:

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

Donde:

E_d = Módulo de Elasticidad dinámico (Pa)

v = Velocidad del sonido (m/s^2)

ρ = Densidad de la madera (kg/cm^3)



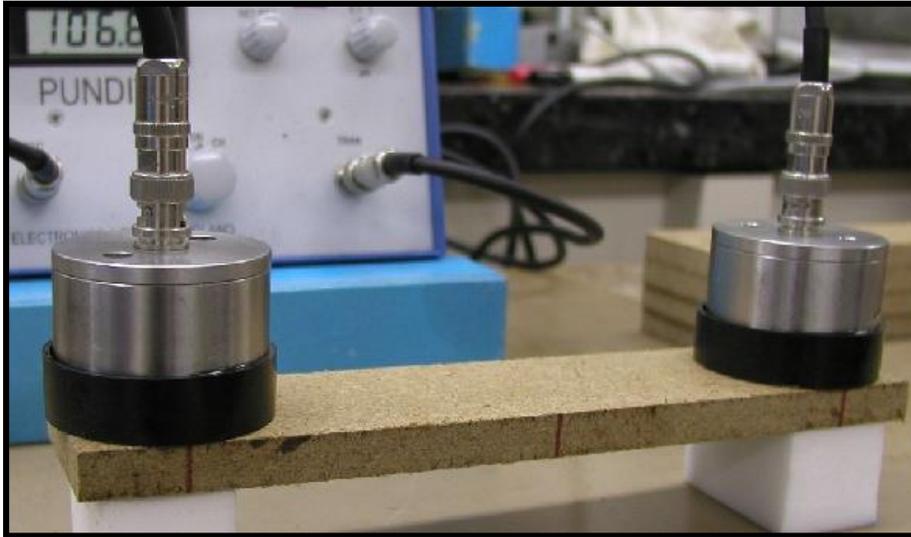


Figura 8. Ensayo de ultrasonido en transmisión superficial.

Pruebas destructivas

Flexión estática.

Las pruebas de flexión estática siguieron las recomendaciones de la Norma Industrial Japonesa JIS A 5905 (Japanese Standards Association, 2003). Para cada una de las 18 probetas (9 en estado seco y 9 en estado húmedo) de cada tratamiento (A, B, C y D), se midió la pendiente en el dominio elástico de la relación carga-deformación y la máxima fuerza necesaria para la ruptura en flexión. Para las pruebas de flexión en estado húmedo, las probetas se colocaron en agua a una temperatura de 20 °C durante 24 horas antes de la realización de los ensayos. Los ensayos se efectuaron en una máquina universal de pruebas mecánicas (Instron Corporation; Series IX Automated Materials Testing System), tal como se ilustra en la figura 9.





Figura 9. Ensayo de flexión estática.

El Módulo de Elasticidad fue calculado con la fórmula:

$$MOE = \frac{F L^3}{48 y I} \quad (2)$$

Donde:

MOE = Módulo de Elasticidad (Pa).

F = Fuerza aplicada en L/2 (N).

y = Deformación de la probeta en L/2 (m).

L = Portada de la probeta entre apoyos (m).

I = Momento de inercia de la sección transversal de la probeta (m⁴).

El Módulo de Ruptura fue calculado con la fórmula:

$$MOR = \frac{3 F_{rup} L}{2 b h^2} \quad (3)$$

Donde:

MOR = Módulo de Ruptura (Pa).



F_{rup} = Fuerza a la ruptura (N).

L = Portada de la probeta entre apoyos (m).

b = Ancho de la probeta (m).

h = Espesor de la probeta (m).

Resistencia interna.

Las pruebas de resistencia interna (Internal bond) siguieron las recomendaciones de la Norma Industrial Japonesa JIS A 5905 (Japanese Standards Association, 2003). Para cada tablero elaborado por los protocolos A, B, C y D, se realizaron 9 ensayos sobre probetas normalizadas de 50 x 50 mm de dimensiones adheridas con resina epoxica a los soportes de acero de la herramienta para ensayos de tracción transversal en una máquina universal de pruebas mecánicas (Instron Corporation; Series IX Automated Materials Testing System), tal como se ilustra en la figura 10.

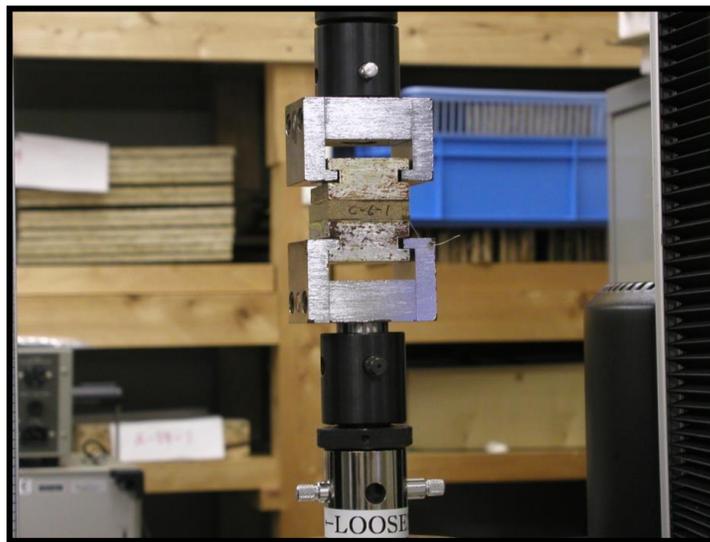


Figura 10. Ensayo de resistencia interna.

A partir de la máxima fuerza necesaria para la ruptura en la dirección del espesor de la probeta, se calculó la Resistencia Interna (RI) utilizando la fórmula:



$$RI = \frac{F}{b l} \quad (4)$$

Donde:

RI = Resistencia interna (Pa)

F = Fuerza a la ruptura (N)

b = Ancho de la probeta (m)

l = Largo de la probeta (m)

Pruebas físicas

Absorción de agua.

Las pruebas de Absorción de agua adaptaron las recomendaciones de la Norma Industrial Japonesa JIS A 5905 (Japanese Standards Association, 2003) y se prepararon dos grupos de probetas: un primer grupo para pruebas de absorción lenta de agua, el cual consistió en sumergir las probetas en agua a una temperatura de 20 °C durante 24 horas. Además, se preparó un segundo grupo de probetas para pruebas de absorción rápida de agua que consistió en sumergir las probetas en agua a 70 °C durante 2 horas y posteriormente a una temperatura de 20 °C durante una hora. Para cada grupo de inmersión lenta y rápida, y para cada tablero elaborado por los protocolos A, B, C y D, se realizaron 5 ensayos sobre probetas normalizadas de 50 x 50 mm. Los pesos de las probetas fueron medidos antes y después de la inmersión, los porcentajes de Absorción lenta de agua (AAL) y Absorción rápida de agua (AAR) fueron calculadas con la fórmula:

$$A = \frac{w_i - w_f}{w_i} (100) \quad (5)$$

Donde:

A = Absorción de agua (%)

w_i = Peso de la probeta antes de la inmersión (g).

w_f = Peso de la probeta después de la inmersión (g).



Variación dimensional.

Las pruebas de Variación dimensional adaptaron las recomendaciones de la Norma Industrial Japonesa JIS A 5905 (Japanese Standards Association, 2003) y se prepararon dos grupos de probetas: un primer grupo para pruebas de hinchamiento lento, el cual consistió en sumergir las probetas en agua a una temperatura de 20 °C durante 24 horas. Además, se preparó un segundo grupo de probetas para pruebas de hinchamiento rápido que consistió en sumergir las probetas en agua a 70 °C durante 2 horas y posteriormente a una temperatura de 20 °C durante 1 hora. Para cada grupo de inmersión lenta y rápida, y para cada tablero elaborado por los protocolos A, B, C y D se realizaron 5 ensayos sobre probetas normalizadas de 50 x 50 mm. El espesor de las probetas fue medido antes y después de la inmersión, los porcentajes de Variación dimensional lenta (VDL) y Variación dimensional rápida (VDR) fueron calculadas con la fórmula:

$$VD = \frac{t_f - t_i}{t_i} (100) \quad (6)$$

Donde:

VD = Variación dimensional (%)

t_i = Espesor de la probeta antes de la inmersión (m).

t_f = Espesor de la probeta después de la inmersión (m).

Perfil de densidad.

La determinación del Perfil de densidad se realizó según las indicaciones del manual del Laboratory Density analyzer DA-X, GreCon©. Para cada una de las 6 probetas de cada tratamiento (A, B, C y D), se determinó el Perfil de Densidad y se calcularon los siguientes parámetros: Densidad promedio (D), Densidad pico (Dp) y Densidad central (Dc). La figura 11 ilustra el aparato utilizado para esta prueba que trabaja



por medio de radiación gamma. Las medidas fueron realizadas con un intervalo de 0.01 mm a través del espesor de las probetas.



Figura 11. Determinación del Perfil de Densidad.

Resultados y análisis

Perfil de densidad.

Para cada uno de los diferentes tratamientos experimentales se obtuvieron perfiles de densidad particulares. En la figura 12 se presentan los gráficos de los valores promedio de los resultados obtenidos a partir de las seis probetas estudiadas para cada tratamiento.

El Tratamiento A con velocidad media de prensado de 2 mm/s resultó en un perfil en forma de “U”, similar al perfil obtenido con el tratamiento C con velocidad alta de 10 mm/s. No obstante la similitud en la geometría resultante del perfil en ambos tratamientos, las distancias pico (D_p) del tratamiento C no son semejantes, tal como se muestra en la figura 12.



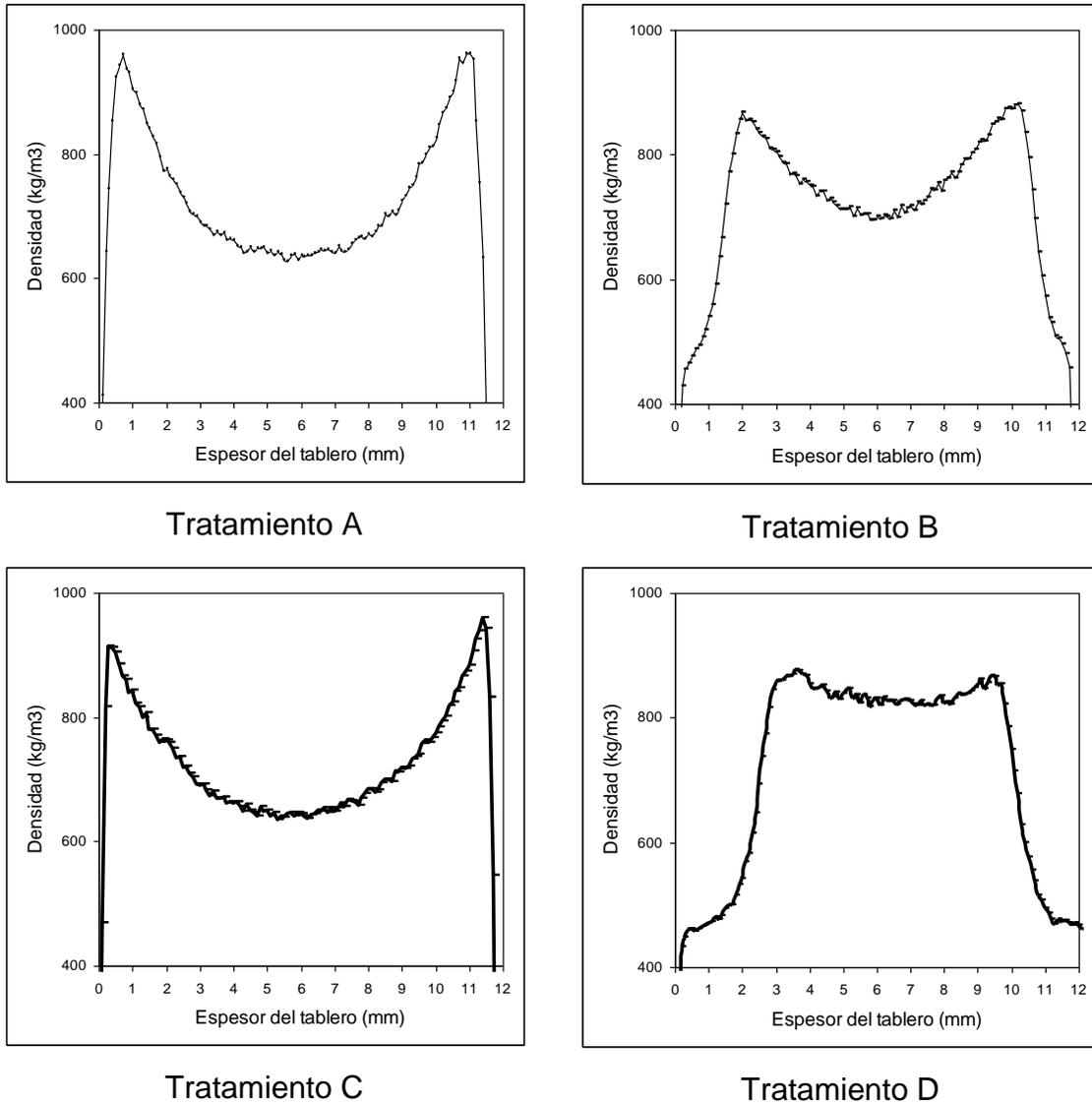


Figura 12. Perfiles de densidad obtenidos por diferentes tratamientos: A: Tratamiento con velocidad media (2 mm/s; Perfil en U); B: Tratamiento con velocidad baja (0.5 mm/s; Perfil en M); C: Tratamiento con velocidad alta (10 mm/s; Perfil en U); D: Tratamiento con dos velocidades (10 mm/s-2 mm/s: Perfil convexo).

La velocidad media del tratamiento A permitió el curado de la resina de manera uniforme en los dos lados del colchón que están en contacto con la prensa, produciendo así la simetría del perfil con respecto a la línea media del tablero (ver Introducción, figura 1) Por otra parte, el tratamiento C de velocidad alta ocasionó que uno de los lados del colchón en contacto con la prensa fraguara más rápido lo



que provocó la diferencia entre las densidades pico cerca de las superficies del tablero, tal como se muestra en la figura 12. Para los tratamientos A y C, las Densidades promedio (D) y las Densidades centrales (D_c) fueron similares. Es decir, la diferencia en la velocidad de prensado del colchón no influyó de manera significativa en estas características del tablero.

De la observación de la figura 12 se destaca que la posición de los valores de las Densidades pico (P_d) varió según el tratamiento aplicado: Los tableros de media y alta velocidad de prensado (tratamientos A y C) resultaron con Densidades pico altas y cerca de las superficies de los tableros. Por el contrario, los tableros resultantes de los tratamientos de baja velocidad y velocidades combinadas (B y D) proporcionaron valores de Densidad pico menores y alejados de las superficies de las probetas estudiadas. Resultado descrito anteriormente por Susuki y Miyamoto (1998) en un estudio de tableros de partículas de madera.

El tratamiento B resultó en un perfil de densidad en forma de M, tal como se muestra en la figura 12. La velocidad baja durante el prensado permitió la transferencia de calor y de humedad de las zonas periféricas de contacto del colchón con la prensa hacia el interior del tablero, lo que retardó la compactación de las superficies del colchón, aumentando así las distancias pico, pero formando una densidad pico y una zona de densidad central al interior del tablero semejante a la de los tratamientos A y C. De la misma manera, el tratamiento D con dos velocidades resultó en un perfil convexo. En este caso, la combinación de velocidades permitió un efecto de recuperación (springback) durante la compactación del colchón produciendo una amplia distancia pico y una zona plana en la región central del tablero, provocando así valores de Densidad promedio y Densidad pico inferiores a los obtenidos en los tratamientos A, B y C. Asimismo, esta combinación de velocidades produjo una densidad central mayor a las obtenidas en los otros tratamientos.



De la misma manera, de la observación de la figura 12 se subraya que la Densidad pico decrece cuando la velocidad de prensado incrementa. Igualmente, la distancia pico aumenta, es decir el valor de la densidad pico se desplaza hacia la línea central del tablero. Estos resultados coinciden con los encontrados anteriormente por Wang y col. (2004), Wong y col. (2001) y Kawasaki y col. (1998), entre otros investigadores, en estudios previos de la velocidad de prensado y su influencia sobre la formación del Perfil de densidad de tableros de fibra de madera de media densidad.

Características Mecánicas y Físicas.

Los tratamientos A y C produjeron Perfiles “tradicionales” en forma de “U” y Densidades pico importantes cerca de las superficies de los tableros (ver figura 12). En contraste, los tratamientos B y D resultaron en Perfiles más “homogéneos” con Densidades centrales más importantes. Estas características influyeron en los resultados de los valores promedio de las pruebas mecánicas y físicas de acuerdo a cada tratamiento (ver tabla 2).

Flexión estado seco.

Los valores promedio del Módulo de Elasticidad estático (MOE) en estado seco fueron similares para los tratamientos A (Velocidad media) y C (velocidad alta). Igualmente los valores del Módulo de Ruptura (MOR) fueron comparables entre estos dos tratamientos (ver tabla 2).

De acuerdo a la Norma Japonesa JIS A 5005, estos tableros se clasifican por sus propiedades de resistencia en flexión, como de tipo 25. El tratamiento B (Velocidad baja), resultó en valores inferiores en un 50-60% en comparación con los tratamientos A y C, y el tratamiento D (Dos velocidades) mostró igualmente resultados considerablemente inferiores a los otros métodos.



Tabla 2. Características mecánicas y físicas.

Pruebas y variables	Características y unidades	Tratamiento			
		A	B	C	D
Variables del proceso					
Velocidad de la prensa		Velocidad media	Velocidad baja	Velocidad alta	Dos velocidades
	mm/s	2	0.5	10	10 - 2
Tipo de Perfil de densidad		Perfil en U	Perfil en M	Perfil en U	Perfil convexo
Características mecánicas					
Flexión estado seco	MOE (GPa)	3.49 (0.20)*	1.93 (0.12)	3.42 (0.21)	0.72 (0.11)
	MOR (MPa)	28.74 (1.34)	19.85 (1.14)	27.22 (1.58)	8.08 (0.74)
Flexión estado húmedo	MOE (GPa)	1.24 (0.14)	0.44 (0.05)	1.21 (0.18)	0.11 (0.01)
	MOR (MPa)	12.38 (0.66)	7.96 (0.68)	11.50 (0.71)	2.83 (0.25)
Ultrasonido Transmisión directa	Ed TD (GPa)	4.72 (0.32)	4.35 (0.21)	4.42 (0.36)	3.33 (0.20)
Ultrasonido Transmisión superficial	Ed TS (GPa)	3.89 (0.31)	1.74 (0.20)	3.71 (0.21)	0.22 (0.15)
Ultrasonido Transmisión transversal	Ed TT (GPa)	0.43 (0.03)	0.26 (0.05)	0.36 (0.07)	0.09 (0.02)
Resistencia interna	RI (MPa)	0.65 (0.05)	0.08 (0.01)	0.55 (0.04)	0.02 (0.0023)
Características físicas					
Densidad promedio	D (gr/cm ³)	0.71 (0.01)	0.70 (0.02)	0.71 (0.02)	0.67 (0.02)
Densidad pico	Dp (gr/cm ³)	0.97 (0.02)	0.90 (0.04)	0.96 (0.02)	0.89 (0.02)
Densidad central	Dc (gr/cm ³)	0.62 (0.01)	0.68 (0.02)	0.63 (0.02)	0.80 (0.03)
Absorción rápida de agua	AAR 2 + 1 hr. (%)	68.80 (1.47)	80.74 (3.97)	68.89 (3.35)	104.30 (7.49)
Absorción lenta de agua	AAL 24 hrs. (%)	81.31 (2.03)	100.62 (5.97)	84.17 (7.12)	150.07 (6.73)
Variación dimensional rápida	VDR 2 + 1 hr. (%)	11.30 (0.29)	19.20 (0.69)	11.49 (0.40)	35.76 (1.59)
Variación dimensional lenta	VDL 24 hrs. (%)	17.79 (0.67)	34.59 (0.51)	17.44 (0.42)	72.04 (2.61)

* Datos entre paréntesis = Desviación estándar.

Por otra parte, los valores de MOE y de MOR mostraron una fuerte correlación para los cuatro tratamientos, como se ilustra en la figura 13. De su observación, los resultados de los tratamientos de media y alta velocidad mostraron similitudes tanto



en sus valores como en sus relaciones entre sus Módulos de Elasticidad y de Ruptura.

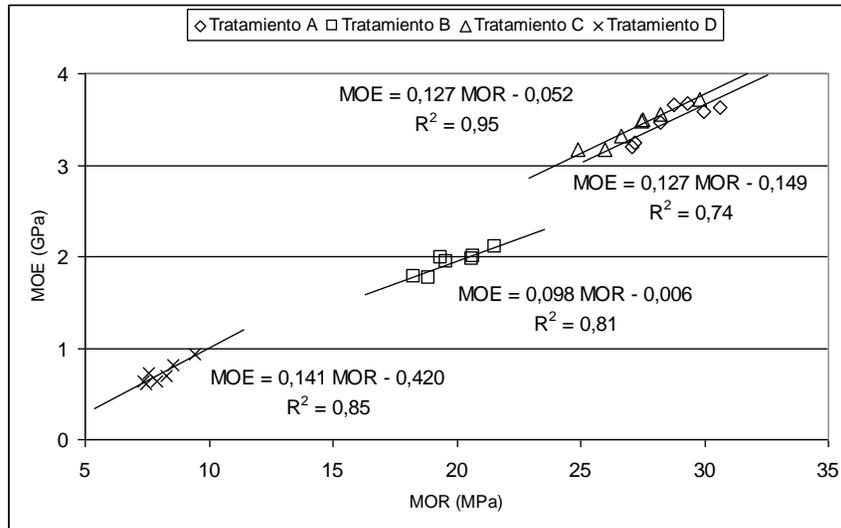


Figura 13. Correlaciones entre MOE y MOR en estado seco.

Debido a la diferente velocidad de prensado, los tratamientos A y C resultaron en Perfiles de densidad convencionales en forma de U. En cambio, los tratamientos B y D produjeron Perfiles de densidad más homogéneos. Estos valores de MOE y MOR fueron indicadores de la influencia de la Densidad pico cerca de las superficies de los tableros donde los esfuerzos de flexión son más importantes y los tableros requieren una mayor rigidez en los extremos de su sección transversal, resultados que coinciden con los de Susuky y Miyamoto (1998) para tableros de partículas de madera de densidades similares a las del presente estudio.

Flexión estado húmedo.

Los resultados de flexión en estado húmedo resultaron inferiores en comparación a los arrojados en las pruebas de flexión seca (ver tablas 12). Sin embargo, todos los tratamientos mostraron resultados en una proporción similar a la del estado seco. Durante las pruebas en estado húmedo, se observó que las probetas de los tratamientos B y D mostraron un hinchamiento excesivo en sus capas superficiales



resultado de los valores bajos de densidad local (ver figura 12). Como efecto, las relaciones entre su MOE y MOR fueron importantes, pero sus valores se mostraron bajos en comparación con los resultados de los tratamientos A y C, tal como se ilustra en la figura 14.

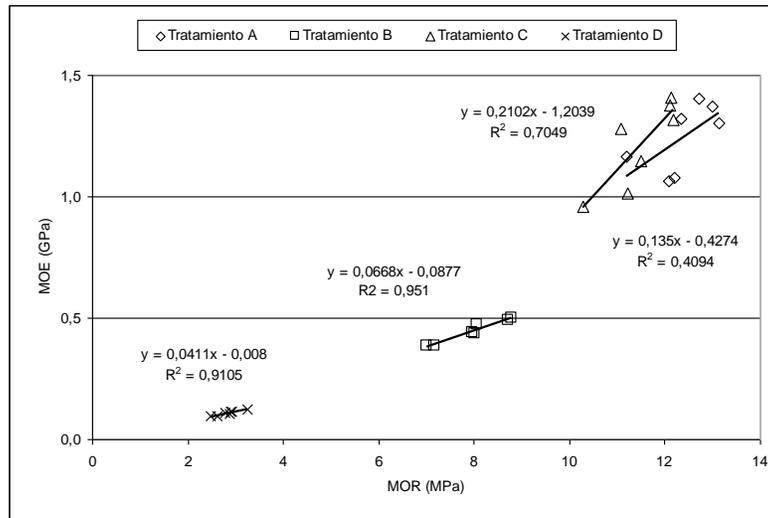


Figura 14. Correlaciones entre MOE y MOR en estado húmedo.

Es importante destacar que la dispersión de los datos entre los MOR y MOE en estado húmedo, presentados en la figura 14, es más amplia en comparación de los resultados para las pruebas en estado seco (figura 13). Esta dispersión es más evidente en los tratamientos A y C. En contraste, los resultados de las probetas de los tratamientos B y D fueron más compactos y con correlaciones más fuertes.

Por otra parte, los coeficientes de correlación entre los Módulos de Elasticidad y de Ruptura fueron menos fuertes para el estado húmedo, en comparación con los resultados de las pruebas de flexión en estado seco.

La comparación de resultados entre los estados seco y húmedo pone de manifiesto el efecto de la absorción de humedad de los tableros de fibra de madera en la disminución de su resistencia mecánica, de acuerdo con las proposiciones de Kawamoto y Williams (2002).



Ultrasonido

Respecto a los resultados de las pruebas de ultrasonido, para un mismo tratamiento, la velocidad en transmisión directa (V_{TD}) fue mayor que la velocidad en transmisión superficial (V_{TS}) y la velocidad en transmisión transversal (V_{TT}) presentó valores muy inferiores en comparación con las velocidades anteriores, como se explica en la figura 15. Estos valores de velocidades de transmisión son similares a los datos presentados anteriormente por Shibusawa y col. (1997) y Sun y Arima (1998).

Para los tratamientos A y C, con máximas densidades cerca de las superficies de los tableros, las velocidades de transmisión superficial fueron superiores en comparación con las velocidades en los tratamientos B y D, en los que las densidades de las capas cerca de la superficie fueron inferiores, tal como se muestra en la figura 15. Comparablemente, la velocidad de transmisión transversal fue superior para los tratamientos A y C en comparación con los tratamientos B y D.

Para el caso de la transmisión superficial el Perfil de densidad de forma convexa (Tratamiento D), la velocidad del sonido resultó en valores muy inferiores en comparación con los valores correspondientes de transmisión directa. La baja densidad del médium cerca de las superficies y en consecuencia la presencia importante de espacios vacíos entre los componentes de la matriz fibra-adhesivo, ocasionaron que las ondas acústicas necesitaran más tiempo para recorrer la misma distancia que sobre las superficies de perfiles con Densidades pico importantes y cercanas a las superficies como es el caso de los tratamientos A y C.



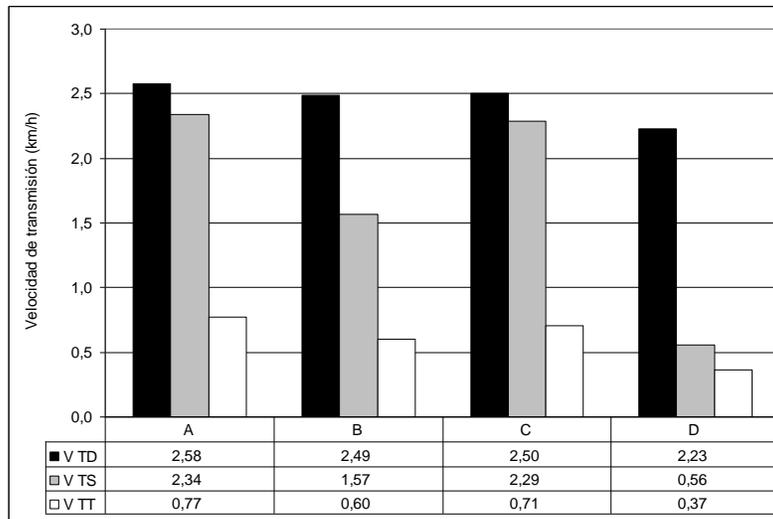


Figura 15. Velocidad de transmisión del ultrasonido en los tratamientos A, B, C y D y según el modo de transmisión. V TD: Transmisión directa; V TS: Transmisión superficial; V TT: Transmisión transversal.

Con un enfoque similar, la diferencia entre las velocidades en el sentido longitudinal del tablero (transmisión directa y/o superficial) y la velocidad en la dirección transversal, es decir, a través del espesor del tablero, puede explicarse por el hecho de que las ondas de ultrasonido de alta frecuencia son sensibles a la estructura interna del médium: Cuando la onda pasa a través de la probeta, la cual por su Perfil de densidad puede ser considerada como compuesta por tres regiones: dos capas de alta densidad formadas en los contornos de las densidades pico cerca de las superficies y una capa central formada alrededor de la densidad central, provocan mayor reflexión y pérdida de energía, puesto que las ondas deben viajar a través de diferentes interfaces del médium, fenómeno que se ve reflejado en las velocidades de transmisión.

Otra forma de estudiar el efecto del Perfil de densidad de los tableros sobre su comportamiento respecto a ondas acústicas, es el análisis de los resultados de los diferentes Módulos de Elasticidad dinámicos calculados a partir de las velocidades de transmisión y ajustados según su densidad promedio.



Los Módulos de Elasticidad en transmisión directa (Ed TD) fueron superiores a los Módulos determinados en transmisión superficial (Ed TS). Este resultado fue proporcional para los cuatro tratamientos, tal como se muestra en la figura 16. Además, la transmisión directa fue menos sensible al perfil de densidad en comparación con los Módulos estáticos correspondientes al estado seco (ver tabla 2).

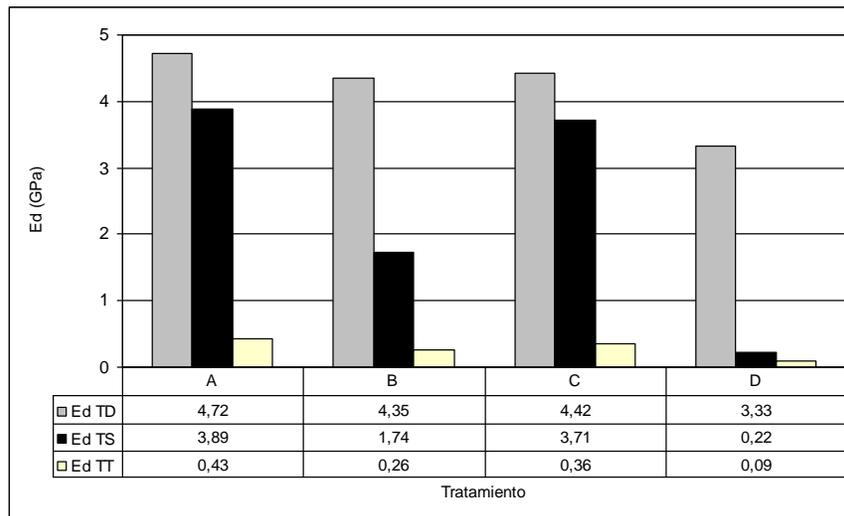


Figura 16. Módulos dinámicos en transmisión directa (Ed TD), superficial (Ed TS) y transversal (Ed TT), según tratamientos A, B, C y D.

Los valores del Módulo de Elasticidad dinámico en transmisión directa para el Perfil en U (tratamiento A) fue análogo a los del tratamiento C (Perfil también en forma de U) y estos dos fueron mayores que los valores resultantes de los tratamientos B y C con perfiles más homogéneos. En cambio, los valores de los Módulos dinámicos en transmisión superficial fueron más sensibles al perfil de densidad.

Por otra parte, los valores de los Módulos dinámicos fueron mayores que los módulos estáticos correspondientes en estado seco y los Módulos dinámicos en transmisión transversal mostraron una importante anisotropía. Tal como se muestra en la figura 16.



Resistencia interna.

Respecto a los valores de Resistencia interna (RI) a la tracción en el sentido transversal de los tableros, los tratamientos A y C con perfiles de densidad en forma de U presentaron valores superiores a los de los tratamientos B y D de Perfiles en forma de M y convexo respectivamente, tal como se muestra en la figura 17.

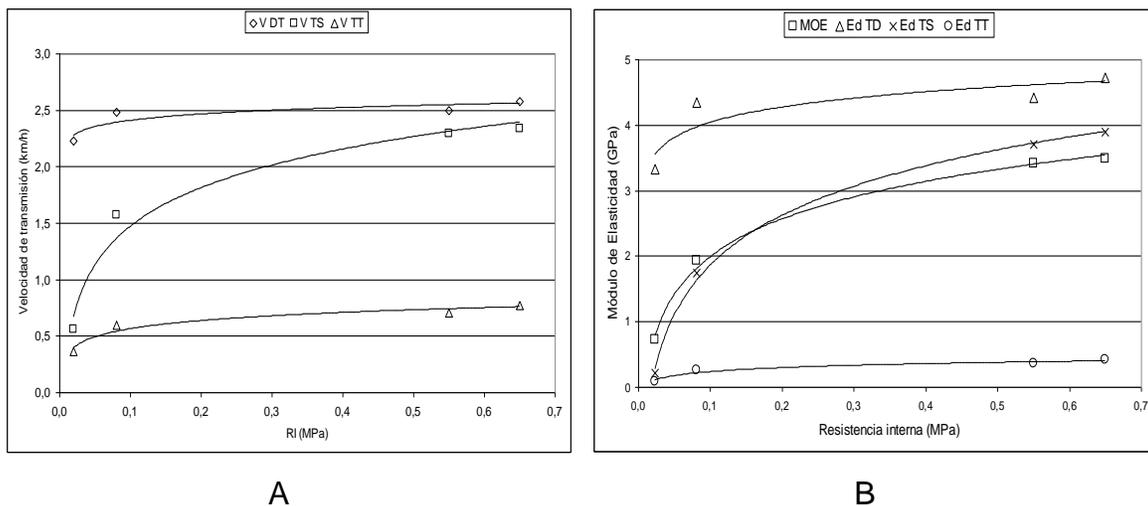


Figura 17. Relaciones para los tratamientos A, B, C y D entre: A) RI y la velocidad de transmisión en los modos de transmisión directa (V TD), transmisión superficial (V TS) y transmisión transversal (V TT); B) RI y los Módulos de Elasticidad.

Para los tratamientos A y C los Módulos dinámicos en transmisión directa revelaron resultados mayores que el Módulo dinámico en transmisión superficial y ambos fueron proporcionalmente mayores al Módulo dinámico en transmisión transversal. Igualmente, en todos los tratamientos, los valores del Módulo en flexión estática fueron proporcionalmente inferiores a los valores de los Módulos dinámicos.

Por otra parte, el tratamiento D (Dos velocidades, Perfil convexo) resultó en valores inferiores de Resistencia Interna y de Módulos de Elasticidad. Estos resultados son similares a los encontrados anteriormente por Schulte y Frühwald (1996).



De la observación de la figura 17, se puede deducir que la Resistencia interna de los tableros, varió proporcionalmente a la velocidad de transmisión, la cual muestra que ésta es un buen indicador de las propiedades de cohesión interna del material. De acuerdo con Sun y Arima (1998), la Resistencia interna de tableros de partículas de madera depende de la cantidad y de la calidad de los puntos de enlace entre el adhesivo y la madera. Por la diferente estructura en su Perfil de densidad para cada tratamiento, la cantidad de espacios vacíos entre fibras es mayor en regiones con densidades locales con valores bajos, en comparación con regiones con densidades altas, donde el tablero es más compacto. En consecuencia, la onda acústica necesita recorrer los contornos de los espacios vacíos y por tanto toma más tiempo de difusión. Como resultado las velocidades de transmisión disminuyen proporcionalmente.

Características Físicas

Densidad.

Los Módulos de Elasticidad (MOE) y de Ruptura (MOR) de los tableros estuvieron relacionados de manera lineal con la densidad promedio de cada uno de los tratamientos, independientemente del tipo de protocolo o del estado higroscópico del material, tal como se explica en la figura 18. Para una Densidad mayor, corresponden valores igualmente crecientes de los MOE y MOR.

Los resultados de las pruebas en estado seco mostraron una dispersión ligeramente superior a la dispersión de datos de las experiencias en estado húmedo, tal como se indica en la figura 18. La misma figura muestra además los valores superiores de MOE y MOR asociados a las pruebas en estado seco. Resultado que confirma el aumento de la resistencia mecánica de los tableros de fibra de madera en relación a la disminución de su contenido de humedad.



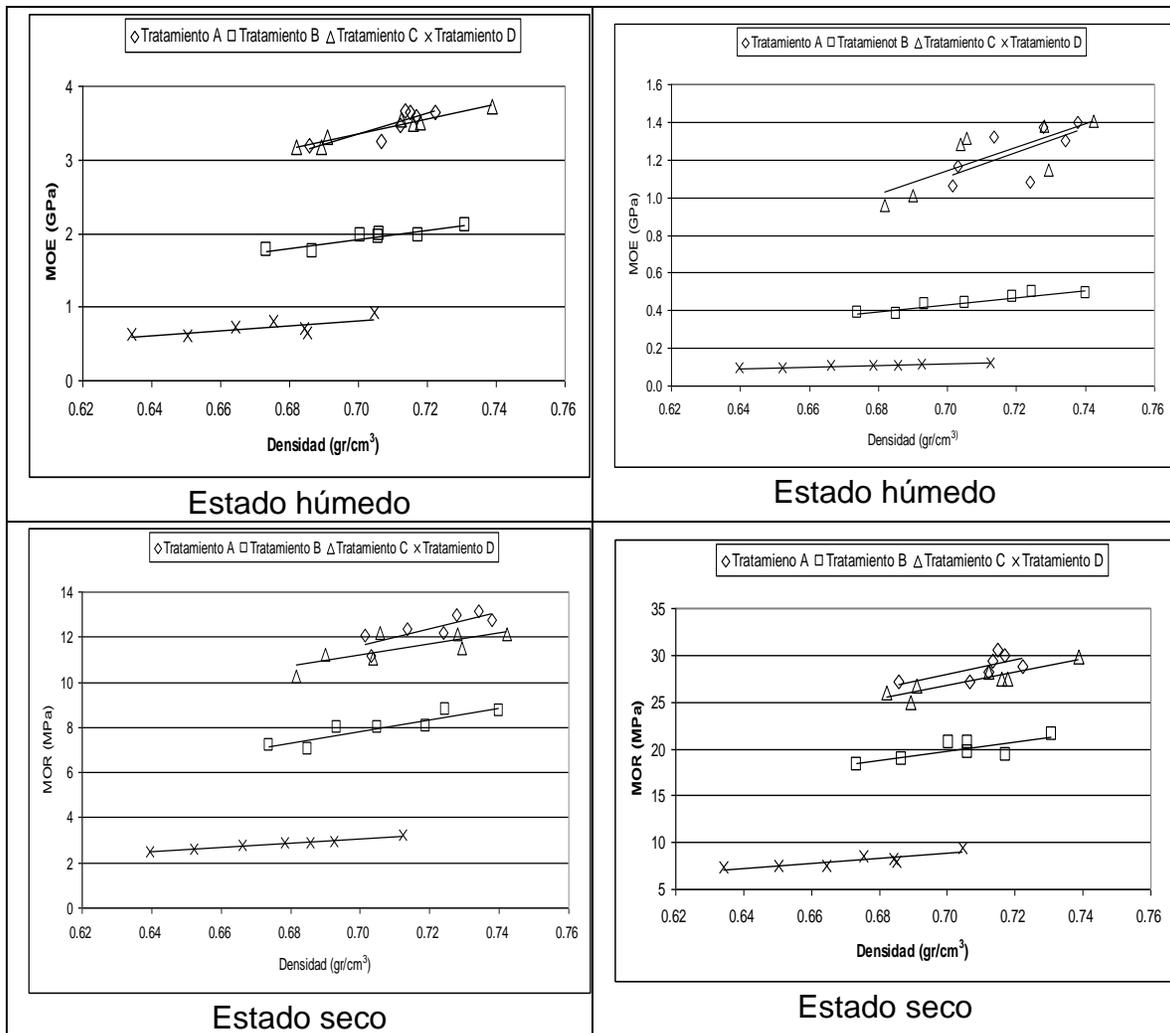


Figura 18. Diagramas de dispersión y curvas de correlación entre el MOE, MOR y la Densidad para cada tratamiento. A y B estado seco. C y D estado húmedo.

Respecto al efecto de la Densidad pico (Dp) sobre los Módulos de Elasticidad Dinámicos (Ed TD, Ed TS y Ed TT) y estático (MOE), la figura 19 señala la proporción de los valores para cada tratamiento (A, B, C y D) y su tendencia entre tratamientos según el valor de su Densidad pico.



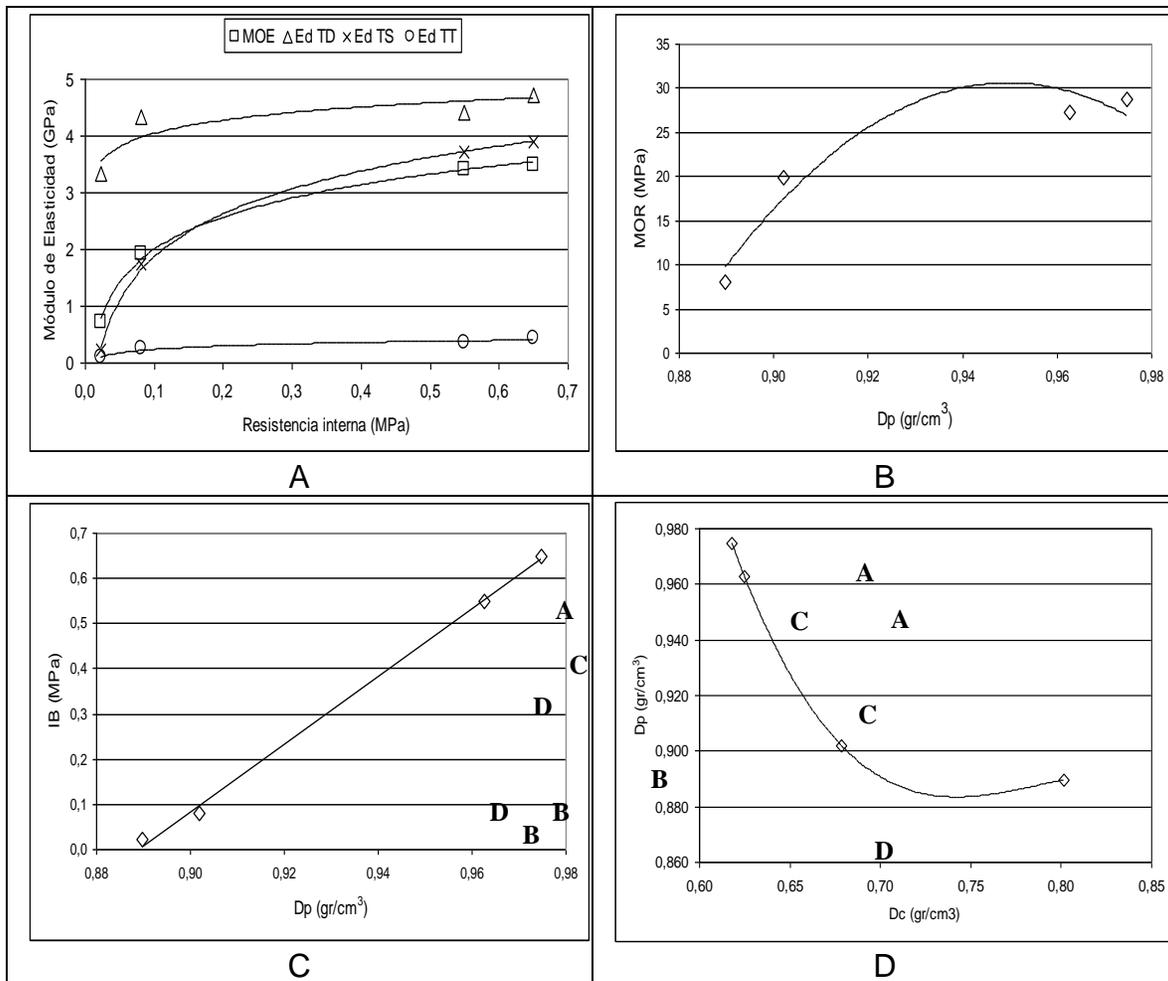


Figura 19. Relaciones para los tratamientos A, B, C y D entre: A) Densidad pico y el Módulo de Elasticidad; B) Densidad pico y el Módulo de Ruptura; C) Densidad pico y la Resistencia Interna; D) Densidad central y Densidad pico.

Los Perfiles de densidad convencionales en forma de U (Tratamientos A y C) mostraron que sus valores comparativamente superiores de Densidad pico correspondieron entre sí con valores superiores de Módulos de Elasticidad, confirmando de esta manera la influencia de la Densidad pico en la resistencia mecánica en flexión de tableros de fibra de madera: A mayor valor de Densidad pico de un tablero, mayor serán sus módulos de Elasticidad y de Ruptura, resultados proporcionales a los cuatro tratamientos y/o Perfiles de densidad obtenidos.



Higroscopicidad.

Absorción de agua y Variación dimensional.

Los tratamientos con Perfil de densidad en forma de “U”: A y C, absorbieron menos agua en comparación de los tableros con Perfiles en forma de “M” y convexo. Este resultado fue similar para los protocolos rápido y lento. Igualmente la variación dimensional del espesor de los tableros producto de los tratamientos A y C sufrieron menos hinchamiento en relación a los tableros B y D, tal como se muestra en las figura 20.

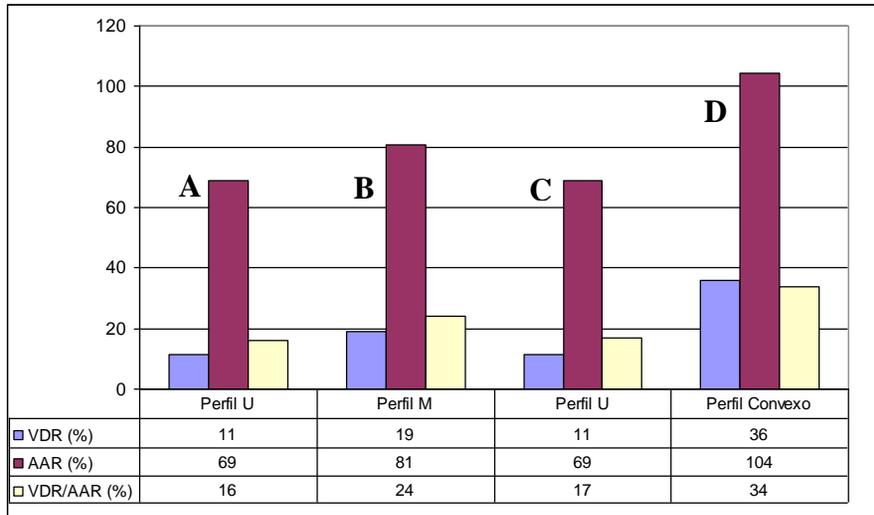
De acuerdo a Sun y Arima (1998), el hinchamiento de un tablero de madera ocasionado por su inmersión en agua, tiene dos componentes: el hinchado debido a la absorción de agua por las partículas higroscópicas de madera, y un segundo: la liberación del esfuerzo de compresión ocasionado durante el prensado del colchón-tablero. El segundo componente no se revierte aún si el tablero es seco, efecto que se conoce como efecto de recuperación (Springback).

Para el caso que nos ocupa, el efecto más importante en la respuesta higroscópica de los tableros estudiados puede ser atribuido al hinchamiento de las partículas de madera cerca de las superficies de las probetas y complementariamente, al efecto de liberación de esfuerzos en las zonas de Densidad central. En los Perfiles de los tratamientos B y D, la compactación cerca de las caras de estos tableros y una mayor proporción de su Densidad central, en comparación con los tableros de Perfil en U (Tratamientos A y C), pueden explicar que los perfiles más homogéneos fueron más inestables dimensionalmente.

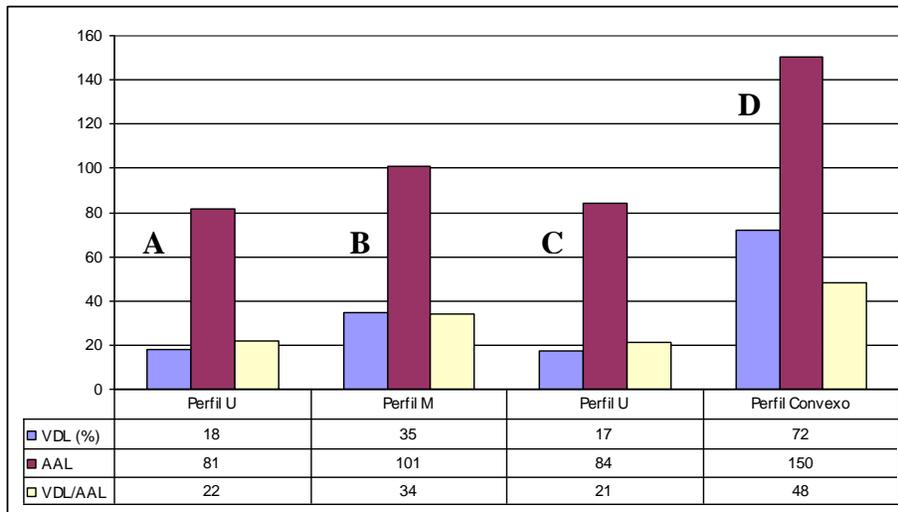
Este comportamiento depende entre otros factores, del tipo de resina empleada en la fabricación del material y de la forma y tamaño de las partículas de madera que conforman el tablero, de acuerdo con Susuki y Miyamoto (1998). En el caso que nos



ocupa, todos los tratamientos utilizaron el mismo tipo y cantidad de adhesivo y las fibras fueron geoméricamente uniformes.



A



B

Figura 20. Variación dimensional y absorción de agua para tratamientos A, B, C y D. a) protocolo rápido; B) protocolo lento.

La figura 20 ilustra la capacidad de los tableros de Perfil en U (Tratamientos A y C) para expandirse menos al absorber humedad, en contraste con los tableros de



Perfiles en forma de M y convexo. Es decir, para el caso de tableros que requieren una mínima expansión ocasionada por sus propiedades higroscópicas, es recomendable la elaboración y uso de tableros de fibra con Perfiles de densidad en forma de U.

La Variación dimensional lenta (VDL) del tratamiento A fue semejante a la del tratamiento C y ambos resultados fueron inferiores a los de los tableros con perfiles más homogéneos (B y D). Para el caso de Variación dimensional en las pruebas rápidas (VDR) los resultados fueron similares entre los diferentes tratamientos, tal como se explica en la figura 20.

Para el caso de estudio, el coeficiente entre la Variación dimensional y la Absorción de agua (VD/AA) fue menor para los tratamientos A y B, comparativamente con los coeficientes obtenidos de las pruebas con tableros de los tratamientos B y D. Este resultado fue similar para los protocolos lento y rápido.

El coeficiente que relaciona la cantidad de variación dimensional del tablero por unidad de absorción de agua (VD/AA) puede ser útil para predecir la variación dimensional (hinchado) de tableros expuestos a humedad en condiciones de servicio: de acuerdo con Suchsland y Xu (1989), dos tableros de fibra y/o partículas de madera pueden absorber la misma cantidad de agua durante su exposición en un intervalo similar de humedad, pero su variación dimensional puede ser diferente.

El coeficiente (VD/AA) es un indicador del comportamiento higroscópico de tableros de fibra una vez que están expuestos a un medio ambiente donde la humedad relativa presente en el aire puede alterar las propiedades dimensionales del material y en consecuencia sus propiedades tecnológicas de resistencia, acabado y durabilidad.

Por ejemplo: Para una variación de humedad del 12 al 30 % en un tablero, el material con un Perfil convencional (tratamiento A, protocolo rápido) con un



coeficiente VDR/AAR igual a 16 (%), sus dimensiones en el sentido transversal, es decir su espesor, variará en un 3%. En cambio, para un tablero con perfil homogéneo y de forma convexa como es el caso del tratamiento D con un coeficiente VDR/AAR igual a 34 (%), su espesor se hinchará en un 6.12%, es decir, más del doble.

Conclusiones

La influencia del Perfil de densidad en las propiedades mecánicas y físicas de tableros de fibra de madera de media densidad fueron investigados utilizando métodos de evaluación normalizados y de carácter no destructivo.

La velocidad de prensado en la manufactura de tableros de fibra de madera de media densidad influye de manera significativa en la formación de su Perfil de densidad: Velocidades altas (10 mm/s) y medias (2 mm/s) produjeron perfiles tradicionales en forma de “U” y valores mayores de Densidades pico en comparación con el prensado de velocidad baja (0.5 mm/s) y el de dos velocidades (10 y 2 mm/s) que formaron Perfiles de densidad más homogéneos.

Los tratamientos de velocidades media y alta, proporcionaron valores de resistencia mecánica del Módulo de Elasticidad en flexión estática, del Módulo de Ruptura en flexión, del Módulo dinámico por Ultrasonido y de la Resistencia Interna en el sentido transversal al espesor de los tableros, mayores a los obtenidos con los tratamientos de velocidad baja y de dos velocidades.

Igualmente, los tratamientos de velocidades media y alta, proporcionaron valores de Absorción y de Variación dimensional menores a los obtenidos con los tratamientos de velocidad baja y de dos velocidades.

La velocidad del sonido en los tableros estudiados se relacionó proporcionalmente con las propiedades de resistencia. Fue confirmada la utilidad del ultrasonido en la



evaluación del Módulo de Elasticidad dinámico en tableros con diferentes Perfiles de densidad.

El desarrollo de pruebas de laboratorio y el estudio de las propiedades mecánicas y físicas de tableros de fibra de madera revelan una respuesta más realista en condiciones de servicio y de esta manera los resultados de investigación pueden encontrar utilidad para el establecimiento de normas y estándares de calidad que contribuyan a su comercialización y correcta utilización como material de Ingeniería.

Agradecimientos

Este artículo presenta la metodología y los resultados de los trabajos de laboratorio efectuados durante la estancia de investigación realizada por el primer autor en el Instituto de Investigaciones Forestales y de Productos Forestales (FFPRI), en Tsukuba, Japón, en un curso de capacitación patrocinado por la Agencia de Cooperación Internacional del Gobierno de Japón (JICA, por sus siglas en inglés) y por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México, en la que Javier Ramón Sotomayor Castellanos es Profesor Investigador de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera.

Los autores agradecemos la ayuda de todas las personas involucradas en el proyecto por su valiosa contribución para la realización de este estudio. Especialmente a la Doctora Sumire Kawamoto y a los Doctores Hideaki Korai y Shin-Ichiro Tohmura, Investigadores del FFPRI de Japón, por su colaboración durante la etapa experimental. Igualmente, agradecemos a Rie Kurita del Centro de Cooperación Internacional del Japón, por su asistencia en la revisión y traducción de documentos en japonés.



Referencias

American Society for Testing and Materials. 2000. Annual Book of ASTM Standards. Section Four; Construction, Volume 04.10, Wood. USA.

Cai, Z.; Wu, Q.; Lee, J.N.; Hiziroglu, S. 2004. Influence of board density, mat construction, and chip type on performance of particleboard made from eastern redcedar. *Forest Products Journal*. 54(12):226-232.

C.N.S. Electronics. (s/f). Pundit manual for use with the portable ultrasonic non-destructive digital indicating tester: C.N.S. Electronics. London, England. 38 p.

Japanese Standards Association. 2003. Japanese Industrial Standard Fibreboard JIS A 5905. Japan.

Kawamoto, S.; Williams, R.S. 2002. Acoustic emission and acousto-ultrasonic techniques for wood and wood-based composites. A review. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-134. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. USA.

Kawasaki, T.; Zhang, M.; Kawai, S. 1998. Manufacture and properties of ultra-low-density fiberboard. *The Journal of Wood Science*. (44):354-360.

Kelly, M.W. 1977. Critical literature review of relationships between processing parameters and physical properties of particleboard. General technical report FPL-10. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. USA.

Maloney, T.M. 1993. Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing. Miller Freeman. USA.



Miyamoto, K.; Suzuki, S.; Inagaki, T. 2002. Effects of press closing time on mat consolidation behavior during hot pressing and on linear expansion of particleboard. *The Journal of Wood Science*. (48):309-314.

Moslemi, A.A. 1974. Particleboard. Vols. I and II. Southern Illinois University Press. USA.

Ohashi, K; Sotomayor Castellanos, J.R.; Hatano, Y.; Shibusawa, T. 2006. Mechanical properties of MDF having different density profile and its non-destructive assessment with ultrasonic waves. *Wood Industry*. 61(1):12-16. Japan.

Ohashi, K; Sotomayor Castellanos, J.R.; Shibusawa, T.; Hatano, Y. 2004. Properties of Medium Density Fiberboard with different Density Profile and their Non Destructive Evaluation. In proceedings of the 54th Annual Meeting of the Japan Wood Research Society. Japan.

Schulte, M.; Frühwald, A. 1996. Shear modulus, internal bond and density profile of médium density fiberboard (MDF). *Holz als Roh-und Werkstoff*. (54):49-55.

Shibusawa, T.; Sakuma, H.; Arima, T.; Okuma, M. 1997. Ultrasonic application to measure the property changes with respect to moisture content of wood and wood-based materials. In: Proceedings of the Timber Research & Technical Training Centre and the Japan International Cooperation Agency Seminar 97 (TRTTC/JICA Research Seminar 97; Published in 1998). Malaysia. pp: 145-155.

Sotomayor Castellanos, J.R. 2003. Density Profile Effect in Wood Fiberboard Proprieties. Forest Research II Training Course. Forest Products. In: Forestry and Forest Products Research Institute and Japan International Cooperation Agency. FFPRI and TIC-JICA Group Training Final Report. pp: 55-88. Japan.



Strickler, M.D. 1959. The effect of press cycles and moisture content on Douglas-Fir flakeboard. *Forest Products Journal*. 9(7):203-215.

Suchsland, O.; Xu, H. 1989. On the measurement of linear expansion of particleboard and medium density fiberboard. *Forest Products Journal*. 39(6):39-42.

Sun, Y.G.; Arima, T. 1998. Structural mechanics of wood composite materials I: Ultrasonic evaluation of internal bond strength during an accelerated aging test. *The Journal of Wood Science*. (44):348-353.

Sun, Y.G.; Arima, T. 1999. Structural mechanics of wood composite materials II: Ultrasonic propagation mechanism and internal bonding of particleboard. *Journal of Wood Science*. (45):221-226.

Suzuki, S.; Miyamoto, K. 1998. Effect of manufacturing parameters on the linear expansion and density profile of particleboard. *The Journal of Wood Science*. (44):444-450.

Wang, S.; Dai, C. 2004. Press Control for Optimized Wood Composite Processing and Properties. Part 2: Properties and Press Control Strategies. pp: 65-89. In: Winandy, J.E.; Kamke, F.A. Editors. 2004. Fundamentals of composite processing. Proceedings of a workshop, November 5-6, 2003. Madison, WI. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-149. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 118 pp.

Wang, S.; Winistorfer, P.M Young, T.M.; Helton, C. 2001. Step-closing pressing of medium density fiberboard. Pt. 1: Influence on the vertical density profile. *Holz als Roh-und Werkstoff*. 59(1/2):19-26.



Wang, S.; Winistorfer, P.M.; Young, T.M. 2004. Fundamentals of vertical density profile formation in wood composites. Part III. MDF density formation during hot-pressing. *Wood and Fiber Science*. 36(1):17-25.

Winandy, J.E.; Kamke, F.A., Eds. 2004. Fundamentals of composite processing. Proceedings of a workshop; November 5.6, 2003; Madison, WI. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-149. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 118 p.

Wong, E.D.; Zhang, M.; Wang, Q.; Han, G.; Kawai, S. 2000. Formation of the density profile and its effects on the properties of fiberboard. *The Journal of Wood Science*. (46):202-209.

Wong, E.D.; Zhang, M.; Wang, Q.; Kawai, S. 1998. Effects of mat moisture content and press closing speed on the formation of density profile and properties of particleboard. *The Journal of Wood Science*. (44):287-295.

Wong, E.D.; Zhang, M.; Wang, Q.; Kawai, S. 1999. Formation of the density profile and its effects on the properties of particleboard. *The Journal of Wood Science*. (33):327-340.



CAPÍTULO 2

Módulo de elasticidad y resistencia interna de tableros de *Picea abies* con adhesivos a base de soya y de trigo

Resumen

Con el objetivo de analizar la influencia de adhesivos a base de proteínas de soya y de trigo en las características mecánicas de tableros de madera de *Picea abies*, se fabricaron en laboratorio tableros experimentales los cuales se estudiaron por medio de métodos de evaluación no destructiva de vibraciones mecánicas, de ultrasonido, de ondas de esfuerzo y un método de carácter destructivo: la resistencia interna. Los principales resultados fueron: para los tableros adheridos con proteínas de soya, el valor promedio del módulo de elasticidad en vibraciones transversales (Evt) fue de 12.25 GPa; el del módulo de elasticidad por ultrasonido (Eus) fue de 19.13 GPa; el del módulo de elasticidad en ondas de esfuerzo (Eoe) fue de 12.64 GPa; y el de la resistencia interna (RI) fue de 0.66 MPa. Para los tableros adheridos con proteínas de trigo, el valor promedio del Evt fue de 12.53; el del Eus fue de 19.03; el del Eoe fue de 12.66; y el de la RI fue de 1.54 MPa. Las principales conclusiones fueron que los adhesivos a base de proteínas de soya o de trigo utilizados en tableros armados con tabletas de madera de *Picea abies*, influyen de manera diferente según el esfuerzo al cual son sometidos. Para los esfuerzos de transmisión de ondas mecánicas, como los aplicados durante las pruebas de ultrasonido y de ondas de esfuerzo, la influencia es mínima. En contraste, para las pruebas donde los esfuerzos de vibración son transversales al plano de aplicación del pegamento, como es el caso de las pruebas de vibraciones transversales, el tipo de pegamento es un factor importante de variación.

Palabras clave: soya, trigo, módulo de elasticidad, resistencia interna, métodos no destructivos, vibraciones transversales, ultrasonido, ondas de esfuerzo.



Abstract

With the objective of analyzing the influence of adhesives based on soy and wheat proteins on *Picea abies* solid wood boards, experimental boards were made in laboratory and studied by nondestructive evaluation methods of mechanical vibrations, ultrasound, stress wave and a destructive method: internal bond. The main results were: for the board with soy protein adhesive, the statistical mean values for the modulus of elasticity in transversal vibrations (Evt) was 12.25 GPa; the modulus of elasticity by ultrasound (Eus) was 19.13 GPa; the modulus of elasticity by stress waves (Eoe) was 12.64 GPa; and the internal bond (RI) was 0.66 MPa. For the board with wheat protein adhesive, the statistical mean values for Evt were 12.53; for Eus were 19.03; for Eoe were 12.66; and for RI were 1.54 MPa. The main conclusions were that the adhesives based on soy or wheat proteins used in *Picea abies* solid wood board influence differently according to the type of stress to which they are submitted. For the mechanical waves transmission stress, such as those applied for the ultrasound and stress wave tests, the effect is minimum. In contrast, for the tests where the vibration stress is transverse to the layer of adhesive applied, as is the case of transverse vibrations, the nature of the adhesive is an important factor of variation.

Key words: soy, wheat, modulus of elasticity, strength bond, nondestructive methods, transverse vibration, ultrasound, stress waves.

Introducción

Los adhesivos a base de proteínas naturales se han usado tradicionalmente como pegamento natural en la industria de la madera (Keimel, 2003; Lambuth, 2003). Sin embargo, por su excelente resistencia a la humedad y su bajo costo, las resinas sintéticas han remplazado a los aglutinantes biológicos como pegamentos para tableros de madera de uso exterior e interior.



Por su parte, la industria productora de materiales compuestos de madera actualmente procura la utilización de adhesivos y agregados que sean ecológicamente compatibles y con un menor gasto energético. Por ejemplo, pegamentos biodegradables y de origen natural como los son las mezclas a base de proteínas de soya y de trigo, que puedan sustituir a los adhesivos a base de resinas sintéticas.

El desarrollo de adhesivos a base de proteínas de soya para su empleo en productos compósitos de madera ha sido estudiado recientemente por: Frihart y Wescott (2004), Benedict y Picciano (1989), Deland y col. (1995), Chen (1996), Metzger y col. (2005); Weber y Krug (2005) y Wescott y col. (2006), entre otros autores. Los investigadores concluyen que los pegamentos a base de proteínas naturales como las de la soya, pueden aprovechar la abundancia de la materia prima y que sus propiedades tecnológicas pueden ser utilizadas en la elaboración de productos de madera.

La harina de trigo es utilizada en la industria de tableros de madera para extender mezclas adhesivas a base de resinas sintéticas. Sin embargo, no se encontraron investigaciones recientes referentes al efecto de adhesivos a base de proteínas de trigo sobre las características tecnológicas de tableros de madera sólida (Pizzi, 1989 y 1994; Kinloch, 1994; Encyclopedia of Materials, 2001; Packham, 2005).

Para estudiar y comparar el efecto de adhesivos compuestos a base de soya y de trigo, se fabricaron en laboratorio tableros con tabletas de madera de *Picea abies* unidos con adhesivos de estas proteínas. Los tableros se estudiaron por medio de métodos de evaluación no destructiva de vibraciones mecánicas, de ultrasonido y de ondas de esfuerzo. Además, el efecto de los adhesivos en las propiedades mecánicas de los tableros fue analizado con la ayuda de un método de carácter destructivo: la resistencia interna en la dirección transversal al plano de adhesión de las probetas (Internal bonding, en inglés).



Objetivo

El objetivo de la investigación es analizar la influencia de adhesivos a base de proteínas de soya y de trigo en las características mecánicas de tableros de madera de *Picea abies*. Las características son: velocidades del ultrasonido y de ondas de esfuerzo, frecuencia natural en vibraciones transversales, módulos de elasticidad en vibraciones transversales, por ultrasonido y por ondas de esfuerzo y la resistencia interna en la dirección transversal al plano de aplicación del pegamento.

Materiales y métodos

El material experimental consistió en madera de *Picea sp.* L. Karst., aserradas de arbolado de la región forestal de Baviera, Alemania. La especie fue identificada en el Instituto de Investigaciones de la Madera en Munich, Alemania.

La elaboración de las probetas siguió el siguiente procedimiento: Primeramente la madera de *Picea abies* se recortó en 52 tabletas de 5 mm x 70 mm x 250 mm, orientadas respectivamente según los ejes de simetría de la madera: radial, tangencial y longitudinal. Una vez dimensionadas, las tabletas fueron almacenadas en una cámara de acondicionamiento por un periodo de 30 días a una temperatura de 20 °C y a una humedad relativa de 65%, hasta que la madera alcanzó un contenido de humedad en equilibrio del 12%.

Posteriormente se procedió a preparar el adhesivo con la composición mostrada en la tabla 1 y acto seguido se repartió sobre una superficie radial-tangencial de las tabletas. A continuación, para cada uno de los tratamientos, dos tabletas se juntaron para formar una probeta y estas se colocaron en una prensa durante 10 minutos con una presión de 20 bars y a una temperatura de 180 °C. Las dimensiones de las probetas fueron 10 mm x 70 mm x 250 mm. Consecutivamente, las probetas se enfriaron en el ambiente del laboratorio por 24 horas y después se almacenaron en la cámara de acondicionamiento.



Tabla 1. Composición de los adhesivos.

Composición	Tratamiento	
	Proteína de Soya (<i>Glycine amx. (L.)</i>)	Proteína de Trigo (<i>Triticum L.</i>)
	gr	gr
Rellenador	20.0	20.0
Hidróxido de potasio	8.6	4.8
Agua	71.4	75.2

Con las tabletas se formaron tres grupos: un primer grupo de control constituido por 4 tabletas sin adhesivo; Con un segundo grupo de 24 tabletas se prepararon 12 probetas compuestas de dos tabletas adheridas con una mezcla elaborada a partir de proteínas en presentación comercial de soya (*Glycine amx. (L.)*). Posteriormente, con un tercer grupo de 24 tabletas se fabricaron 12 probetas adheridas con un adhesivo preparado con proteínas en presentación comercial de trigo (*Triticum L.*).

Los dos grupos de probetas para tratamiento y el grupo de control de tabletas fueron estudiados con tres pruebas dinámicas de carácter no destructivo: ultrasonido, ondas de esfuerzo, ambos en la dirección longitudinal de la madera y vibraciones transversales, a partir de los cuales fueron calculados los respectivos módulos de elasticidad.

Posteriormente, cada una de las probetas de los tratamientos de soya y trigo fueron recortadas en cuatro probetas de 50 mm x 50 mm las cuales fueron sometidas a pruebas destructivas de resistencia interna a la tracción en el plano transversal de adhesión de estas probetas y se determinó su resistencia interna, tal como se ilustra en la estrategia experimental presentada en la figura 1.

Una vez calculada la relación peso/volumen al momento del ensayo, considerada como la densidad aparente (ρ) de las probetas, las velocidades del ultrasonido y de las ondas de esfuerzo fueron calculadas a partir de los tiempos de transmisión respectivos registrados por los aparatos. Estos datos fueron divididos respectivamente entre las distancias L_{us} y L_{oe} , explicadas en la figura 2, que ilustra la geometría de los ensayos.



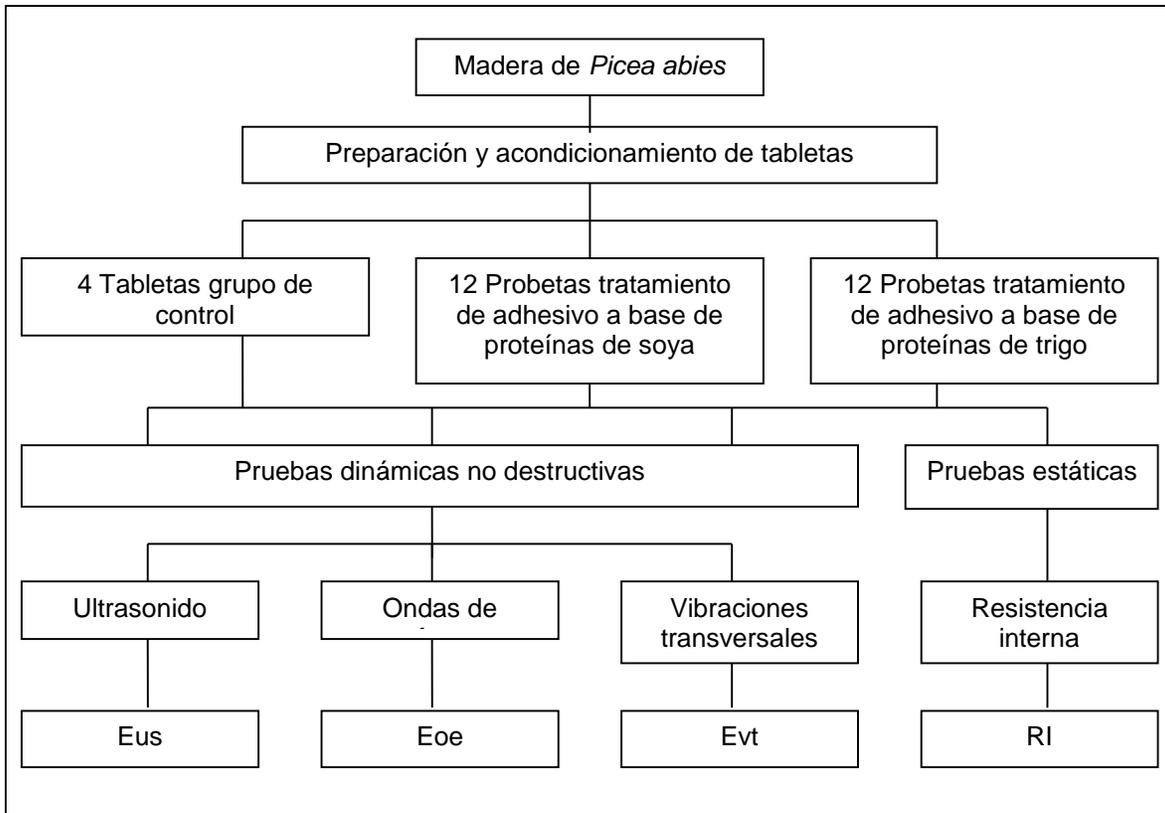


Figura 1. Estrategia experimental.

Las pruebas de ultrasonido (us) siguieron las formalidades propuestas por Villaseñor Aguilar (2007) utilizando la tecnología *Sylvatest*® (Conceptsboisstructure, 2004) y el módulo de elasticidad por ultrasonido se calculó a partir de la velocidad del ultrasonido aplicando la fórmula:

$$Eus = Vus^2 \rho \quad (1)$$

Donde:

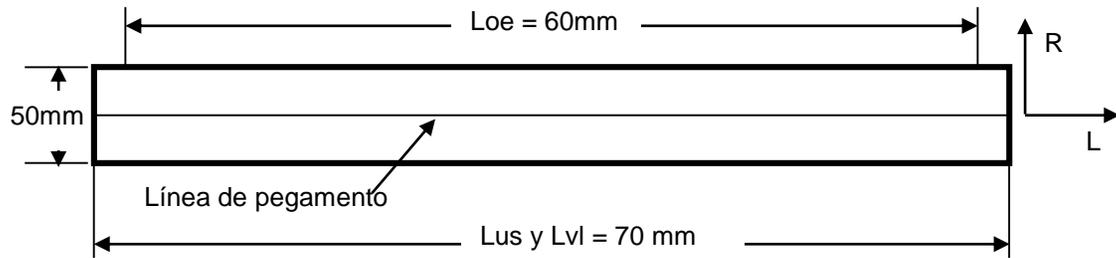
Eus = Módulo de elasticidad por ultrasonido (Pa)

Vus = Velocidad del ultrasonido (m/s)

ρ = Densidad de la madera (kg/cm³)



Probetas para ondas de esfuerzo, ultrasonido y vibraciones transversales



Probetas para pruebas de resistencia interna

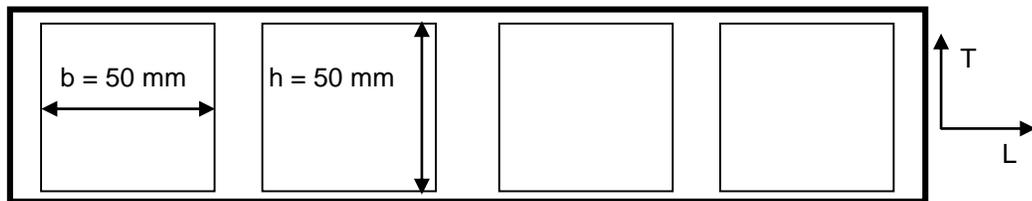


Figura 2. Geometría de los ensayos. R: dirección radial; T: dirección tangencial; L: dirección longitudinal.

Las pruebas de ondas de esfuerzo (oe) siguieron el protocolo experimental propuesto por Sotomayor y col. (2006) utilizando la tecnología *Metriguard*® (Metriguard, 1998). El módulo de elasticidad en ondas de esfuerzo se determinó a partir de la velocidad de las ondas de esfuerzo con la fórmula:

$$E_{oe} = V_{oe}^2 \rho \quad (2)$$

Donde:

E_{oe} = Módulo de elasticidad por ondas de esfuerzo (Pa)

V_{oe} = Velocidad de las ondas de esfuerzo (m/s)

ρ = Densidad de la madera (kg/cm^3)

Los ensayos de vibraciones transversales (vt) siguieron el protocolo experimental propuesto por Villaseñor (2005) utilizando la tecnología *Grindosonic*® (Lemmens,



sin fecha), con la cual se determinó la frecuencia natural de las probetas y se calculó el módulo de elasticidad con la ayuda de la fórmula:

$$E_{vl} = \frac{4 \pi^2 L_{vl}^4 f^2 \rho}{m^2 r^2} \left(1 + \frac{r^2}{L^2} K\right) \quad (3)$$

Donde:

E_{vl} = Módulo de elasticidad en vibraciones longitudinales (Pa).

L_{vl} = Largo de la probeta (m).

f = Frecuencia natural de la probeta (Hz).

ρ = Densidad de la madera (kg/m^3).

m, K = Constantes (adimensionales).

r = Radio de giro de la sección transversal de la probeta (m^2).

Las pruebas de resistencia interna se realizaron adaptando las indicaciones de la norma DIN-EN 319 (DIN, 1993) y la resistencia interna se calculó a partir de la máxima fuerza necesaria para la ruptura en la dirección transversal al espesor de la probeta con la fórmula:

$$RI = \frac{P_{rup}}{A} \quad (4)$$

Donde:

RI = Resistencia interna a la tensión transversal (Pa)

P_{rup} = Carga a la ruptura (N)

A = Área de la sección transversal de la probeta: $b \times h$ (m^2)

La elaboración de los adhesivos, la preparación de las probetas y las pruebas destructivas de resistencia interna fueron realizadas en el Laboratorio de Mecánica de Compósitos de Madera, del Instituto de Investigaciones de la Madera, de la Universidad Técnica de Munich, Alemania. Las pruebas no destructivas de ultrasonido, de ondas de esfuerzo y de vibraciones transversales fueron llevadas a



cabo en el Laboratorio de Mecánica de la Madera, de la División de Estudios de Posgrado, de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.

Resultados y análisis

Los estadísticos media aritmética y desviación estándar de los parámetros estudiados se presentan en la tabla 2. En la misma tabla se muestran como referencia los resultados de la densidad (ρ) de la madera. Los parámetros listados en la tabla son: la frecuencia natural en vibraciones transversales (f), la velocidad de ultrasonido en la dirección longitudinal (V_{us}), la velocidad de las ondas de esfuerzo (V_{oe}), el módulo de elasticidad dinámico por ultrasonido (E_{us}), el módulo de elasticidad dinámico por ondas de esfuerzo (E_{oe}), el módulo de elasticidad dinámico en vibraciones transversales (E_{vt}) y la resistencia interna (RI).

Tabla 2. Resultados.

Estadístico	Tratamiento y parámetros							
	ρ (kg/m ³)	f (Hz)	V_{us} (m/s)	V_{oe} (m/s)	E_{vt} (GPa)	E_{us} (GPa)	E_{oe} (GPa)	RI (MPa)
Probetas con adhesivo de proteínas de soya; n = 12								
Media aritmética	425	892	6695	5450	12.25	19.13	12.64	0.66
Desviación estándar	35	36	318	178	1.77	2.87	1.50	0.56
Probetas con adhesivo de proteínas de trigo; n = 12								
Media aritmética	423	902	6685	5460	12.53	19.03	12.66	1.54
Desviación estándar	41	39	370	185	1.69	3.31	1.79	0.63
Probetas de control sin adhesivo; n = 4								
Media aritmética	407	443	6338	5168	11.34	16.93	11.02	-
Desviación estándar	66	36	679	308	3.61	6.83	3.00	-

Los resultados de pruebas de diferencias de medias de dos muestras pares independientes (*t de Student*), correspondientes a los tratamientos de adhesivo a base de soya ($n = 12$) y de trigo ($n = 12$), sugieren que no existen diferencias estadísticamente significativas para un nivel de confiabilidad del 95% entre las medias de los dos tratamientos de las variables: densidad (ρ), frecuencia (f) y velocidades de ultrasonido (V_{us}) y de ondas de esfuerzo (V_{oe}). Igualmente para las



variables módulo de elasticidad en vibraciones transversales (Evt), por ultrasonido (Eus) y por ondas de esfuerzo (Eoe), no se encontraron diferencias significativas para el mismo nivel de confiabilidad entre los dos tratamientos.

En contraste, el mismo ejercicio para los datos de la variable resistencia interna (RI) dio como resultado entre las medias de los dos tratamientos diferencias significativas para un nivel de confiabilidad del 95%.

Por otra parte, para las probetas de los dos tratamientos en comparación con el grupo de control formado por tabletas ($n = 4$), es decir madera sin adhesivo, las pruebas *t de Student* aplicadas al estadístico media aritmética de los tres grupos resultaron en diferencias estadísticamente significativas para un nivel de confiabilidad del 95%. Este resultado se encontró para las mismas variables citadas anteriormente,

Es decir, la presencia de los adhesivos estudiados, combinada con la estructura y armado de tableros de *Pices abies*, en este caso de dos capas, modifica de manera importante las características mecánicas analizadas entre tabletas y probetas.

Desde otro punto de vista, estos resultados sugieren que la aplicación de los dos adhesivos experimentados no influyeron estadísticamente en las características mecánicas estudiadas, lo que permite suponer que los adhesivos compuestos con proteínas de soya o de trigo pueden ser utilizados sin modificar de manera sustancial la respuesta mecánica de tableros de madera de *Picea abies*, con excepción de la resistencia interna donde el tipo de adhesivo utilizado juega un papel importante en la respuesta mecánica de los tableros.

Para fines de análisis posteriores, estos resultados permiten agrupar los resultados de las 24 probetas correspondientes a los dos tratamientos experimentales como un solo grupo según la técnica experimental utilizada.



Con otro enfoque, si se consideran todas las probetas estudiadas como un solo grupo según las técnicas experimentales de vibraciones transversales, de ultrasonido y de ondas de esfuerzo, los resultados de pruebas de diferencias de medias y de varianza para un nivel de confiabilidad del 95%, entre los valores de los tres módulos de elasticidad determinados, proporcionaron los siguientes corolarios:

Entre los valores de los módulos de elasticidad E_{vt} y E_{oe} no existe una diferencia estadísticamente significativa; En contraste, entre los valores del módulo E_{us} y de los módulos E_{vt} y E_{oe} si existe una diferencia significativa.

Dado que las experiencias fueron realizadas en una muestra común de probetas, de una misma especie y donde el adhesivo no influye aparentemente en la variación de los parámetros, estos datos proponen que el factor de diferenciación entre la magnitud de los valores determinados experimentalmente es la técnica aplicada. Este resultado coincide con las conclusiones propuestas por Chauhan y col. (2005) y Villaseñor (2007), quienes proponen que cuando se experimenta con madera, la diferencia en los principios teóricos y en los componentes de cada tecnología utilizada puede influir de manera importante en los resultados.

Para tratar de esclarecer esta paradoja, es necesario discutir las posibles implicaciones del adhesivo, de la madera y de la técnica utilizada en los resultados para cada parámetro:

Densidad

La densidad promedio de las probetas adheridas con proteínas de soya y de trigo fue de 424 kg/m^3 . La comparación entre medias de los resultados de los tratamientos, indicaron un aumento de 4% con respecto a la densidad del grupo de control, formado por tabletas de madera sin adhesivo, tal como se explica en la tabla 2.



Dado que la densidad de cada una de las probetas representa la suma de las masas de la madera de las dos tabletas adheridas, más la masa del adhesivo, la diferencia entre densidades aparentes es atribuida al peso adicional del pegamento que se agregó durante la elaboración de las probetas, mientras que se mantuvo proporcionalmente constante el volumen de las dos tabletas que conforman cada probeta.

Frecuencia en vibraciones transversales

Los promedios de las frecuencias de los grupos de soya y trigo resultó ser mayor en un 102%, respecto la frecuencia promedio del grupo de control, tal como se explica en la tabla 2. Este resultado puede ser interpretado por el hecho de que la densidad de la madera es considerada similar para todas las tabletas con que se fabricaron las probetas, pero su geometría, sus propiedades de inercia y su composición, fueron diferentes entre las tabletas del grupo de control (sin adhesivo) y las de los grupos de probetas. De esta forma los valores medidos de frecuencias en las probetas fueron proporcionalmente dos veces la frecuencia correspondiente a dos tabletas que constituyen cada probeta, más el efecto del pegamento.

Velocidades del ultrasonido y de las ondas de esfuerzo

La velocidad del ultrasonido entre tratamientos fue prácticamente igual (ver tabla 2) y V_{us} de las probetas de los dos tratamientos fue mayor 5.5% respecto a la velocidad V_{us} en las tabletas. Resultado comparable al encontrado para las velocidades V_{oe} entre tratamientos y el grupo de control.

Para el grupo de control la velocidad del ultrasonido fue mayor en un 22% en comparación con la velocidad de las ondas de esfuerzo. Esta proporción en los valores de velocidad fue similar para el conjunto total de probetas entre las dos técnicas. De este resultado se desprende que la presencia de la línea de pegamento entre los planos radial tangencial de las probetas influye en su respuesta a ondas



de esfuerzo y al ultrasonido, medidos estos en la dirección paralela al sentido de la película formada por el pegamento.

Parece ser que la línea de pegamento facilita la transmisión de la onda de esfuerzo y contribuye de esta manera a aumentar la velocidad en las probetas con respecto a la velocidad en las tabletas de madera de *Picea abies*. Además, la correlación entre estos parámetros fue aceptable para las 28 probetas de los dos tratamientos agrupados para análisis en un solo conjunto ($V_{oe} = 0.44 V_{us} + 2527$; $R^2 = 0.69$).

Respecto a la relación entre la velocidad de transmisión del ultrasonido y la frecuencia natural de las probetas, se encontró una correlación frágil entre estos dos parámetros: $f = 0.76V_{us} + 388$; $R^2 = 0.48$. La diferencia entre el tipo de solicitaciones para cada ensayo puede aclarar este resultado: El ensayo de vibraciones transversales solicita toda la geometría de las probetas en un esfuerzo dinámico, lo que pone en movimiento y en estado de esfuerzo a toda la probeta, incluyendo la línea de pegamento situada entre los planos radial y tangencial de las dos tabletas (que constituyen cada probeta) y las interfaces entre la madera y el adhesivo la cual en flexión dinámica.

Por su parte, el ensayo de ultrasonido utiliza a la madera y a la línea de adhesivo como medio de transmisión para la onda mecánica, solicitando de esta forma solo localmente al material. Como resultado, la frecuencia es una expresión global del comportamiento de la probeta y en cambio, la velocidad de transmisión medida se puede representar como la suma de la respuesta local de cada sección de la probeta.

Módulos de elasticidad

El valor promedio del módulo de elasticidad en vibraciones transversales de las probetas del tratamiento con adhesivo a base de trigo fue 2.3% mayor que el Evt del tratamiento con soya (ver tabla 2). El conjunto de los Evt de los grupos de soya



y trigo fueron similares a los módulos en ondas de esfuerzo y menores que los módulos por ultrasonido.

Respecto a los módulos de elasticidad en ultrasonido de los dos tratamientos experimentales, sus valores promedio fueron similares. El conjunto de los Eus de los grupos de soya y trigo fueron mayores 54% respecto a los Evt y 50% en comparación con los valores promedio de los módulos de elasticidad en ondas de esfuerzo.

Los valores promedio de los módulos de elasticidad por ondas de esfuerzo de las probetas de los tratamientos con adhesivo a base de trigo y soya fueron comparables. El conjunto de los Eoe fueron igualmente similares a los Evt pero inferiores respecto a los valores promedio encontrados para los módulos de elasticidad en ultrasonido.

Los datos de las probetas de los módulos de elasticidad por ultrasonido y en ondas de esfuerzo correlacionaron bien con los módulos de elasticidad en vibraciones transversales, tal como se muestra en la figura 3.

Estos resultados ilustran que si bien cada técnica proporciona magnitudes diferentes de una misma característica mecánica de los tableros, en este caso del módulo de elasticidad, estos parámetros pueden ser relacionados y utilizados como predictores entre si.

Resistencia interna

El valor promedio de la resistencia interna de los tableros del tratamiento con proteína de trigo fue 233% mayor al promedio de la RI para el tratamiento de proteína de soya (ver tabla 2). Este resultado propone que el adhesivo a base proteína de trigo aumenta las propiedades de cohesión de los tableros de madera de *Picea abies*.



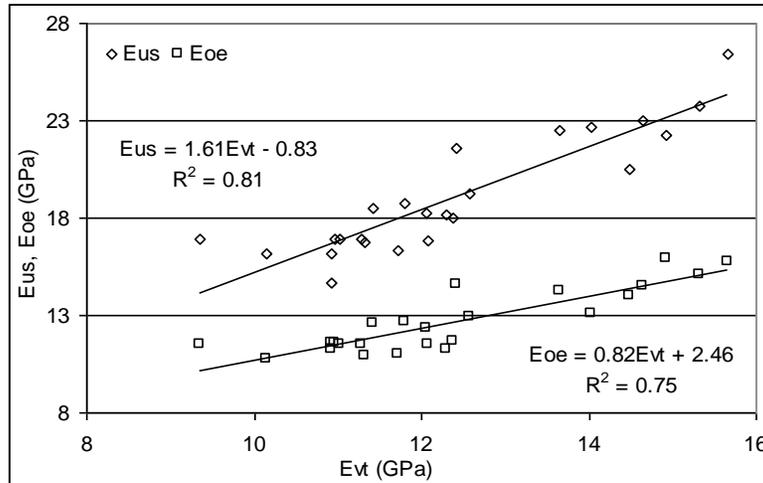


Figura 3. Diagrama de dispersión y correlaciones entre los módulos de elasticidad por ultrasonido (Eus) y por ondas de esfuerzo (Eoe) en función del módulo de elasticidad por vibraciones transversales (Evt), para el conjunto formado por las 28 probetas de los dos grupos experimentales: soja y trigo.

Respecto a la relación de los módulos de elasticidad y la resistencia interna de los tableros, no se encontró una correlación entre estos parámetros, tal y como se ilustra en la figura 4.

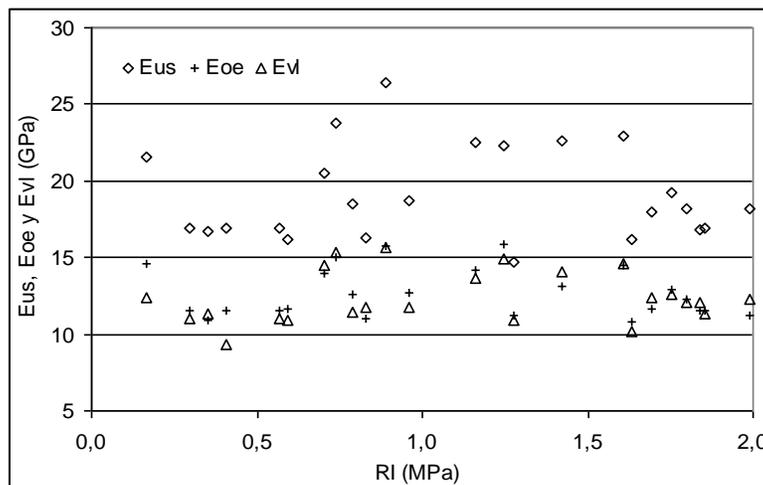


Figura 4. Diagrama de dispersión de los módulos de elasticidad Eus, Eoe y Evt en función de la resistencia interna (RI), para el conjunto formado por las 28 probetas de los dos grupos experimentales: soja y trigo.



Conclusiones

A partir de los resultados de la investigación, se deduce que el tipo de adhesivo a base de proteínas de soya o de trigo utilizado en tableros armados con tabletas de madera de *Picea abies*, influyen de manera diferente según el esfuerzo al cual son sometidos. Para los esfuerzos de transmisión de ondas mecánicas, como los aplicados durante las pruebas de ultrasonido y de ondas de esfuerzo, la influencia es mínima. En contraste para las pruebas donde los esfuerzos de vibración son transversales al plano de aplicación del pegamento, como es el caso de las pruebas de vibraciones transversales el tipo de pegamento es un factor importante de variación.

Agradecimientos

Este capítulo da a conocer la metodología y los resultados de los trabajos de laboratorio realizados durante la estancia de investigación conducida por el primer autor en el Instituto de Investigaciones de la Madera de la Universidad Técnica de Munich, Alemania.

La investigación fue patrocinada por el Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD, por sus siglas en inglés) y por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.

Los autores agradecemos a todas las personas involucradas en el proyecto por la ayuda prestada para la realización del estudio. Especialmente al Ingeniero Fritz Tröger y a los Doctores Gerd Wegener y Peter Glos, Investigadores del Instituto de Investigaciones de la Madera de la Universidad Técnica de Munich, Alemania, por su colaboración durante la etapa experimental en el Instituto de Investigaciones de la Madera de la Universidad Técnica de Munich, Alemania.



Referencias

Benedict, C.V.; Picciano, P.T. 1989. Adhesives from Marine Mussels. In: Hemingway, R.W.; Conner, A.H.; Branham, S.J. 1989. Adhesives from Renewable Resources. ACS-Symposium Series 385, USA. pp:465-483.

Chauhan, S.S.; Entwistle, K.M.; Walker, J.C.F. 2005. Differences in acoustic velocity by resonance and transit-time methods in an anisotropic laminated wood medium. *Holzforschung*. 59(5):428-434.

Chen, C.A. 1996. State of the Art Report: Adhesives from Renewable Resources. *Holzforschung und Holzverwertung*. (4):58-60.

Conceptsboisstructure. 2004. Sylvatestduo user manual. France.

DIN EN 319. 1993-08. Sapanplatten und Fasserplatten – Bestimmung der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene. Beuth Verlag GmbH. Germany.

Deland, J.M. *et al.* 1995. Expanded Research and Development of Soybean-Based Wood Adhesives. Resume in proceedings of the Symposium Wood Adhesives 1995. USDA, Forest Service, Forest Products Laboratory and the Forest Products Society. USA.

Encyclopedia of Materials: Science and Technology. 2001. Wood: Adhesives. Elsevier Science Ltd. pp:9583-9599.

Frihart, C.R.; Wescott, J.M. 2004. Improved water resistance of bio-based adhesives for wood bonding. In: ICECFOP1: 1st International Conference on Environmentally-Compatible Forest Products. Portugal. pp:293-392.



Keimel, F.A. 2003. Historical Development of Adhesives and Adhesive Bonding. In: Handbook of Adhesive Technology, 2nd ed. Editors. Pizzi, A.; Mittal, K.L. Marcel Dekker, USA. pp:1-12.

Kinloch, A.J. 1994. Adhesion and Adhesives. 3rd Edition. Chapman & Hall. England.
Lambuth, A.L. 2003. Protein Adhesives for Wood. In: Handbook of Adhesive Technology, 2nd ed. Editors. Pizzi, A.; Mittal, K.L. Marcel Dekker, USA. pp:457-478.

Lemmens, J.W. (no date). Operating Instructions for the GrindoSonic MK5 "Industrial" Instrument. J.W. Lemmens, Inc. USA.

Metriguard Inc. 1998. Metriguard Model 239A Maintenance & Operation Manual. Metriguard Inc. USA.

Metzger, M.; Tröger, F.; Windeisen, E.; Wegener, G. 2005. Natural bonding agents from renewable resources suitable for wood-based materials. in: Proceedings of the 5th International Symposium on "Materials made from Renewable Resources". Germany. pp:116-125.

Packham, D.E. Editor. 2005. Handbook of Adhesion. 2nd Edition. John Wiley & Sons, Ltd. England.

Pizzi, A. Editor. 1989. Wood Adhesives. Chemistry and Technology. Volumes 1 and 2. Marcel Dekker, Inc. USA.

Pizzi, A. 1994. Advanced Wood Adhesives Technology. Marcel Dekker, Inc. USA.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Ohashi, K.; Hatano, Y.; Shibusawa, T. 2006. Influencia del Perfil de densidad en las propiedades mecánicas y físicas de tableros de fibra de madera. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 2(1):3-36. México.



Villaseñor Aguilar, J.M. 2005. Comportamiento mecánico de la madera de *Prosopis sp.* en relación con la variación de su masa. Tesis de Licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Villaseñor Aguilar, J.M. 2007. Comportamiento higroelástico de la madera de *Pinus douglasiana*. Evaluado mediante ultrasonido, ondas de esfuerzo, vibraciones transversales y flexión estática. Tesis de maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Weber, A.; Krug, D. 2005. Proteins as glueing alternative for solid wood panels. In: Proceedings of the 5th International Symposium on “Materials made from Renewable resources”. Germany. pp:91-116.

Wescott, J.M.; Frihart, C.R.; Traska, A.E. 2006. High-soy-containing water-durable adhesives. *J. Adhesion Sci. Technol.* 20(8):859–873.



CAPÍTULO 3

Módulo de Elasticidad de Tableros de Partículas de Madera evaluado con métodos no destructivos

Resumen

La elaboración 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. y 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 MOE 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.

Abstract

The fabrication of reconstituted wood products is the contemporary tendency in Wood Engineering. The result of this trend is the appearance in the market of new industrial wood products with improved technological characteristics, more homogeneous and predictable. This research is about the study of a wood particleboard sample from an industrial facility in the State of Michoacán. The panels were manufactured with a mixture of wood species of *Pinus* spp., *Abies* spp. and *Quercus* spp. and urea-formaldehyde resin 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 statistically the results according to the different methods of evaluation used, and propose a classification for the studied sample in accordance to the Standard ANSI A208.1. The three evaluation methods were: transverse vibrations, stress waves and static bending. These NDE methods demonstrated their usefulness to determine the MOE of Particleboards. In agreement with sample density results, the experimental material classifies as a Medium Density Particleboard, according to the Standard ANSI A208.1. Moreover, by the Standard ANSI A208.1. and according to the MOE values found, the Particleboard classifies as 1-M-3 when evaluated with dynamic NDE and when evaluated in Static Bending, it classifies as 1-M-2.1 Likewise, the experimental results show that for the particleboard sample studied, the MOE in the transversal direction with respect to the panel line of production denoted higher values, in contrast with MOE results for the parallel direction. Finally, the MOEs showed a strong statistical relationship within them. This result confirms the fundamental hypothesis concerning the NDE application in wood products research.



Key words: 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 físico-mecánicas 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 está íntimamente ligado a las propiedades de la materia prima que lo constituye. El tamaño, forma y orientación 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 et al., 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 componente 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 carácter anisotrópico del comportamiento mecánico de productos de madera reconstituida, es un tópico básico en el campo de la investigación en Ciencias de la Madera. Los resultados de investigación demuestran que los TPM y otros materiales 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 et al., 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 otra parte, McNatt (1973), propone un esquema para el recorte de probetas en TPM para evaluación de sus propiedades básicas 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 clasificación 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 sollicitación 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

Objetivos

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.

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 las técnicas empleadas en su determinación.

Materia Prima y Adhesivo	Densidad (gr/cm ³)	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 et al., 1962.
Astilla de Douglas-Fir, Resina FF	0.53	3580	ASTM D-1037	Hann et al., 1962.
Astilla de Douglas-Fir, Resina MF	0.53	3600	ASTM D-1037	Hann et al., 1962.
Astilla de Pinus spp., Resina UF	0.72	3000	BS 1811	Chapman, 1979.
Astilla de Pinus spp., Resina UF	0.74	4200	BS 1811	Chapman, 1979.
Astilla de Douglas-Fir, Resina FF	0.66	4320	ASTM D-1037	Geimer et al., 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.				



Materiales y métodos

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.

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.

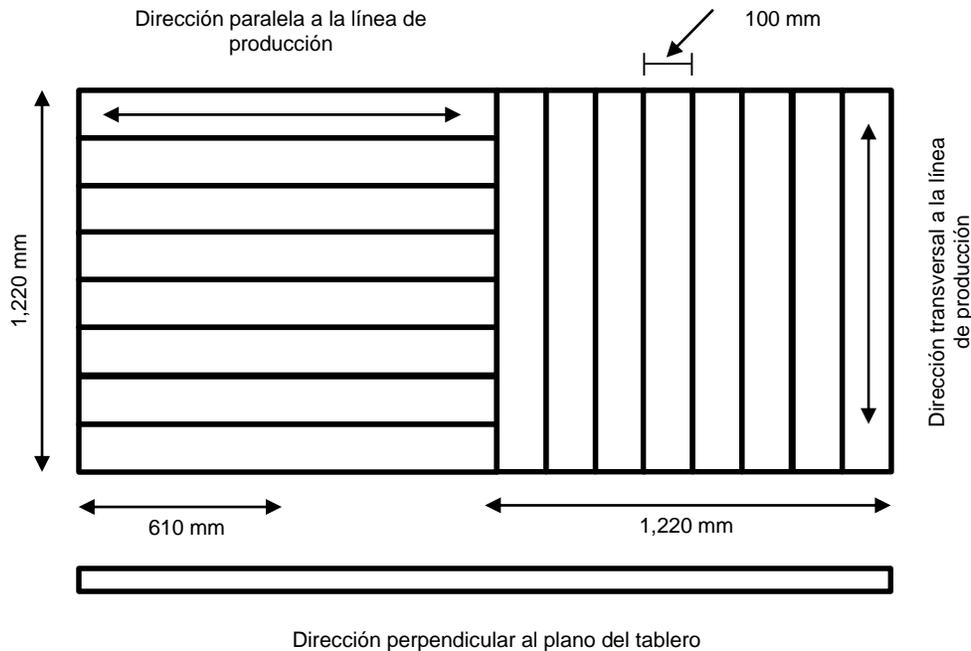


Figura 1. Estrategia para la selección de probetas en un tablero de dimensiones comerciales.

Para este caso de estudio, 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, microscópicamente 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 TPM, 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.

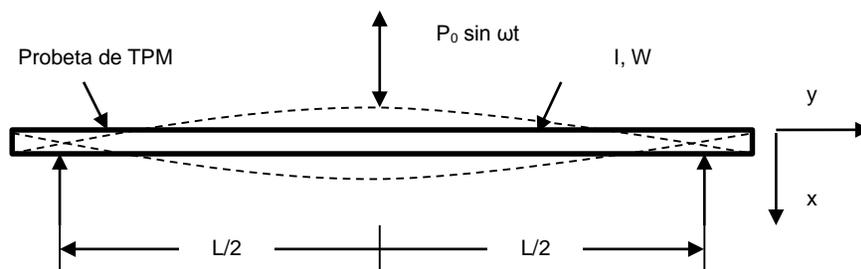


Figura 2. Diagrama de cuerpo libre del sistema estudiado. Donde: I es el Momento de Inercia de la probeta, W es el Peso de la probeta, L es la Portada de la probeta, $P_0 \sin \omega t$ es la función de la fuerza aplicada de frecuencia ω , x es la dirección transversal a la probeta, y es la dirección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



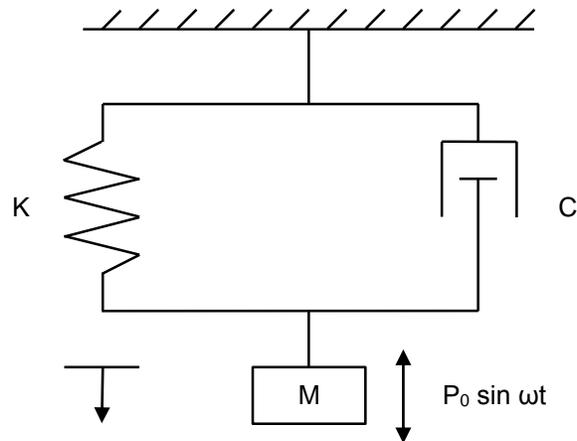


Figura 3. Modelo reológico (cuerpo de Kelvin) del sistema. Donde: M es la Masa del sistema, D es la Constante de amortiguamiento, K es la Constante de Rigidez, $P_0 \sin \omega t$ es la función de la fuerza aplicada de frecuencia ω , x es la dirección transversal a la probeta.

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

$$m \left(\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \right) + d \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right) + k x = P_0 \sin \omega t \quad (1)$$

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 .

t = Tiempo.

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):



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

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.



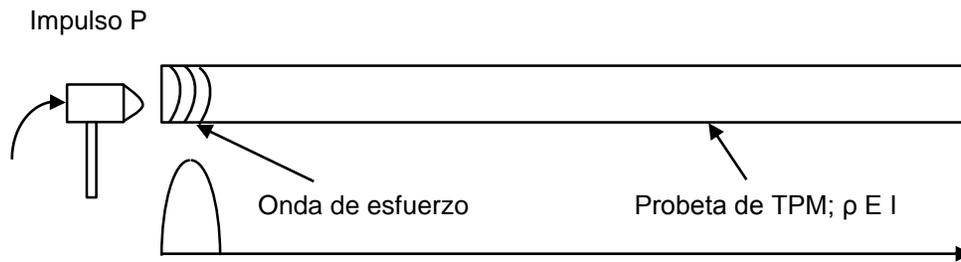


Figura 4. Diagrama de un impulso iniciado en el extremo de la probeta de TPM.

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.

μ = Coeficiente 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:



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:

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

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.

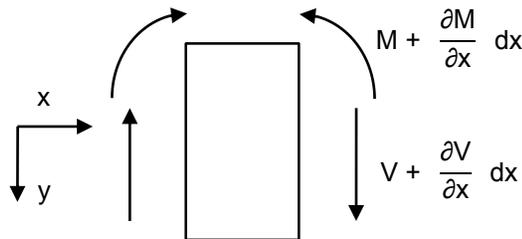


Figura 5. Diagrama de cuerpo libre de un elemento diferencial de una viga solicitada en flexión. Donde: M es el Momento de flexión, V es la Fuerza cortante, x es la dirección longitudinal de la viga, y es la dirección transversal de la viga.

Los ensayos de flexión estática en tres puntos fueron realizados utilizando una maquina 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 y análisis

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/cm³, 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-formaldeido 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.

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.



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

Característica estudiada (C.H. = 7 %)	Valor promedio (MPa)	Error estándar de la muestra	Coefficiente de Variación (%)	Portada de ensayo (mm)	Clasificación según ANSI A208.1
Densidad	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.					

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 et al., (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, Grundström (1998), obtiene resultados similares y considera que la diferencia es debida al esfuerzo cortante presente durante la deformación de la probeta.

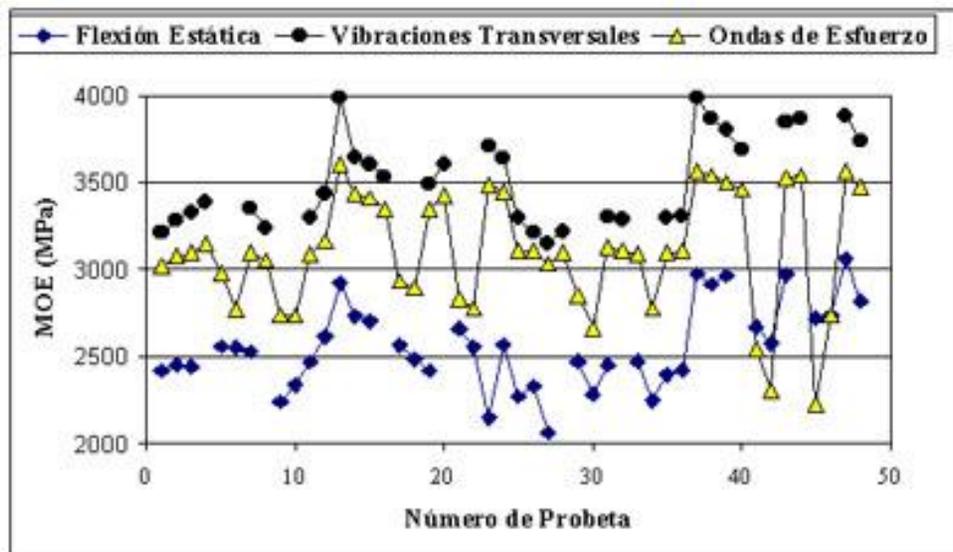


Figura 6. Valores del Módulo de Elasticidad según el método utilizado para su determinación.

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 esta 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 solicitaciones 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 solicitados 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 según la orientación 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 (T/P) 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	-	$y = - 577 + 1.24 x$	$y = 1452 + 0.803 x$
	-	R = 0.98	R = 0.83
MOE sw	$y = 591 + 0.767 x$	-	$y = 1305 + 0.757 x$
	R = 0.98	-	R = 0.90
MOE st	$y = - 441 + 0.858 x$	$y = - 871 + 1.06 x$	-
	R = 0.83	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 y col. (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 le 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.

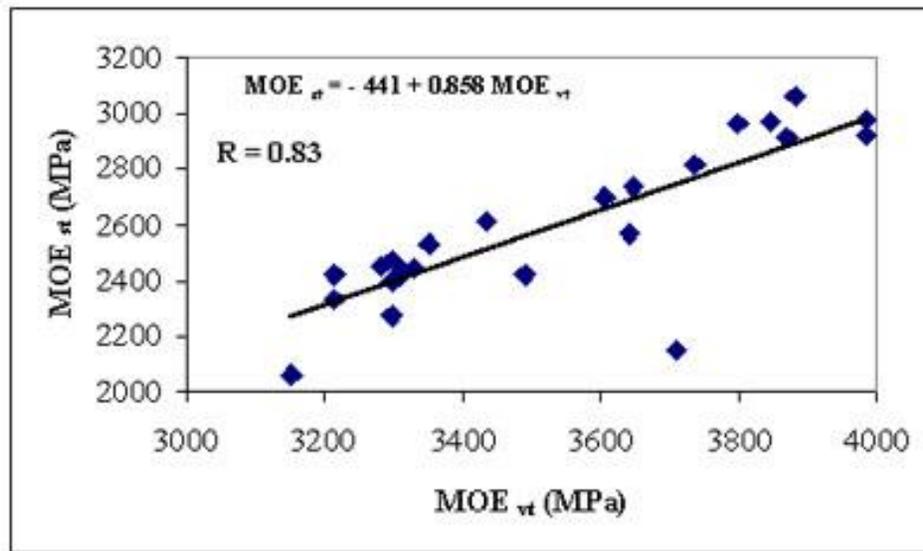


Figura 7. Correlación entre el Módulo de Elasticidad MOE_{st} y el Módulo de Elasticidad MOE_{vt}.

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.

La correlación entre el MOE_{vt} y el MOE_{sw} 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.



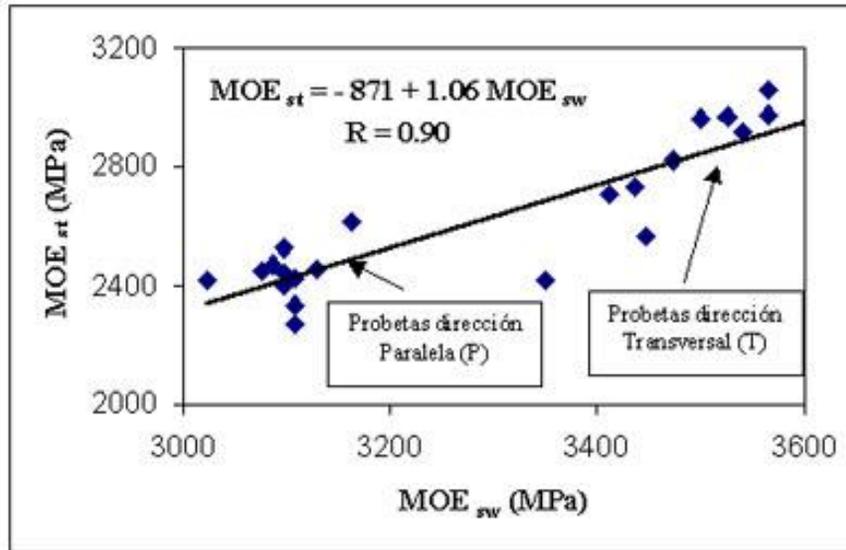


Figura 8. Correlación entre el Módulo de Elasticidad MOEst y el Módulo de Elasticidad MOEsw.

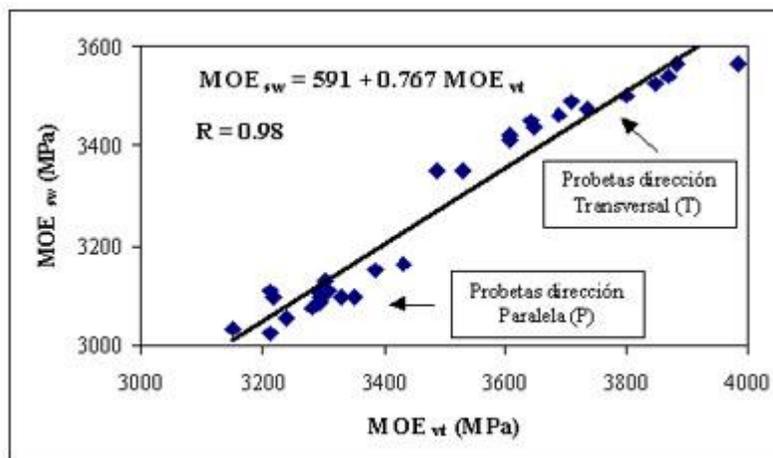


Figura 9. Correlación entre el Módulo de Elasticidad MOEvt y el Módulo de Elasticidad MOEsw.

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 Modulo 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 Modulo de Elasticidad en la dirección Transversal a la línea de producción, es superior al Modulo 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 avenir 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.

Referencias

American National Standard Institute. 1993. ANSI A208.1-1993. Particleboard, Mat-Formed Wood. Composite Panel Association. Washington, D.C. USA.

American Society for Testing and Materials. 2000. Annual Book of ASTM Standards. Section Four; Construction, Volume 04.10, Wood. USA.

Bodig, J. 2001. The Process of NDE Research for Wood and Wood Composites. *The e-journal of nondestructive testing*. NDT.net. ISSN: 1435-4934. March 2001. 6(3).



Bodig, J.; Goodman, J. R. 1973. Prediction of Elastic Parameters for Wood. *Wood Science* 5(4): 249–264.

Bodig, J.; Jayne, B. A. 1993. *Mechanics of Wood Composites*. Reprinted edition, Kreiger Publishing Company. Malabar, FL. USA.

Bucur, V. 1995. *Acoustics of Wood*. CRC Press. New York. USA.

Bucur, V. 1999. Acoustics as a Tool for the Nondestructive Testing of Wood. *The e-journal of nondestructive testing*. NDT.net. ISSN:1435-4934. November 1999. 4(11).

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. USA.

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. USA. 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, USA.

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. USA.



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. USA.

Geimer, R.L.; Lehmann, W.F.; 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, USA. 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. USA.

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.

Guitard, D. 1987. Mécanique du Materiau Bois et Composites. Cepadues-Editions, France.

Hann, R.A.; Black, J.M.; Blomquist, R.F. 1962. How Durable is Particleboard? *Forest Products Journal*. December 1962: 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, USA. 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*. 59:169-175.

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. USA.

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. USA.

Krautkrämer, J.; Krautkrämer, H. 1980. Werkstoffprüfung mit Ultraschall. Springer-Verlag, Berlin. Germany.

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. USA. pp: 367-385.



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. USA.

Metriguard. 1990. Metriguard Model 340 Transverse Vibration E-Computer, Operation Manual. Metriguard Inc. USA.

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 Technolog.* 48:123-129.

NPA. 1993. Particleboard, ANSI A208.1-1993. Gaithersburg, MD: National Particleboard Association. USA.

Pellerin, R.F. 1965. A vibrational approach to nondestructive testing of structural lumber. *Forest Products Journal*. 15(3):93–101.

Pellerin, R.F.; Morschauer, C.R. 1974. Nondestructive testing of particleboard. In: *Proceedings, 7th international particleboard symposium; 1973 March; Pullman, WA: Washington State University. USA.*

Ross, R.J. 1984. Stress wave speed and attenuation as predictors of tensile and flexural properties of wood-based particle composites. Ph. D. Dissertation. Pullman, Washington State University. USA.

Ross, R.J. 1985. Stress wave propagation in wood products. In: *Proceedings, 5th nondestructive testing of wood symposium; 1985 September; Pullman, Washington State University. USA : 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. USA.

Ross, R.J.; Mc Donald, K.A.; Green, D.W.; Schad, K.C. 1996. Relationship between log and lumber modulus of elasticity. *Forest Products Journal*. 47(2):89-92.

Ross, R.J.; Wang, X.; Mattson, J.A.; Erickson, J.R.; Forsman, J.W.; Geske, E.A.; Wher, M.A. 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 2000:155-163.

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.

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.



Sasaki, Y. 2001. Ultrasonic Measurement of Applied Stresses in Wood by Acoustoelastic Birefringent Method. *The e-journal of nondestructive testing*. NDT.net. ISSN: 1435-4934. March 2001. 6(3).

Schad, K.; Kretschman, D.E.; Mc Donald, K.; Ross, R.; Green, D.W. 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.

Smulski, S. Editor. 1997. Engineered Wood Products. A Guide for Specifiers, Designers and Users. PFS Research Foundation. Wisconsin. USA.

Timoshenko, S.; Young, D.H.; Weaver, W.Jr. 1974. Vibration problems in Engineering. 4th. John Wiley & Sons Ed. New York, NY. USA.

Vogt, J.J. 1985. Evaluation of the tensile and flexural properties and internal bond of medium density fiberboard using stress wave speed and attenuation. M.S. Thesis. Pullman, Washington State University. USA.

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 2000:197-206.



CAPÍTULO 4

Caracterización mecánica con métodos no destructivos

Resumen

En México, existen pocas referencias sobre el tema de las características mecánicas de tableros de madera. Como resultado, los tableros de madera son empleados de manera discrecional, de acuerdo a la experiencia del usuario. En el mismo contexto, no existen datos actualizados sobre las características de los tableros de madera. Parece ser importante proporcionar al Ingeniero en Tecnología de la Madera, información técnica sobre parámetros que mejoren el empleo de tableros de madera. Se estudio una muestra de tableros comerciales aglomerados, contrachapados y enlistonados con ultrasonido y ondas de esfuerzo. Se determinaron la densidad, el contenido de humedad, las velocidades de onda, los módulos de elasticidad, factores de calidad y los índices materiales correspondientes. Las velocidades del ultrasonido y de las ondas de esfuerzo variaron en las direcciones longitudinal, perpendicular y transversal en los tableros. Los módulos de elasticidad fueron proporcionales a los valores de las velocidades medidas. Los resultados sugieren que los valores de las velocidades del ultrasonido y de las ondas de esfuerzo en un material compuesto de madera, son indicadores de las propiedades de rigidez elástica del material. El factor de calidad y el índice material en los tres tipos de tableros estudiados, fueron proporcionales y siguieron un patrón similar al que presentaron las velocidades del ultrasonido y de las ondas de esfuerzo.

Palabras clave: Tableros aglomerados, contrachapados y enlistonados, ultrasonido, ondas de esfuerzo, factor de calidad, índice material.



Abstract

In Mexico, there are few references on the subject of the mechanical characteristics of wood boards. As a result, the wood boards are used in a discretionary manner, according to user experience. In the same context, there is no updated data on the characteristics of the wood panel. It seems important to provide the Engineer in Wood Technology with technical information about parameters that improve the use of wood boards. A sample of commercial particleboard, plywood and blockboard was studied with ultrasound and stress waves. Density, moisture content, wave velocities, the moduli of elasticity, quality factors and material indices were determined. Ultrasound and stress wave speeds varied in the longitudinal, perpendicular and transverse directions to the boards. The moduli of elasticity were proportional to the values of the measured velocities. The results suggest that the values of the speed of ultrasound and of stress waves in a composite wood material, are indicative of the elastic stiffness properties of the material. The quality factor and the material index in the three types of boards studied, were proportional and followed a similar pattern to that presented by the ultrasound and stress waves speeds.

Key words: Particleboard, plywood and blockboard, ultrasound, stress waves, quality factor, material index.

Introducción

La fabricación y el empleo de madera reconstituida en forma de tableros, es la tendencia contemporánea en Ingeniería de la madera. Las formas más comunes en el mercado son los tableros aglomerados, los contrachapados y los enlistonados. Información sobre los procesos de fabricación y acerca de sus propiedades tecnológicas, puede ser consultada, entre otros autores en: Carll (1986), Winandy y Kamke (2004), Rowell (2007), Cai y Ross (2010) y Stark y col. (2010). Estos



manuales técnicos se refieren a tecnologías extranjeras y a productos importados en México.

La caracterización mecánica de tableros de madera presenta, entre otras dificultades, la variación en los valores de los parámetros empleados en Diseño e Ingeniería de la Madera. Esta incertidumbre es ocasionada por una parte, por la variabilidad en las características tecnológicas particulares a las especies de madera que conforman los tableros. Y por otra, a las diferencias en los procesos de manufactura, propias a cada empresa. En consecuencia, para tableros de madera, con calidad y clasificación comercial similares, se encuentran valores de resistencia mecánica muy diferentes.

Otra fuente de fluctuación entre los valores de resistencia mecánica de los materiales compuestos de madera, son las diferentes técnicas de laboratorio empleadas para el cálculo de las características mecánicas de los tableros. Por ejemplo, La Sociedad Americana para Pruebas de Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) y la Organización Internacional para la Estandarización (ISO, por sus siglas en inglés) proponen diferentes estándares para la manufactura y para la caracterización de diferentes materiales derivados y/o fabricados con madera.

Por su parte, investigadores en Ciencias de la madera, de acuerdo a los objetivos de sus investigaciones, han desarrollado sus propios métodos de trabajo, ver por ejemplo: Kawamoto y col. (2005) y Han y col. (2006).

Asimismo, la estructura interna de los tableros, puede ser una variable importante que afecte la rigidez aparente de los tableros. De acuerdo con Jayne (1972), los tableros de madera reconstituida, pueden ser considerados como materiales compuestos de madera (Wood composites, en inglés). Entre otros autores, Saka (1993), Smulski (1997) y Morlier y col. (1999), han estudiado a la madera como un material compuesto.



Entre otras ventajas tecnológicas de los materiales compuestos, la combinación de sus constituyentes resulta en un material mixto que presenta diferencias y/o mejoras significativas en sus propiedades físicas y químicas, en comparación con las características de cada uno de sus componentes originales por separado.

Un tablero aglomerado de partículas de madera, se puede modelar como un material compuesto, formado por un constituyente principal, en este caso partículas de madera, embebidas en una matriz de adhesivo (ver Figura 1). La interacción y endurecimiento de las partículas de madera y el adhesivo se logran con ayuda de presión y temperatura (Kelly, 1977).

Para el caso de un tablero contrachapado, éste se puede modelar como un material compuesto de tipo multicapas (Bodig y Jane, 1982), formado por delgadas chapas de madera alineadas alternativamente en las direcciones longitudinal y transversal, según la dirección de la fibra, y unidas entre sí con un adhesivo apropiado para el empleo final del tablero (ver Figura 1).

Por su parte, un tablero enlistonado puede ser idealizado como un material compuesto y reconstituido a partir de pequeños paralelepípedos de madera y delgadas capas externas también de madera u otro material (ver Figura 1). Todos los constituyentes estando adheridos con un pegamento conveniente. De esta forma, se puede beneficiar madera de cortas dimensiones, la cual siendo un producto secundario del aserrío de la madera, puede ser difícilmente empleada comercialmente.

La madera reconstituida y considerada como un material compuesto, y su combinación con adhesivos adecuados, resuelven por una parte, el problema de la geometría natural de los árboles de los cuales se extrae la madera. El tronco presenta una geometría asimilable a un cilindro o cono irregular, cuyos diámetros, actualmente y en el futuro, cada vez son y serán menores. Esta limitación geométrica se soluciona con la reconstitución a partir de fibras, partículas, astillas,



tabletas y chapas de madera, en tableros con superficies y espesores acordes a usos específicos en Ingeniería de la madera.

Por otra parte, la madera reconstituida y/o los productos compuestos de madera, reducen la heterogeneidad y las propiedades de anisotropía propias a este material de Ingeniería (Hernández Maldonado, 2010). De esta forma, el Diseñador y el Ingeniero en Tecnología de la Madera pueden incorporar este material en proyectos más creativos.

Los tableros de madera, vistos como madera reconstituida o como materiales compuestos, no son necesariamente madera de Ingeniería (Engineered Wood Products, de acuerdo con Smulski, 1997). Este término se aplica preferentemente a productos forestales compuestos de madera en distintas formas (sólida, astilla, tableta, aglomerada y/o en capas), combinadas con otros materiales de Ingeniería (por ejemplo, plásticos y metales), cuyo diseño está orientado a funcionar como elementos estructurales preferentemente en la industria de la construcción (por ejemplo, vigas, columnas y placas).

Respecto a la caracterización de materiales compuestos de madera, aparte de los métodos de ensayo normalizados, existe una pluralidad de procedimientos que emplean métodos no destructivos, como por ejemplo, el ultrasonido y las ondas de esfuerzo. Estas prácticas no están aún normalizadas, sin embargo, son de uso común. 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 (Bucur, 2006 y Pellerin y Ross, 2002).

Las principales ventajas de la utilización de métodos no destructivos son la rapidez para obtener resultados precisos y la adaptabilidad para su empleo en condiciones de laboratorio, *In-Situ* y en contexto industrial, entre otras. Además, gracias a su repetitividad en las mediciones, los métodos no destructivos permiten analizar pequeñas muestras de material, evitando estudios que requieran numerosos



especímenes de ensayo. Este argumento permite realizar investigaciones intensivas sobre una muestra pequeña de material, sin poner en juego la validez de los resultados (Sotomayor Castellanos, 2003).

La aplicación de métodos no destructivos 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 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.

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 paneles estructurales ha sido estudiada recientemente. Además los resultados corroboran una estrecha relación estadística entre la velocidad del sonido en los tableros de madera y otras propiedades mecánicas (Pellerin y Morschauser, 1974; Ross, 1985; Ross y Pellerin, 1988 y Vogt, 1986). Sin embargo, la diversidad de métodos y estándares para la evaluación de las propiedades mecánicas de tableros de madera resultan en valores diferentes y particulares para cada proceso de fabricación y variedad de productos.

Para una correcta evaluación de los tableros de madera en aplicaciones para Ingeniería, son necesarios entre otros parámetros: la densidad (ρ), la velocidad del ultrasonido (V), el módulo de elasticidad (E) y el factor de calidad (F).



El factor de calidad que pondera la velocidad de onda por la densidad del material, es el parámetro más significativo en la determinación de la calidad de la madera para aplicaciones acústicas. Un valor alto del factor de calidad de una madera indica una buena calidad acústica comparativa.

Por otra parte, un buen diseño de estructuras de madera puede contribuir a mejorar el ambiente sonoro en construcciones, gracias a las propiedades acústicas del material. Entre otros indicadores de calidad de los materiales de construcción, el índice material (I) que relaciona su módulo de elasticidad con su densidad es un indicador de la calidad de la madera para usos específicos.

Para clasificar y comparar las cualidades de aislamiento acústico de la madera de una especie en particular, es igualmente importante su índice material. Un significativo índice I de una madera propone una mejor resistencia en relación a su densidad y una buena apreciación como material de Ingeniería.

Asimismo, los tableros de madera son componentes constructivos que compiten con otros materiales y tecnologías propias de la industria de la construcción. Con el objeto de mejorar la productividad industrial, es primordial el conocimiento fundamental de los atributos relativos a su aptitud para construir con estos materiales. En el asunto que nos ocupa, es recomendable contar con información técnica de materiales para su incorporación en el proceso constructivo, como es el caso de los tableros de madera, los cuales se caracterizan por ser resistentes pero a la vez ligeros.

Problemática

En el País, existen pocas referencias sobre el tema de las características mecánicas de tableros de madera. El Manual de construcción de estructuras ligeras de madera, de la Comisión Forestal de América del Norte (1994), hace referencia a productos y normas extranjeras, y como complemento, presenta las recomendaciones del



Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal y sus Normas Técnicas Complementarias (Gobierno del Distrito Federal, 2004), así como a la normativa mexicana al respecto (Dirección general de normas, 2006a, 2006b y 2006c).

Por su parte, en el Laboratorio de Mecánica de la Madera, de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, se han investigado recientemente las propiedades tecnológicas de materiales compuestos de madera (Sotomayor Castellanos 2003, Sotomayor Castellanos y col., 2006 y Sotomayor Castellanos y Metzger, 2007).

Como resultado de este escenario, en México, los tableros de madera son empleados de manera discrecional, de acuerdo a la experiencia del usuario. En el mismo contexto, no existen datos actualizados sobre las características de los tableros de madera. Parece ser importante proporcionar al Ingeniero en Tecnología de la Madera, información técnica sobre parámetros que mejoren el empleo de tableros de madera. De aquí, las siguientes preguntas de investigación.

¿Cuáles son los valores de la velocidad del ultrasonido y de las ondas de esfuerzo y sus parámetros derivados, en los diferentes materiales a base de madera reconstituida: tableros aglomerados, contrachapados y enlistonados?

¿Cuál es el efecto de la estructura en la velocidad del ultrasonido y en las ondas de esfuerzo y en sus parámetros derivados: módulo de elasticidad, índice material y factor de calidad?

Para responder a estas preguntas de investigación, se sugiere la siguiente hipótesis de trabajo.

La diferencia estructural de la madera reconstituida, modifica su densidad, su velocidad de onda y los parámetros derivados, entre otros, el módulo de elasticidad, el factor de calidad y el índice material.



Con el objeto de verificar experimentalmente esta hipótesis, se proponen los siguientes objetivos de investigación.

Objetivos

1 Determinar en tableros aglomerados, contrachapados y enlistonados de madera, la densidad y el contenido de humedad.

2 Determinar para las direcciones longitudinal, perpendicular y transversal, los siguientes parámetros: velocidades del ultrasonido y de ondas de esfuerzo, módulos de elasticidad, factores de calidad e índices materiales.

Materiales y métodos

Materiales

El material experimental consistió en tres tableros aglomerados, tres tableros contrachapados y tres tableros enlistonados, adquiridos en un establecimiento comercial especializado en venta de productos forestales, en la ciudad de Morelia, Michoacán.

De acuerdo a la información proporcionada por el establecimiento comercial, los tableros aglomerados son catalogados comercialmente como tableros estructurales compuestos por partículas mezcladas de madera de varias especies del género *Pinus*.

Igualmente, los tableros contrachapados son catalogados comercialmente como tableros estructurales contrachapados con siete capas de madera del género *Pinus*.

Los tableros enlistonados están armados por listones de madera del género *Pinus*, de sección cuadrada de 15 mm de arista y recubiertos en sus dos caras con chapas



de madera de Cedro (*Cedrela* spp.), de acuerdo a la información proporcionada por el establecimiento comercial.

Los diagramas del espesor y de la estructura interna de los tres tipos de tableros estudiados se presentan en la Figura 1. Las dimensiones de los tableros y de las probetas se muestran en el Cuadro 1.

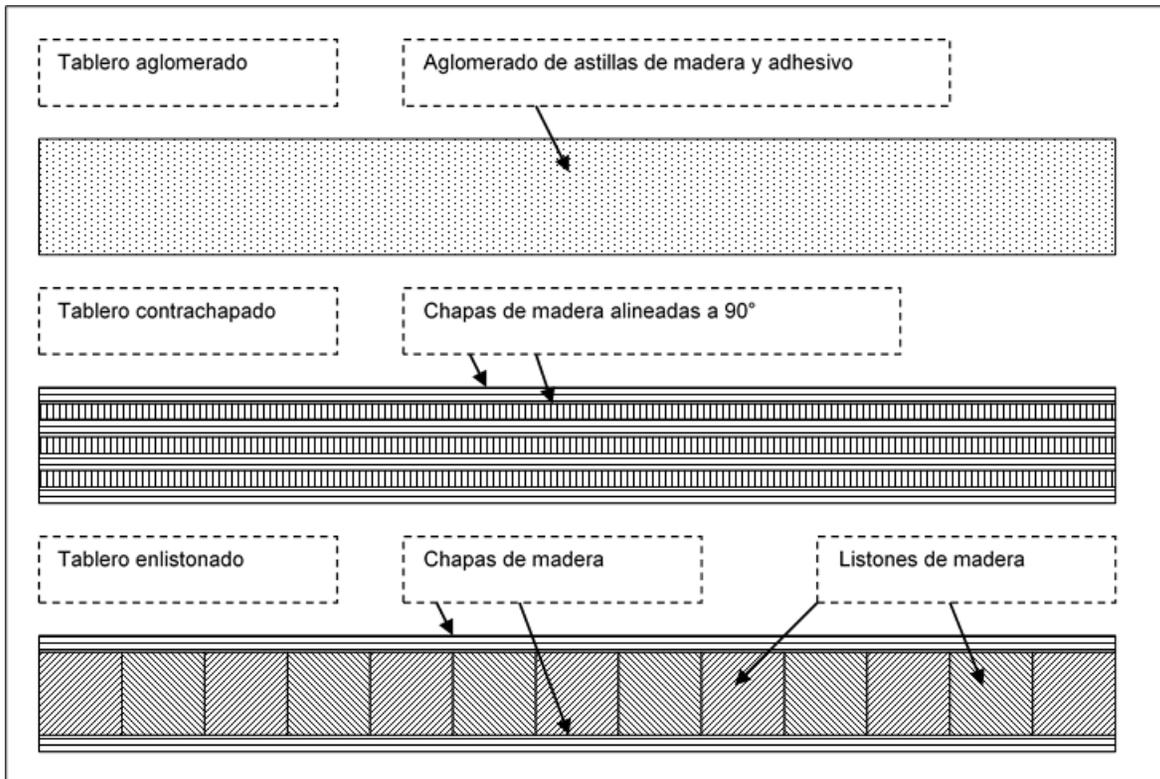


Figura 1. Diagramas del espesor y de la estructura interna de los tableros.



Cuadro 1. Dimensiones de los tableros y de las probetas.

Material	No. Tableros	Dimensiones de los tableros			No. Probetas	Dimensiones de las probetas		
		Ancho (m)	Largo (m)	Espesor (m)		Ancho (m)	Largo (m)	Espesor (m)
Tableros aglomerados	3	1.22	2.44	0.018	11	Recortadas en la dirección paralela al largo del tablero		
						0.100	1.216	0.018
					11	Recortadas en la dirección perpendicular al largo del tablero		
						0.100	1.220	0.018
Total					66			
Tableros contrachapados Número de capas: 7	3	1.22	2.44	0.018	11	Recortadas en la dirección paralela al largo del tablero		
						0.100	1.216	0.018
					11	Recortadas en la dirección perpendicular al largo del tablero		
						0.100	1.220	0.018
Total					66			
Tableros enlistonados	3	1.22	2.44	0.019	11	Recortadas en la dirección paralela al largo del tablero		
						0.100	1.216	0.019
					11	Recortadas en la dirección perpendicular al largo del tablero		
						0.100	1.220	0.019
Total	9				66			

Métodos

La metodología general de la investigación se presenta en la Figura 2. Las pruebas de ultrasonido y de ondas de esfuerzo se realizaron en las probetas correspondientes a cada tipo de tableros y a su orientación con respecto a la dirección paralela (longitudinal) al largo del tablero. Los valores promedio de los resultados por categoría y por orientación fueron utilizados en el análisis. A continuación, se describen cada una de las etapas de la metodología.



Acondicionamiento y preparación de probetas

Los nueve tableros fueron marcados y recortados de acuerdo al diagrama presentado en la Figura 3. De esta forma, de cada tablero se obtuvieron once probetas recortadas en la dirección paralela al largo del tablero y once probetas recortadas en la dirección perpendicular al largo del tablero, dando un total de 66 probetas por categoría de tablero. Una vez recortadas las probetas, se acondicionaron en el laboratorio en condiciones de 20°C y 65% de humedad relativa.

La densidad de cada probeta fue calculada por la relación peso/volumen y el contenido de humedad por la relación peso al momento del ensayo/peso seco.

Pruebas de ultrasonido

Las pruebas de ultrasonido (us) consistieron en medir el tiempo de transmisión del ultrasonido a través de los tableros en las diferentes direcciones estudiadas. Para tal fin, se utilizó el aparato *Sylvatest*® (Conceptsboisstructure, 2004) como cronómetro, tal como se muestra en la Figura 4, que presenta un esquema del ensayo de ultrasonido y el diagrama de una probeta.



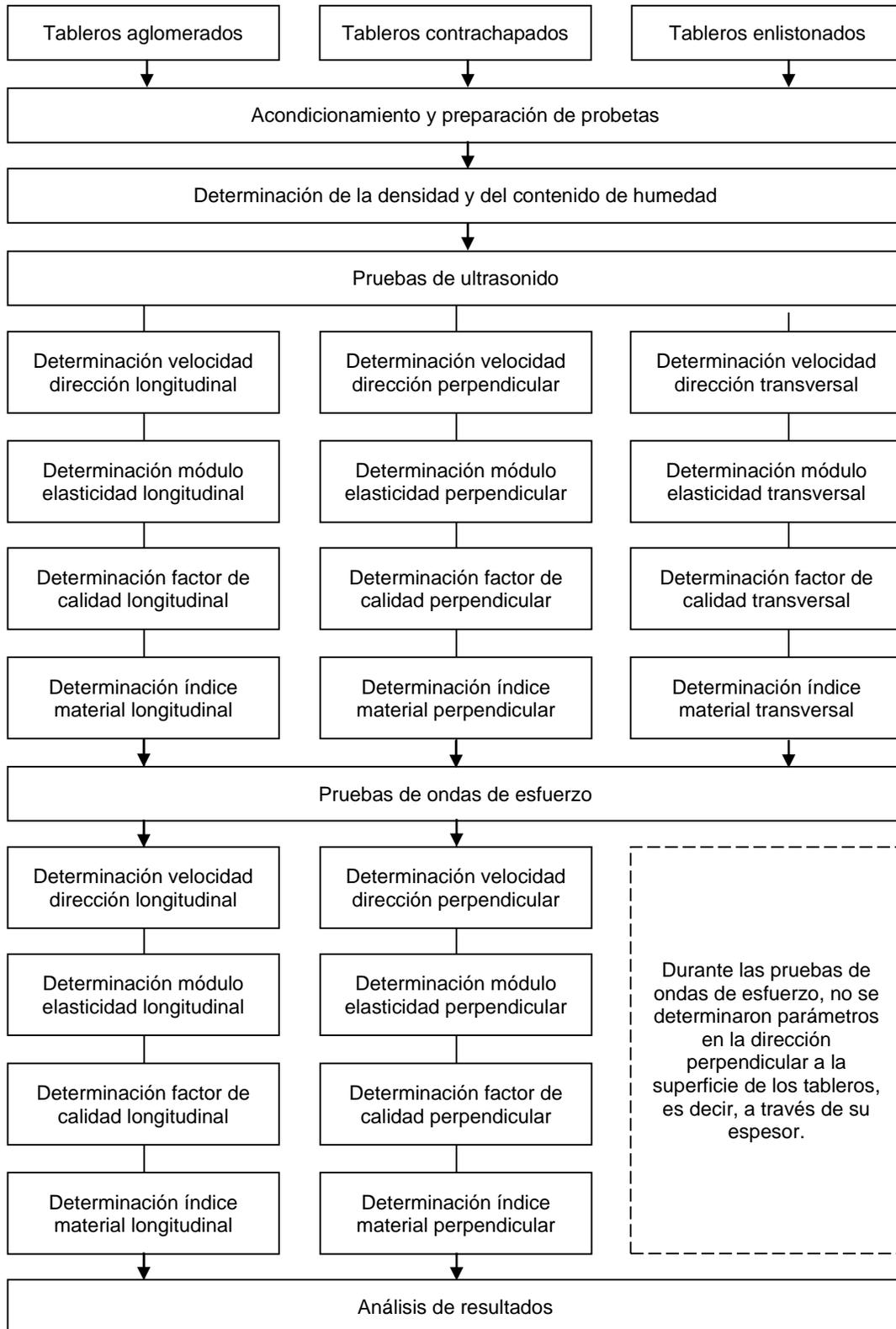


Figura 2. Metodología.



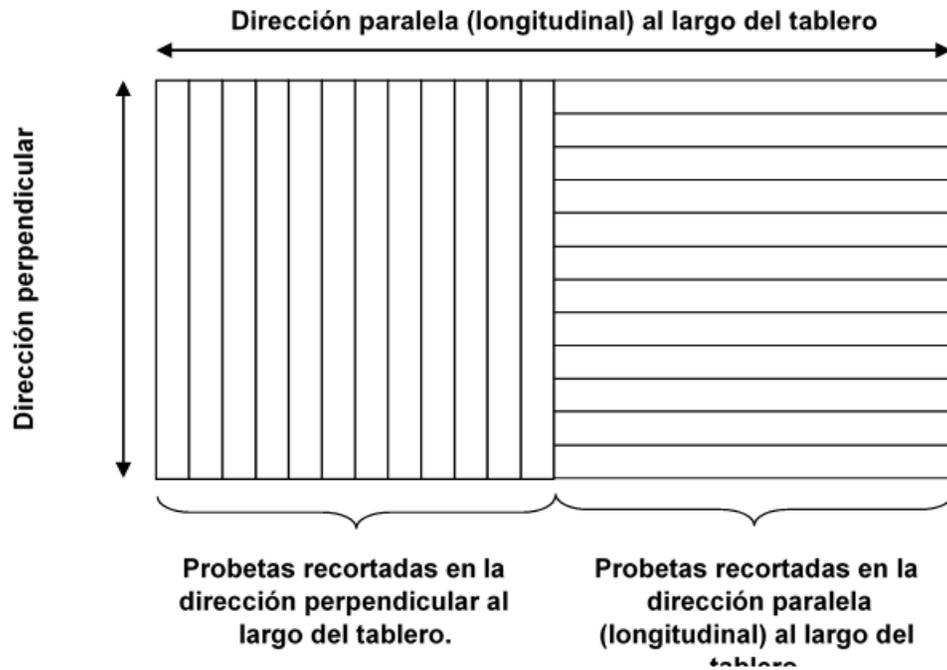


Figura 3. Recorte de las probetas.

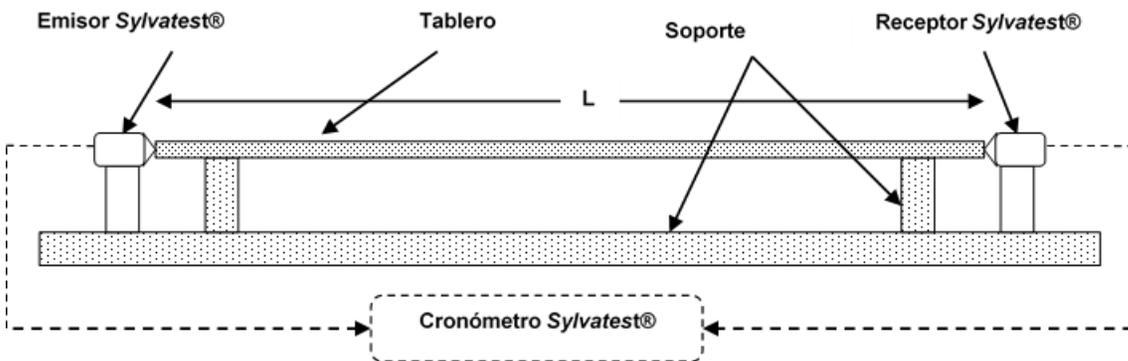


Figura 4. Ensayo de ultrasonido y diagrama de una probeta.

El módulo de elasticidad por ultrasonido se calculó a partir de la velocidad del ultrasonido aplicando la fórmula (Bucur, 2006):

$$E_{us} = V_{us}^2 \rho \quad (1)$$

Donde:

E_{us} = Módulo de elasticidad por ultrasonido (Pa).



V_{us} = Velocidad del ultrasonido (m/s).

ρ = Densidad de la madera (kg/cm^3).

De esta forma se calcularon las velocidades correspondientes a las direcciones longitudinal (Long) y perpendicular (Perp), y a través del espesor transversal (Trans), de acuerdo a la orientación de las probetas presentada en la figura 3.

Pruebas de ondas de esfuerzo

Las pruebas de ondas de esfuerzo (oe) consistieron en medir el tiempo de transmisión de ondas de esfuerzo a través de los tableros en las diferentes direcciones estudiadas. Para tal fin, se utilizó el aparato *Metriguard*® (Metriguard, 1998) como cronómetro, tal como se muestra en la Figura 5, que presenta un esquema del ensayo de ondas de esfuerzo y el diagrama de una probeta.

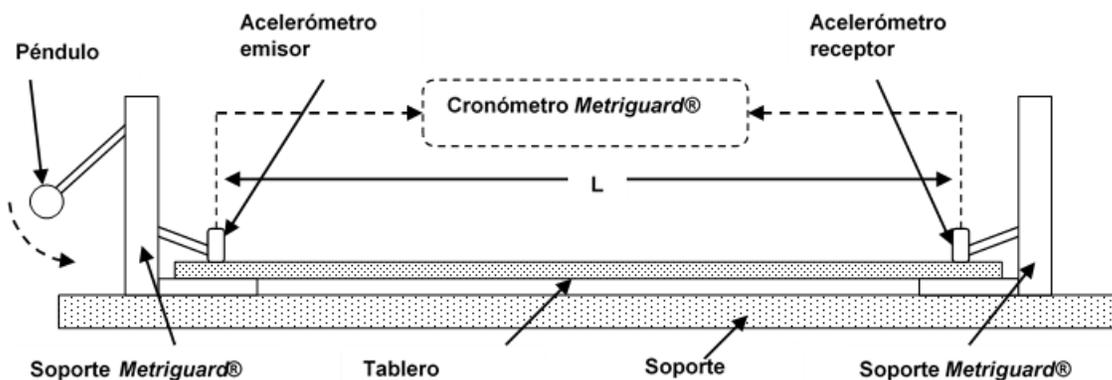


Figura 5. Ensayo de ondas de esfuerzo y diagrama de una probeta.

El módulo de elasticidad en ondas de esfuerzo se determinó a partir de la velocidad de las ondas de esfuerzo con la fórmula (Pellerin y Ross, 2002):

$$E_{oe} = V_{oe}^2 \rho \quad (2)$$

Donde:



E_{oe} = Módulo de elasticidad por ondas de esfuerzo (Pa).

V_{oe} = Velocidad de las ondas de esfuerzo (m/s).

ρ = Densidad de la madera (kg/cm³).

De esta forma se calcularon las velocidades correspondientes a las direcciones longitudinal (Long) y perpendicular (Perp), de acuerdo a la orientación de las probetas presentada en la figura 3.

Determinación del factor de calidad

El factor de calidad (F) se calculó de acuerdo con Spycher y col. (2008), ponderando la velocidad de onda medida (V) por la densidad (ρ) aparente del material estudiado:

$$F = \frac{V}{\rho} \quad (3)$$

Determinación del índice material

El índice material (I) se calculó de acuerdo con Ashby (1999), ponderando el módulo de elasticidad (E) del material por la densidad aparente (ρ) del tablero en cuestión:

$$I = \frac{E}{\rho} \quad (4)$$

Resultados y analisis

Los resultados de la investigación se presentan en el Cuadro 2. Los estadígrafos calculados son el promedio y la desviación estándar de cada uno de los parámetros medidos para cada categoría de tableros y en sus direcciones longitudinal, perpendicular y transversal. En el mismo Cuadro, se presentan los valores promedio y la desviación estándar de las densidades correspondientes a cada grupo de probetas estudiado, así como su contenido de humedad correspondiente.



Cuadro 2. Valores de los parámetros calculados.

Velocidad del ultrasonido y de ondas de esfuerzo								
Material		Densidad (g/cm ³)	CH (%)	Vus			Vos	
				Long (m/s)	Perp (m/s)	Trans (m/s)	Long (m/s)	Perp (m/s)
TA	\bar{x}	0.628		2231	2194	708	2159	2093
	σ	0.002	-	27.75	19.60	19.01	17.42	17.16
TC	\bar{x}	0.532		3832	3298	1858	3636	3002
	σ	0.009	-	157.17	122.12	199.74	116.90	89.78
TE	\bar{x}	0.466		4277	2337	2163	3845	2151
	σ	0.010	-	208.59	119.24	423.12	210.61	100.01
Módulo de elasticidad								
Material	Estadíst. rafo	Densidad (g/cm ³)	CH (%)	Eus			Eos	
				Long (MPa)	Perp (MPa)	Trans (MPa)	Long (MPa)	Perp (MPa)
TA	\bar{x}	0.628		3129	3022	315	2934	2752
	σ	0.002	-	93.03	54.80	16.92	58.41	45.82
TC	\bar{x}	0.532		7821	5790	1855	7035	4795
	σ	0.009	-	660.83	407.97	398.42	408.88	274.80
TE	\bar{x}	0.466		8493	2554	2249	6874	2161
	σ	0.010	-	839.12	306.66	955.98	807.19	225.80
Factor de calidad								
Material	Estadíst. rafo	Densidad (g/cm ³)	CH (%)	Fus			Fos	
				Long	Perp	Trans	Long	Perp
TA	\bar{x}	0.628		3552	3493	1127	3431	3334
	σ	0.002	-	47.35	33.10	31.33	47.89	29.26
TC	\bar{x}	0.532		7209	6203	3496	6842	5646
	σ	0.009	-	367.95	282.34	398.42	344.55	217.77
TE	\bar{x}	0.466		9240	5020	4668	8304	4622
	σ	0.010	-	558.00	208.95	955.98	495.33	205.22
Índice material								
Material	Estadíst. rafo	Densidad (g/cm ³)	CH (%)	Ius			Ios	
				Long	Perp	Trans	Long	Perp
TA	\bar{x}	0.628		4979	4813	502	4661	4383
	σ	0.002	-	124.20	85.97	26.58	75.30	71.79
TC	\bar{x}	0.532		14706	10889	3490	13234	9018
	σ	0.009	-	1198.68	805.82	753.41	861.55	539.23
TE	\bar{x}	0.466		18332	5478	4856	14827	4638
	σ	0.010	-	1773.32	566.48	1938.67	1624.25	436.64
TA: Tableros aglomerados. TC: Tableros contrachapados. TE: Tableros enlistonados. Long: Dirección longitudinal del tablero. Perp: Dirección perpendicular del tablero. Trans: Dirección transversal (espesor) del tablero.				\bar{x} : Media aritmética. σ : Desviación estándar. us: Ultrasonido. oe: Ondas de esfuerzo. CH: Contenido de humedad del tablero.				



Densidad

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 2, los tableros aglomerados mostraron la densidad más importante, comparativamente con los tableros contrachapados y los tableros enlistonados. Estos resultados pueden ser explicados por el hecho de que la madera de los tableros aglomerados está más compactada que la madera de los tableros contrachapados. La compactación de la madera y la incorporación de adhesivo durante la fabricación de los tableros aglomerados, incrementan la densidad aparente del material.

La densidad de los tableros contrachapados, es aparentemente mayor a la densidad de la madera de *Pinus* spp. de la cual están conformados. Este resultado es explicado por el proceso de compactación durante la operación de prensado de las diferentes capas de madera que forman el armado de este tipo de madera reconstituida. Además, es necesario considerar el peso del adhesivo que se incorpora durante la fabricación de los tableros contrachapados.

Respecto a los tableros enlistonados, los cuales están formados por listones de madera sólida, ensamblados éstos con adhesivo y recubiertos en sus dos caras por placas delgadas de madera, prácticamente no contienen compactación de la madera. En consecuencia, su densidad aparente se refiere a la de la madera sólida, de la cual están mayoritariamente compuestos. En esta investigación, se trata de madera del género *Pinus*.

Para fines de Ingeniería de la madera, la baja densidad del material es un parámetro que por sí mismo reduce las cargas y esfuerzos ocasionados por el peso del material. Sin embargo, como ventaja para fines de diseño, es necesario ponderar sus propiedades de resistencia con su densidad. Por ejemplo, su factor de calidad y su índice material.



Contenido de humedad

Los valores promedio del contenido de humedad fueron relativamente similares entre los tableros de madera, tal como se muestra en la Tabla 2. Además, su variación fue mínima, de tal forma que esta variable puede ser considerada constante y sin influencia en los resultados de esta investigación.

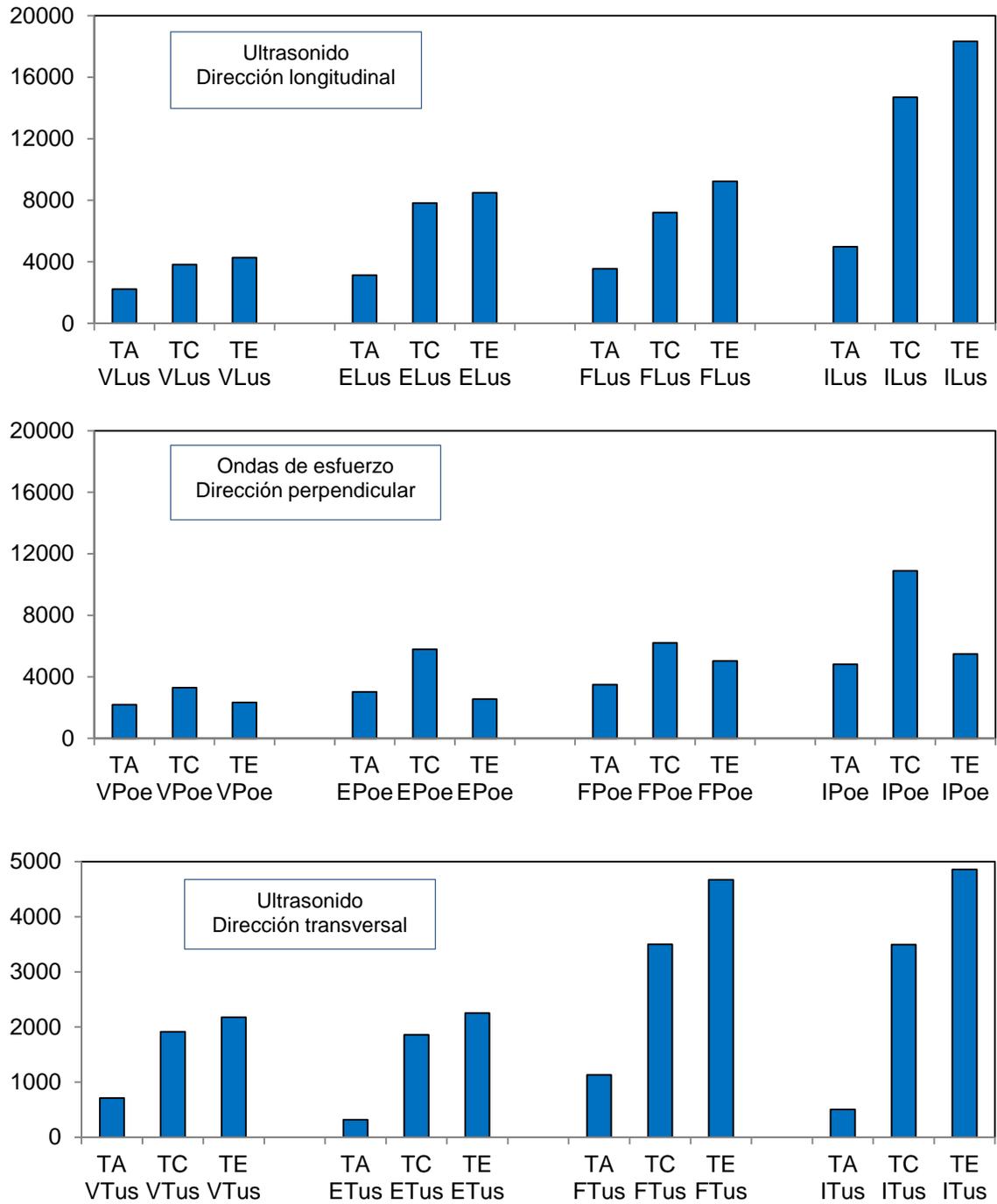
Sin embargo, es necesario hacer notar que la variación en el contenido de humedad de un tablero o material compuesto de madera, modifica los parámetros físicos de estos materiales de manera similar y proporcional a los de la madera de la cual están constituidos.

Velocidad del ultrasonido

Los valores de la velocidad del ultrasonido y de las ondas de esfuerzo variaron en relación a la dirección de transmisión de la onda medida, es decir, según las direcciones longitudinal, perpendicular y transversal en los tableros (ver Figuras 3 y 6, y Tabla 2). Asimismo, los resultados variaron de acuerdo al tipo de material estudiado.

El ultrasonido se transmite mejor de acuerdo a la proporción de madera sólida que está presente en el armado de los tableros. De acuerdo a los resultados, los tableros enlistonados permiten el flujo simétricamente a las diferentes direcciones de anisotropía de la madera: En el sentido longitudinal del tablero, el cual corresponde a la dirección transversal de la madera de los listones que constituyen los tableros, la velocidad del ultrasonido, es similar a la medida recientemente por Sotomayor Castellanos y col. (2010), en las direcciones de anisotropía radial y tangencial de la madera del género *Pinus*, para especies con densidad proporcional a la de los tableros enlistonados.





TA: Tableros aglomerados.

TC: Tableros contrachapados.

TE: Tableros enlistonados.

L: Dirección longitudinal del tablero.

P: Dirección perpendicular del tablero.

T: Dirección transversal (espesor) del tablero.

V: Velocidad (m/s).

E: Módulo de elasticidad (MPa).

F: Factor de calidad.

I: Índice material.

us: Ultrasonido.

oe: Ondas de esfuerzo.

Figura 6. Comparación de resultados de acuerdo al tipo de tablero.



De manera diferente, en la dirección transversal al plano formado por las direcciones longitudinal y perpendicular de los tableros, el valor de la velocidad del ultrasonido a través del espesor, disminuyó considerablemente. Parece ser que la onda de ultrasonido se frenó al pasar a través de las dos chapas que cubren las caras de los tableros. Además, la especie *Cedrela* spp., de las chapas que recubren las caras de los tableros, es diferente a la madera de *Pinus* spp., de los listones.

Para la dirección transversal de los tableros, la cual corresponde a la dirección longitudinal de la madera de los listones que constituyen los tableros, la velocidad del ultrasonido, es similar a la medida por Villaseñor Aguilar (2007), en la dirección longitudinal de la madera de *Pinus douglasiana*, una especie con densidad proporcional a la de los tableros enlistonados.

En definitiva, los valores medidos de la velocidad del ultrasonido demuestran que ésta se transmite mejor en los tableros enlistonados, seguida por los tableros contrachapados y finalmente en los tableros aglomerados.

Módulo de elasticidad

Para los tres tipos de tableros y en las tres direcciones observadas en cada uno de ellos, los valores de los módulos de elasticidad fueron proporcionales a los valores de las velocidades medidas respectivamente. Un valor importante en la velocidad, correspondió a un valor pertinente del módulo de elasticidad. Este resultado sugiere que los valores de las velocidades del ultrasonido y de las ondas de esfuerzo en un material compuesto de madera, son indicadores de las propiedades de rigidez elástica del material.

Ondas de esfuerzo

La transmisión de las ondas de esfuerzo fue más rápida en los tableros contrachapados, seguida por la de los tableros aglomerados y en menor proporción



a la registrada en los tableros enlistonados. Asimismo, la velocidad de las ondas de esfuerzo fue mayor en la dirección longitudinal de los tres tipos de tableros estudiados, en comparación con la velocidad en la dirección perpendicular correspondiente (ver Figuras 3 y 6, y Tabla 2).

De acuerdo con la figura 5, las ondas de esfuerzo se transmitieron principalmente por la capa de los tableros más cercana a la superficie donde se posicionaron los acelerómetros conectados al medidor de tiempo de transmisión *Metriguard*®. Independientemente del posible espesor de la capa por la cual las ondas se transmitieron, para el caso de los tableros aglomerados, ésta presentó una estructura homogénea. De tal forma, que los resultados entre las direcciones longitudinal y perpendicular, presentaron un 3% de diferencia. Por su parte, la diferencia entre las dos direcciones medidas en los tableros contrachapados fue de más de 17%. De esta forma, se evidenció la influencia del acomodo transversal de las chapas de madera y el pegamento, elementos que pudieron influenciar la velocidad de transmisión de la onda. Finalmente, la diferencia entre las direcciones longitudinal y perpendicular de los tableros enlistonados, fue de 44%, valor que pone en evidencia la influencia del acomodo de los listones en la estructura interna de este tipo de tableros, donde la madera sólida está presente en una gran proporción.

Factor de calidad

Los valores del factor de calidad en los tres tipos de tableros estudiados, fueron proporcionales y siguieron un patrón similar al que presentaron las velocidades del ultrasonido y de las ondas de esfuerzo observados (ver Tabla 2 y Figura 6). La diferencia en las dimensiones fue resultado de ponderar las velocidades de transmisión de onda por la densidad respectiva a cada categoría de tablero.

Este resultado sugiere que, además de otros agentes, el acomodo relativo de los diferentes tipos de componentes de madera en los tableros, es la densidad aparente



de los tableros, el factor más importante que explica las cualidades tecnológicas estudiadas.

Si un importante factor de calidad de un material indica buenas cualidades acústicas, en este caso de transmisión de ondas acústicas, valores pequeños de este parámetro, denotarán propiedades de aislamiento sonoro. Este es el caso para los tableros enlistonados, considerando que el valor de su densidad fue menor comparativamente a la de los otros tableros.

De acuerdo a los resultados presentados en la Tabla 2 y en la Figura 6, el factor de calidad F en la dirección transversal, es decir a través de su espesor, fue mayor a los índices F correspondientes a los tableros aglomerados y contrachapados. En este caso, las propiedades de aislamiento sonoro de la madera sólida, influyeron de manera importante, en comparación con el aglomerado de astillas y/o con el compuesto multicapas de chapas de madera, en el fenómeno estudiado.

Para el caso del factor de calidad para las direcciones longitudinal y perpendicular, es la orientación de los listones de madera en los tableros enlistonados lo que indica las diferencias entre los valores de los tres tipos de tableros. En la dirección longitudinal, la madera trasmite mejor el ultrasonido. Por lo tanto, para los listones orientados en ésta dirección, con la dirección de transmisión de la onda, la velocidad y el índice F son mayores al caso de la dirección transversal de la madera.

Índice material

Los valores del índice material I , para los tres tipos de tableros y en las tres direcciones observadas en cada uno de ellos, fueron proporcionales a la velocidad de transmisión. Excepcionalmente, el índice material de los tableros enlistonados, denotó valores menores en relación a los tableros aglomerados y contrachapados. Este resultado puede ser explicado por el efecto combinado de la densidad de los tableros enlistonados, la cual fue mayor en comparación a los otros materiales



estudiados y el bajo valor de la velocidad de onda medida en la dirección perpendicular de los enlistonados.

De esta forma, se confirma que la valoración de un material compuesto de madera, por ejemplo los tableros, como es el caso de esta investigación, están relacionados con sus propiedades de resistencia elástica, es decir el módulo de elasticidad y su densidad.

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.

Conclusiones

Los valores de la velocidad del ultrasonido y de las ondas de esfuerzo, así como los valores de sus parámetros derivados: módulo de elasticidad, índice de calidad e índice material, fueron determinados experimentalmente para diferentes materiales a base de madera reconstituida: tableros aglomerados, contrachapados y enlistonados.

Estos resultados son útiles para la caracterización técnica de estos materiales de construcción y para su empleo en diseño de productos y para el cálculo de estructuras en Ingeniería de la Madera.

El tipo, forma y acomodo de los diferentes componentes que forman los tableros de madera, influyen en los valores de sus características tecnológicas.



En un tablero de madera, como los estudiados en esta investigación, las propiedades de anisotropía material y elástica de la madera sólida y en su defecto de chapas de madera y/o astillas, influyen en los resultados de acuerdo a su orientación en la fabricación de los tableros.

Referencias

Ashby, M.F. 1999. *Materials selection in mechanical design*. Second Edition. Butterworth Heinemann. England.

Bodig, J.; Jayne, B.A. 1982. *Mechanics of Wood Composites*. Van Nostrand Reinhold. USA.

Bucur, V. 2006. *Acoustics of Wood*. Springer-Verlag. Germany.

Cai, Z.; Ross, R.J. 2010. *Wood Handbook, Chapter 12: Mechanical Properties of Wood-Based Composite Materials*. General Technical Report FPL-GTR-190. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. USA.

Carll, C.G. 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. USA.

Comisión Forestal de América del Norte. 1994. *Manual de construcción de estructuras ligeras de madera*. Consejo Nacional de la Madera en la Construcción. México.

Conceptsboisstructure. 2004. *Sylvatestduo user manual*. France.



Dirección General de Normas. 2006a. NMX-C-438-2006. Industria de la Construcción – Tableros Contrachapados de Madera de Pino y otras Coníferas. Clasificación y Especificaciones. México.

Dirección General de Normas. 2006b. NMX-C-439-ONNCCE-2006. Propiedades físicas y métodos de ensayo. México.

Dirección General de Normas. 2006c. NMX-C-440-ONNCCE-2006. Propiedades mecánicas y métodos de ensayo. México.

Gobierno del Distrito Federal. 2004. Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de madera. Gaceta oficial del Distrito Federal. Tomo I no. 103-bis. pp: 54-87. México.

Han, G.; Wu, Q.; Wang, X. 2006. Stress-wave velocity of wood-based panels: Effect of moisture, product type, and material direction. *Forest Products Journal*. 56(1):28-33.

Hernández Maldonado, S.A. 2010. Comportamiento elástico de la madera. Teoría y aplicaciones. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.

Jayne, B.A. 1959. Vibrational properties of wood as indices of quality. *Forest Products Journal*. 9(11): 413–416.

Jayne, B.A. 1972. Theory and Design of Wood and Fiber Composite Materials. Syracuse University Press. USA.

Kawamoto, S.; Muehl, J.H.; Williams, S. 2005. Use of Acousto-ultrasonic Techniques to Determine Properties of Remanufactured Particleboard Made Solely from



Recycled Particles. In: Third International workshop on Green Composites. pp: 184-189. Japan.

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. USA.

Metriguard Inc. 1998. Metriguard Model 239A Maintenance & Operation Manual. Metriguard Inc. USA.

Morlier, P.; Castéra, P.; Bos, F. 1999. Coordonateurs. Les matériaux composites à base de bois. Revue des composites et des matériaux avancés. Volume 9. Numéro hors série. Hermes Sciences Publications. France.

Pellerin, R.F.; Ross, R.J. Editors. 2002. Nondestructive Evaluation of Wood. Forest Products Society. USA.

Pellerin, R.F.; Morschauer, C.R. 1974. Nondestructive testing of particleboard. In: Proceedings, 7th international particleboard symposium; 1973 March; Pullman, WA: Washington State University. USA.

Ross, R.J. 1985. Stress wave propagation in wood products. In: Proceedings, 5th nondestructive testing of wood symposium; 1985 September; Pullman, Washington State University. USA.

Ross, R.J.; Pellerin, R.F. 1988. NDE of wood-based composites with longitudinal stress waves. *Forest Products Journal*. 38(5):39-45.

Rowell, R.M. 2007. Composite Materials from Forest Biomass: A review of Current Practices, Science, and Technology. In: Materials, Chemicals, and Energy from



Forest Biomass: Chapter 5. Dimitris S. Argyropoulos, Editor. ACS Symposium Series 954. American Chemical society. USA.

Saka, S. 1993. Structure and Chemical Composition of Wood as a Natural Composite Material. In: Recent Research on Wood and Wood-Based Materials. Current Japanese Materials Research Volume 11. Elsevier Science Publishers, England, and the Society of Materials Science, Japan.

Smulski, S. Editor. 1997. Engineered Wood Products. A Guide for Specifiers, Designers and Users. PFS Research Foundation. USA.

Sotomayor Castellanos, J.R. 2003. Caracterización Mecánica de madera reconstituida: Módulo de Elasticidad de Tableros de Partículas de Madera evaluado con métodos no destructivos. *Revista Maderas: Ciencia y Tecnología*. (5)1:20-43. Chile.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Guridi Gómez, L.I.; García Moreno, T. 2010. Características acústicas de la madera de 152 especies mexicanas. Velocidad del ultrasonido, módulo de elasticidad, índice material y factor de calidad. Base de datos. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 6(1):3-32. México.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Ohashi, K.; Hatano, Y.; Shibusawa, T. 2006. Influencia del Perfil de densidad en las propiedades mecánicas y físicas de tableros de fibra de madera. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 2(1): 3-36. México.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Metzger, M.T. 2007. Módulo de elasticidad y resistencia interna de tableros de *Picea abies* con adhesivos a base de soya y de trigo. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 3(1):3-15. México.



Spycher, M.; Schwarze, F.W.M.R.; Steiger, R. 2008. Assessment of resonance wood quality by comparing its physical and histological properties. *Wood Science and Technology*. 42:325-342.

Stark, N.M.; Cai, Z.; Carll, C.G. 2010. Wood Handbook, Chapter 11: Wood-Based Composite Materials-Panel Products, Glued-Laminated Timber, Structural Composite Lumber, and Wood-Nonwood Composite Materials. General Technical Report FPL-GTR-190. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. USA.

Villaseñor Aguilar, J.M. 2007. Comportamiento higroelástico de la madera de *Pinus douglasiana*. Evaluado mediante ultrasonido, ondas de esfuerzo, vibraciones transversales y flexión estática. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.

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.

Winandy, J.E.; Kamke, F.A. (Editors). 2004. Fundamentals of composite processing. Proceedings of a workshop. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-149. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. USA.



CAPÍTULO 5

Caracterización mecánica con vibraciones transversales.

Resumen

En México, los productos de madera reconstituida se encuentran en el mercado en dimensiones y calidades comerciales, y son de uso generalizado en la industria de la construcción y de la fabricación de muebles. No obstante, en el país no existe información apropiada para fines de clasificación o para el empleo de los tableros como material de ingeniería. Las industrias de la construcción, y de manufactura de mueble y artículos utilitarios, emplean los tableros de manera práctica y sin fundamentos de cálculo. El objetivo de esta investigación fue estudiar la densidad, la frecuencia de vibración y el módulo de elasticidad de una muestra comercial de tableros contrachapados, aglomerados y enlistonados de madera. Se realizaron pruebas de vibraciones transversales en probetas recortadas en las direcciones paralela y transversal al plano del tablero. La densidad de los tableros aglomerados fue 18% mayor que la densidad correspondiente a los tableros contrachapados y de 35.5% mayor respecto al valor promedio de los tableros enlistonados. Por su parte, el valor promedio de la densidad de los tableros contrachapados resultó ser 14.6% mayor respecto al valor promedio de la densidad de los tableros enlistonados. Cada tipo de tablero presentó características propias y relacionadas preferentemente con la dirección relativa al plano del tablero de que se trate. Los tableros aglomerados se caracterizaron por tener los valores más altos de sus módulos de elasticidad en comparación con los valores determinados para los tableros contrachapados y enlistonados. Los valores de los módulos de elasticidad determinados por vibraciones transversales entre los tableros aglomerados y los tableros contrachapados y enlistonados no son diferentes estadísticamente.



Palabras clave: Tableros aglomerados, contrachapados y enlistonados, vibraciones transversales

Abstract

In Mexico, reconstituted wood products are found on the market in commercial dimensions and grades, and they have a widespread use in the construction industry and the furniture manufacturing. However, the country lacks appropriate information for classification purposes or to use the boards as an engineering material. The industries of construction, furniture manufacturing and utility items, use wood boards in a practical manner and without a calculation base. The objective of this research was to study the density, the vibration frequency and modulus of elasticity of a commercial sample of plywood, particleboard and blockboard. Transverse vibrations tests were performed on specimens cut in the directions parallel and transverse to the flat board. The density of the particleboard was 18% higher than the density corresponding to the plywood and 35.5% higher than the average value for blockboard. In turn, the average value of the plywood density proved to be 14.6% higher than the average value of the density of blockboard. Each type of board presented its own characteristics and preferably in the direction relative to the plane of the board in question. The particleboards were characterized by higher values of moduli of elasticity compared to the values determined for plywood and blockboard. The values of the elastic moduli determined by transverse vibrations between the particleboard, plywood and blockboard are not statistically different.

Key words: Particleboard, plywood and blockboard, transverse vibrations, modulus of elasticity.

Introducción

Los tableros aglomerados, contrachapados y enlistonados de madera pretenden disminuir el efecto de la heterogeneidad estructural, particularidad intrínseca de la



madera aserrada, en su comportamiento tecnológico. Las dimensiones de los tableros amplían además, las posibilidades de empleo de la madera reconstituida como material de ingeniería.

Por otra parte, la fabricación de tableros de madera consume convenientemente residuos de biomasa forestal o productos secundarios provenientes de la industria de aserrío. Los tableros aglomerados están formados por partículas o fibras de madera derivados de productos secundarios de la industria de aserrío; los tableros contrachapados están compuestos por chapas de madera producidas por torneado o rebanado de troncos; y los tableros enlistonados, los cuales están organizados por paralelepípedos de madera sólida de pequeñas dimensiones, ensamblados como placas, las cuales a su vez, están recubiertas por chapas de madera.

Estas combinaciones de fibras, partículas, pliegos y pequeños elementos de madera están consolidadas entre sí, con adhesivos apropiados según un uso en particular. De esta forma se comprende el concepto de productos de madera reconstituida a partir del tronco y de ramas del árbol.

Este enfoque de reestructurar la geometría y de minimizar la heterogeneidad material de la madera extraída de troncos y ramas de árboles tiene como resultado valorizar la calidad y las características tecnológicas de la madera, de uniformizarlas y de adaptarlas a las especificaciones necesarias para su empleo en Ingeniería de la madera.

Una ventaja adicional de reconstituir madera es la valorización de árboles de especies forestales, que por su forma y dimensiones, así como por las características tecnológicas de su madera, no son de vocación natural para producir madera de ingeniería. Entre otras razones, este interés proviene de que, para fabricar madera reconstituida, no se requiere de árboles de los cuales se extraigan productos aserrados de calidad necesaria para la madera de uso estructural.



Los tableros de madera tienen ventajas comparativas con la madera de uso estructural, la madera sin defectos, la madera laminada y otros productos compuestos de madera. La Figura 1 presenta el diagrama de propiedades materiales de madera y materiales compuestos de madera (Morlier y col., 1999). En esta Figura se grafican las zonas de dispersión de valores de resistencia (Módulo de ruptura en flexión: MOR) y de elasticidad mecánica (Módulo de elasticidad: MOE) para materiales compuestos de madera.

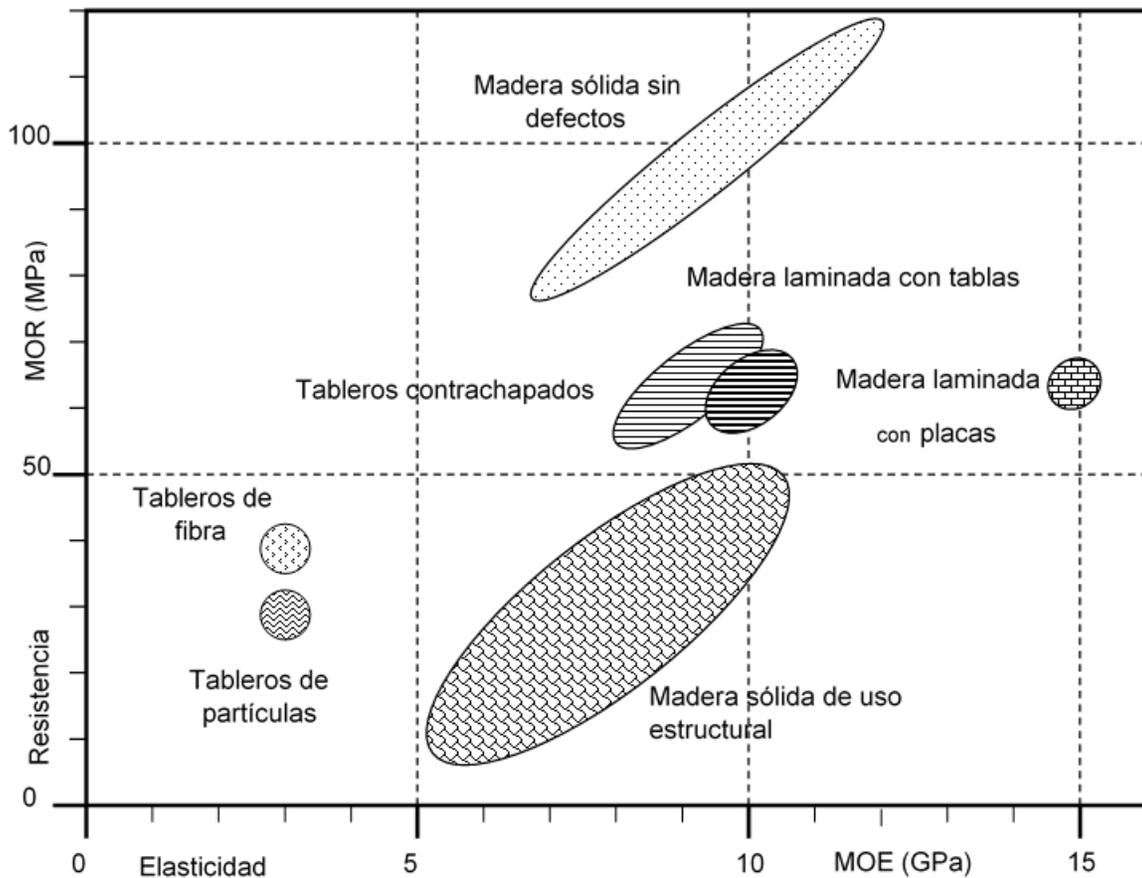


Figura 1. Dispersión de características de resistencia y de elasticidad de madera y materiales compuestos de madera (Adaptado de Morlier y col., 1999).

Los indicadores mecánicos de la madera sin defectos, la cual se emplea en los trabajos de laboratorio para determinar sus características mecánicas de referencia, son comparativamente más grandes respecto a los parámetros de la madera de uso estructural (ver Figura 1). Esta última tiene dimensiones de empleo mínimas de 25



mm en sus aristas, lo cual implica que contenga particularidades de crecimiento tales como nudos, y por otra parte, que los elementos estructurales incluyan defectos de procesamiento como son las fisuras, consecuencia de un secado incorrecto, y un desalineado de sus aristas en relación a las direcciones de ortotropía de la madera, resultado de un aserrado inadecuado. Este razonamiento se refiere a muestras de madera de una misma especie y haciendo abstracción de otras causas de variación de las características físicas de la madera.

De acuerdo a la Figura 1, la madera contrachapada es una solución tecnológica intermedia entre la madera sin defectos y la madera con dimensiones de empleo. Por su parte, los tableros de fibras y de partículas, califican con indicadores más modestos, relativamente a los otros materiales reconstituidos referidos en la figura. Por otra parte, la madera laminada con tablas o con placas mejora las cualidades de resistencia y de elasticidad mecánica de la madera sólida de uso estructural, y además, disminuye la variación en sus cotas mecánicas.

En el mismo orden de ideas, los tableros aglomerados, de fibras y contrachapados reducen significativamente la dispersión de sus indicadores, es decir, reducen la variabilidad inherente a la madera aserrada. Este argumento es privilegiado por el Diseñador y por el Tecnólogo de la madera, quienes prefieren materiales con características uniformes. Además, los materiales reconstituidos permiten un amplio abanico en dimensiones y formas geométricas, argumento fundamental en diseño y concepción de estructuras y productos de madera.

En México estos productos de madera reconstituida se encuentran en el mercado en dimensiones y calidades comerciales, y son de uso generalizado en la industria de la construcción y de la fabricación de muebles. No obstante, en el país no existe información apropiada para fines de clasificación o para el empleo de los tableros como material de ingeniería. Las industrias de la construcción y de manufactura de mueble y artículos utilitarios, emplean los tableros de madera de manera práctica y sin fundamentos de cálculo.



Información ambigua acerca de la caracterización y calidad de tableros de madera empleados en México, puede ser consultada entre otras fuentes en El Manual de Construcción de Estructuras de Madera, publicado por la Comisión Forestal de América del Norte (1994), en la normatividad de la Dirección General de Normas del Gobierno Mexicano (2006) y en las Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de madera, editadas por el Gobierno del Distrito Federal (2004).

Sotomayor Castellanos y col. (2011) en un estudio precedente, caracterizaron con métodos no destructivos, tableros aglomerados, contrachapados y enlistonados de madera. Los autores determinaron entre otros parámetros, las velocidades del ultrasonido y de ondas de esfuerzo, así como los módulos de elasticidad. La presente investigación es seguimiento de este estudio de caracterización mecánica de madera reconstituida. Dado el carácter no destructivo de las pruebas realizadas por Sotomayor Castellanos y col. (2011), los tableros estudiados precedentemente por estos autores, fueron utilizados en esta investigación.

La Figura 2 presenta un diagrama de clasificación relativa de materiales de madera reconstituida en relación al tipo y al intervalo de dimensiones o tamaño de los componentes de madera y al intervalo de densidad del producto, adaptado de Stark y col. (2010).

Los tableros aglomerados estudiados en esta investigación se refieren a la categoría de los tableros de partículas presentados en la Figura 2 y con una ventana de densidades similares a las de los tableros de fibras. De acuerdo con la Figura, los tableros contrachapados poseen un intervalo de valores de densidad más amplio que los tableros de partículas. Finalmente, dado que la densidad de la madera es una propiedad intensiva del material, es decir que no depende de la cantidad de masa presente, los valores de la densidad de los tableros enlistonados es congruente con los de la madera sólida, no obstante que los listones que constituyen los tableros enlistonados son usualmente de pequeñas dimensiones.



Los valores extremos en la Figura 2 corresponden al papel fabricado con fibras de madera y con un amplio abanico de valores de densidad, y en el otro extremo, la madera sólida, con la gran variación en densidad correspondiente a la vasta biodiversidad existente en el país, la cual resulta en una extensa gama de especies de madera.

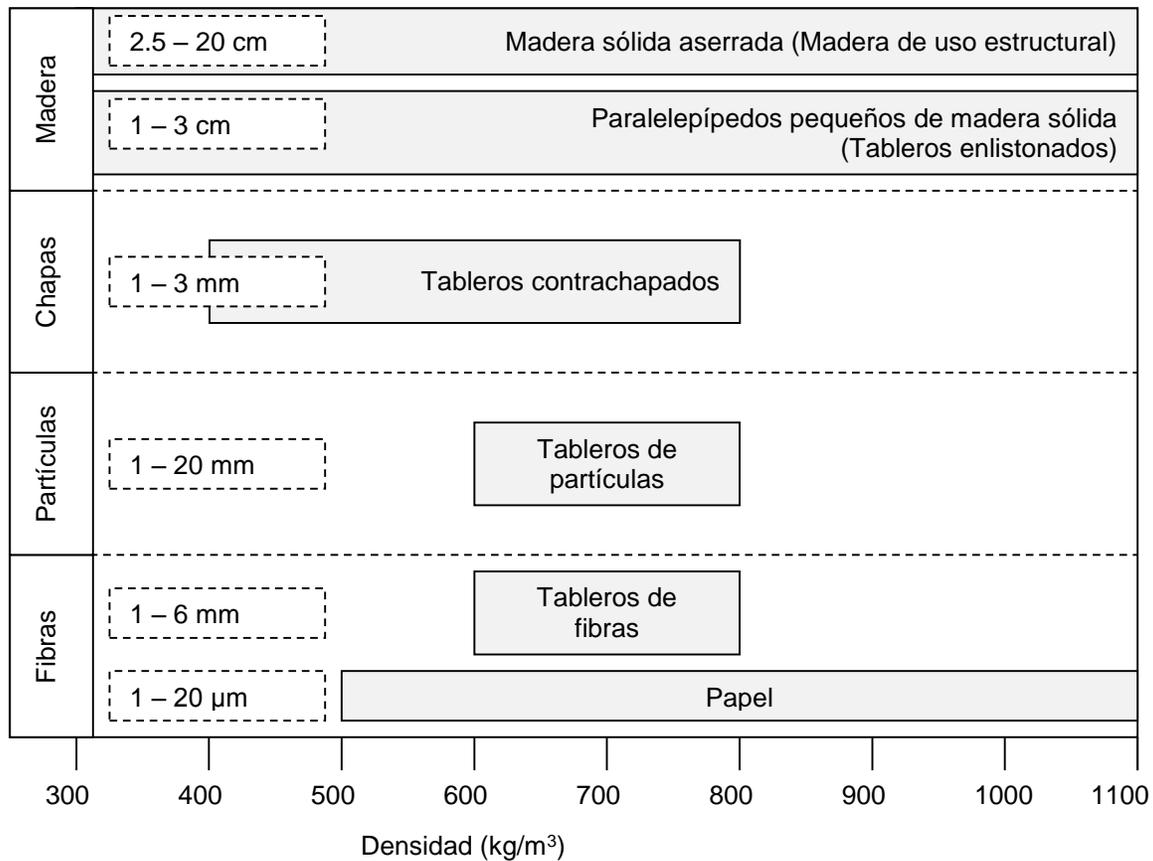


Figura 2. Clasificación de materiales de madera reconstituida en relación al tipo y tamaño de componente y al intervalo de densidad del producto (Adaptado de Stark y col. 2010).

La figura 2 y sus conjeturas, son válidas únicamente como referencia. Cada fábrica de tableros, de acuerdo a las particularidades de sus procesos de producción, así como a las especies y adhesivos empleados en la configuración de sus productos, producirá materiales únicos, compuestos y reconstituidos de madera. En



consecuencia, los resultados de esta investigación se refieren tan solo a una muestra comercial de los materiales estudiados.

Antecedentes

Madera reconstituida

Los tableros enlistonados de madera, contrachapados y aglomerados de partículas, son considerados como madera reconstituida, de acuerdo con Smulski (1997) y Winandy y Kamke (2004).

Los tableros de madera, entre otros empleos, se utilizan como elementos estructurales que resisten cargas en la dirección transversal a su plano o superficie mayor, es decir se solicitan mecánicamente en flexión transversal al plano transversal-longitudinal de los tableros.

Información sobre procesos de manufactura de tableros de madera puede ser consultada entre otros autores en: Moslemi (1974), Maloney (1993) y Winandy y Kamke (2004). Igualmente, información sobre tecnología de madera reconstituida y de ingeniería puede ser consultada también en Smulski (1997), Stark y col. (2010) y Cai y Ross (2010).

Vibraciones transversales

Información sobre el empleo de técnicas de vibraciones transversales en la caracterización mecánica de tableros de madera, puede ser consultada en literatura que hace referencia principalmente a investigaciones y productos extranjeros. Entre otras referencias, se puede consultar a: Ross y Pellerin (1988) y Pellerin y Ross (2002).

En México, existen pocas publicaciones referentes al tema de investigación.



Sotomayor Castellanos (2003) demostró la anisotropía de los módulos de elasticidad determinados con vibraciones transversales ensayando tableros de partículas producidos en el Estado de Michoacán. Sus resultados experimentales indican que los tableros de partículas de madera investigados exhibieron un carácter anisotrópico en el módulo de elasticidad según las direcciones paralela y perpendicular a la línea de producción.

Sotomayor Castellanos y col. (2006) estudiaron la influencia del Perfil de densidad en las propiedades mecánicas y físicas de tableros de fibra de madera de media densidad utilizando métodos de evaluación normalizados y de carácter no destructivo. Los autores proponen, entre otras conclusiones, que la estructura interna de los tableros aglomerados, en este caso el perfil de densidad, repercute en la respuesta mecánica del material.

Sotomayor Castellanos y Metzger (2007), concluyen que el tipo de adhesivo empleado en tableros contrachapados elaborados en condiciones de laboratorio, influye de manera diferente según el esfuerzo al cual son sometidos los tableros. Para los esfuerzos de transmisión de ondas mecánicas, como los aplicados durante las pruebas de ultrasonido y de ondas de esfuerzo, la influencia es mínima. En contraste, para las pruebas donde los esfuerzos de vibración son transversales al plano de aplicación del adhesivo, como es el caso de las pruebas de vibraciones transversales, el tipo de adhesivo es un factor importante de variación. En el caso que nos ocupa, las 3 clases de tableros contienen diferentes tipos de adhesivos.

De los resultados de estas investigaciones, se desprende que es conveniente estudiar las propiedades mecánicas de los tableros desde dos perspectivas: sus direcciones paralela y perpendicular a la línea de producción. En este caso, se trata de 3 tipos de tableros cada uno de ellos con estructuras internas diferentes. Parece entonces interesante observar el comportamiento de cada uno de ellos y comparar su respuesta mecánica relacionándola con su estructura interna. Además, su estructura interior va desde los segmentos de madera sólida, en el caso de los



tableros enlistonados, hasta las partículas de madera, en el caso de los tableros aglomerados.

Problemática

De acuerdo a los resultados previos de Sotomayor Castellanos y col. (2011), la diferencia estructural de la madera reconstituida, modifica su densidad, su velocidad de onda y los parámetros derivados, entre otros, el módulo de elasticidad. Esta conclusión hace referencia a datos obtenidos con dos métodos de carácter no destructivo tales como el ultrasonido y las ondas de esfuerzo. En estas pruebas, las sollicitaciones en los tableros fueron unidireccionales y el esfuerzo principal al que estuvieron sometidas las probetas fue la transmisión de onda en una dirección preferencial.

Por otra parte, las vibraciones transversales provocadas por un impacto elástico al centro de la portada de la probeta posicionada sobre apoyos simples, inducen en ella una sollicitación compuesta por los esfuerzos de compresión, tensión y de cortante presentes en las secciones transversales de la probeta durante la deformación o flexión inducida por la oscilación de la probeta.

Continuando con el orden de ideas de los párrafos anteriores, cabe preguntar si el acomodo relativo de las partículas, chapas y listones que conforman las diferentes categorías de tableros, motivo de estudio, influye en su respuesta a la sollicitación de vibraciones transversales.

A partir de esta pregunta de investigación, se propone para el presente estudio, la siguiente hipótesis.

El acomodo relativo de las partículas, chapas y listones que conforman los tableros contrachapados, de partículas y enlistonados de madera, modifica su densidad, su



frecuencia de vibración y los parámetros derivados, entre otros, el módulo de elasticidad.

Objetivos

Con el objeto de verificar experimentalmente esta hipótesis, se proponen los siguientes objetivos de investigación.

Estudiar en tableros aglomerados, contrachapados y enlistonados de madera, los siguientes parámetros:

- Densidad
- Frecuencia de vibración
- Módulo de elasticidad

Materiales y métodos

Materiales

El material experimental consistió en tres tableros aglomerados, tres tableros contrachapados y tres tableros enlistonados, adquiridos en un establecimiento comercial especializado en venta de productos forestales, en la ciudad de Morelia, Michoacán.

De acuerdo a la información proporcionada por el establecimiento comercial, los tableros aglomerados son catalogados comercialmente como tableros estructurales compuestos por partículas mezcladas de madera de varias especies del género *Pinus*.

Igualmente, los tableros contrachapados son catalogados comercialmente como tableros estructurales contrachapados con siete capas de madera del género *Pinus*.



Los tableros enlistonados están armados por listones de madera del género *Pinus*, de sección cuadrada de 15 mm de arista y recubiertos en sus dos caras con chapas de madera de cedro (*Cedrela* spp.), de acuerdo a la información proporcionada por el establecimiento comercial.

Los diagramas del espesor y de la estructura interna de los tres tipos de tableros estudiados se presentan en la Figura 3. Las dimensiones de los tableros y de las probetas se muestran en la Tabla 1.

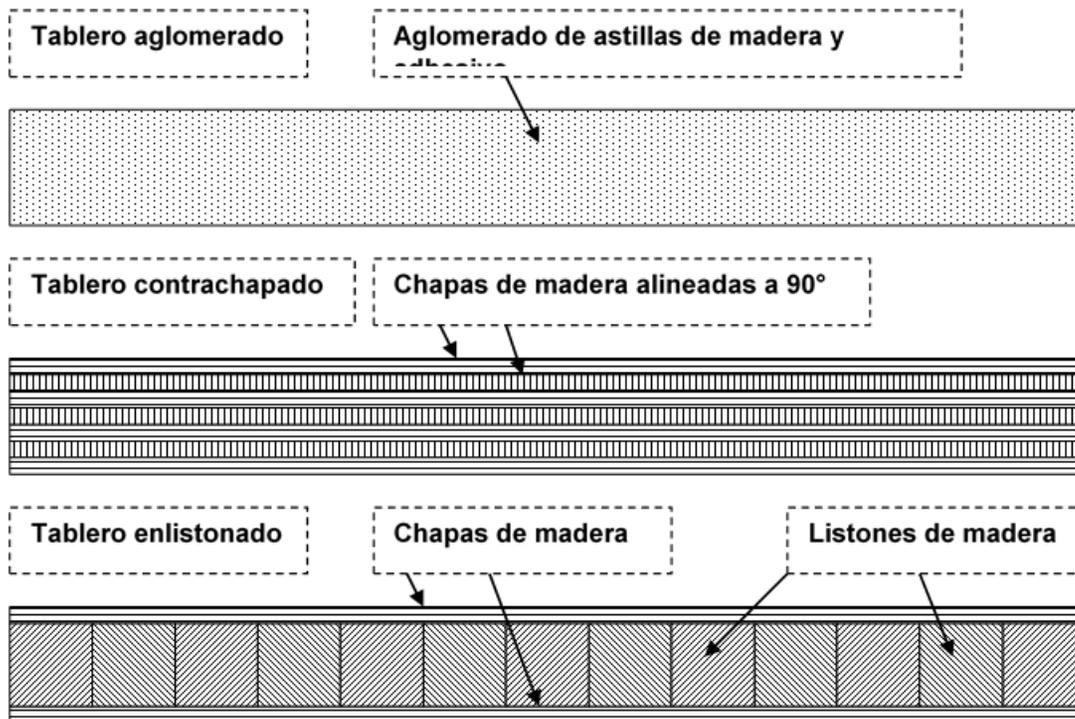


Figura 3. Diagramas del espesor y de la estructura interna de los tableros.



Tabla 1. Dimensiones de los tableros y de las probetas.

Material	Número de tableros	Dimensiones de los tableros			Número de Probetas	Dimensiones de las probetas		
		Ancho (m)	Largo (m)	Espesor (m)		Ancho (m)	Largo (m)	Espesor (m)
Tableros aglomerados	3	1.22	2.44	0.018	33	Recortadas en la dirección paralela al largo del tablero		
						0.100	1.216	0.018
					33	Recortadas en la dirección perpendicular al largo del tablero		
						0.100	1.220	0.018
Total				66				
Tableros contrachapados Número de capas: 7	3	1.22	2.44	0.018	33	Recortadas en la dirección paralela al largo del tablero		
						0.100	1.216	0.018
					33	Recortadas en la dirección perpendicular al largo del tablero		
						0.100	1.220	0.018
Total				66				
Tableros enlistonados	3	1.22	2.44	0.019	33	Recortadas en la dirección paralela al largo del tablero		
						0.100	1.216	0.019
					33	Recortadas en la dirección perpendicular al largo del tablero		
						0.100	1.220	0.019
Total				66				

Métodos

La metodología general de la investigación se presenta en la Figura 4. Las pruebas de vibraciones transversales se realizaron en las probetas correspondientes a cada tipo de tableros y a su orientación con respecto a la dirección paralela (longitudinal) al largo del tablero. Los valores promedio de los resultados por categoría y por



orientación fueron utilizados en el análisis. A continuación, se describen cada uno de las etapas de la metodología.

Acondicionamiento y preparación de probetas

Los nueve tableros fueron marcados y recortados de acuerdo al diagrama presentado en la Figura 5. De esta forma, de cada tablero se obtuvieron once probetas recortadas en la dirección paralela al largo del tablero y once probetas recortadas en la dirección perpendicular al largo del tablero, dando un total de 66 probetas por categoría de tablero.

Una vez recortadas las probetas, estas se acondicionaron durante 60 días en el laboratorio en condiciones de temperatura (T) de 20 °C y 65 % de humedad relativa (HR).

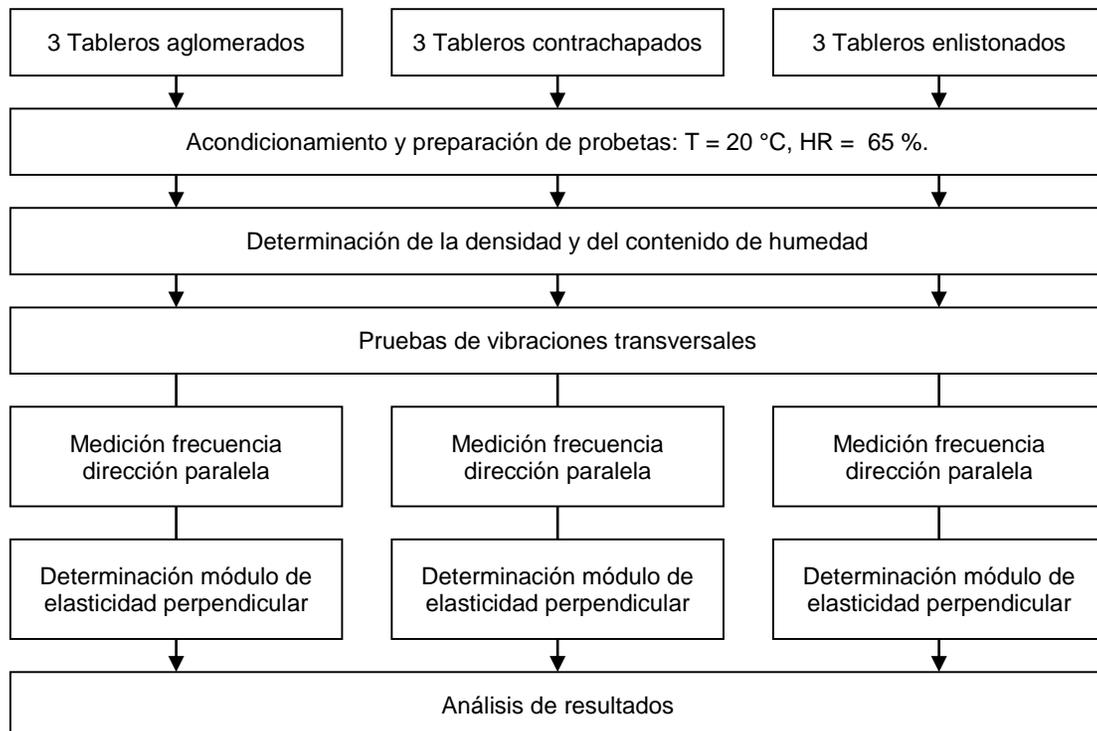


Figura 4. Metodología.



Pruebas de vibraciones transversales

Las pruebas de vibraciones transversales (vt) consisten en medir la frecuencia natural de vibración transversal a la dirección longitudinal de las probetas. Para tal fin se utilizó el aparato *Grindosonic*® (Lemmens, s/f) como medidor de frecuencias, tal como se muestra en la Figura 6, que presenta fotografías del dispositivo y del modo de operación. En el mismo contexto, la Figura 7, presenta un esquema del ensayo de vibraciones transversales y el diagrama de cuerpo libre de una probeta.

La ecuación de movimiento de la probeta presentada en la figura 5 fue derivada por Timoshenko y col. (1994) y viene dada por:

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - \left(m r^2 + \frac{EI m}{KAG} \right) \frac{\partial^4 y}{\partial x^2 \partial t^2} + \frac{m^2 r^2}{KAG} \frac{\partial^4 y}{\partial t^4} = 0 \quad (3)$$

Donde:

E = Módulo de Elasticidad de la probeta (Pa).

I = Momento de inercia de la sección transversal de la probeta (m⁴).

m = Masa por unidad de longitud de la probeta (kg/m).

A = Área de la sección transversal de la probeta (m²).

G = Módulo de rigidez de la probeta (Pa).

y = Desplazamiento en la dirección transversal de la probeta (m).

x = Distancia en la dirección longitudinal de la probeta (m).

t = Tiempo (s).

K = Factor de forma en cortante (0.833 para probetas prismáticas).

r = Radio de giro de la sección transversal de la probeta (m²).

Con: $r = \sqrt{I/A}$

En la ecuación de movimiento de la probeta, el primer término de la izquierda está ligado a la rigidez de la probeta, el segundo a la inercia de su movimiento, el tercer



término representa el efecto de la inercia de rotación de la sección transversal del tablero y el cuarto significa el efecto del esfuerzo cortante interno.



Figura 6. Detalles de las pruebas de vibraciones transversales.

Una solución numérica de la ecuación de movimiento para el caso de una probeta de sección rectangular, apoyada sobre soportes rígidos de tipo simple como en este estudio, fue presentada por Goens (1931) y ha sido aplicada en estudios con madera por Hearmon (1966), Görlacher (1984), Chui y Smith (1990), Perstorper (1992 y 1993) y Machek y col. (2001a y 2001b). Esta fórmula fue utilizada en la investigación para la determinación del Módulo de Elasticidad en vibraciones transversales y viene dada por:

$$E_{vt} = \frac{4 \pi^2 l_{vt}^4 f^2 \rho}{m^4 r^2} \left(1 + \frac{r^2}{L_{vt}^2} K \right) \quad (4)$$



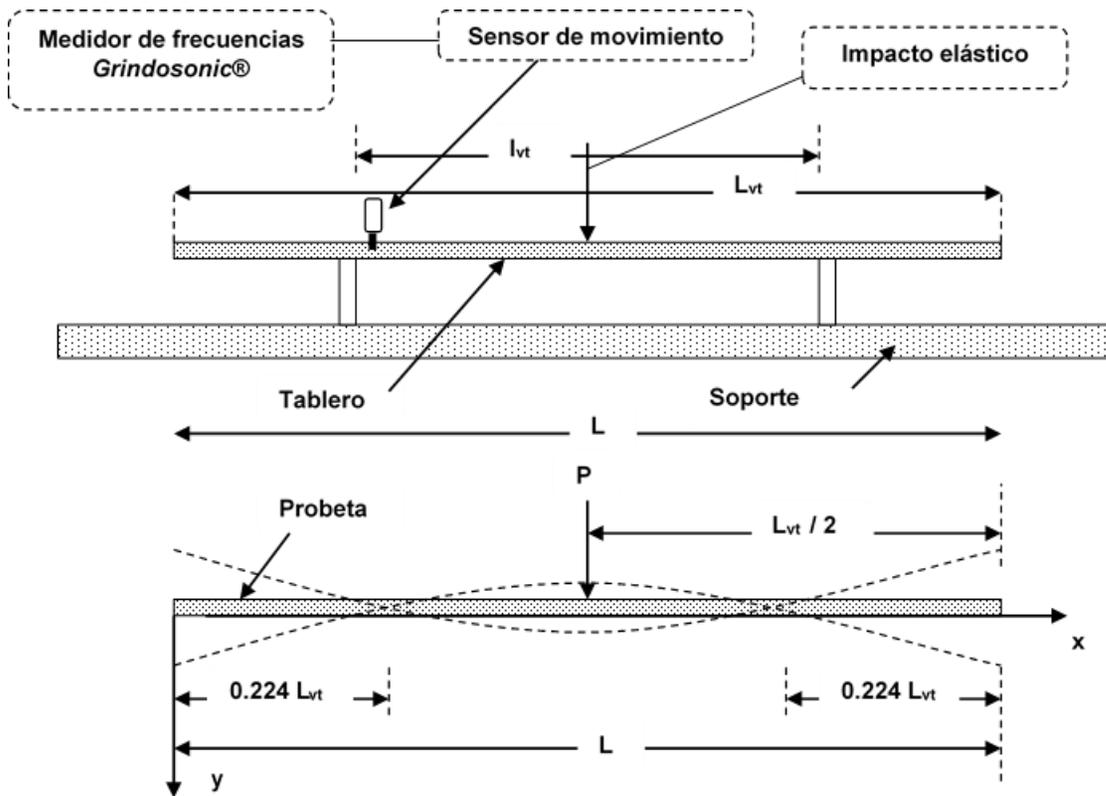


Figura 7. Prueba de vibraciones transversales.

Donde:

E_{vt} = Módulo de elasticidad en vibraciones transversales (Pa).

l_{vt} = Largo de la portada entre apoyos (m).

L_{vt} = Largo de la probeta (m).

f = Frecuencia natural de la probeta (Hz).

ρ = Densidad de la probeta (kg/m^3).

m, K = Constantes (12.65, 49.48 adimensionales).

r = Radio de giro de la sección transversal de la probeta (m^2)

Con: $r = \sqrt{I/A}$



Resultados y análisis

Los resultados de las pruebas realizadas se presentan en la Tabla 2. Los estadísticos ahí mostrados son: media aritmética (\bar{x}), desviación estándar ($\bar{\mu}$) y coeficiente de variación (C.V.). Los datos están reunidos según las tres categorías de tableros estudiados, cada una de las cuales está dividida en tres conjuntos de probetas: probetas recortadas en la dirección perpendicular, probetas recortadas en la dirección longitudinal y el conjunto de todas las probetas (direcciones transversal y longitudinal). Los parámetros estudiados son: densidad (kg/m^3), frecuencia (Hz), módulo de elasticidad (MPa). Además se presenta el valor promedio del contenido de humedad (C.H.) en cada categoría de tableros estudiados.

La madera sólida aserrada de troncos de árboles se distingue por poseer una variación natural en sus características físicas. Esta propiedad no implica necesariamente un detrimento en su calidad tecnológica. Sin embargo, el Ingeniero en Tecnología de la Madera, demanda materiales con propiedades mecánicas homogéneas para fines de cálculo y diseño. Una premisa de calidad de la madera reconstituida es la uniformidad significativa en sus características físicas, en comparación y como ventaja con las propiedades físicas y equivalentes de la madera, a partir de la cual se procesa.

Sin embargo, los materiales compuestos de madera, como es el caso de los tableros aquí estudiados, pueden además variar en sus características tecnológicas debido a los diferentes tipos y tecnologías de producción y a un deficiente control en la calidad de los productos finales. Como consecuencia, los resultados presentados en la Tabla 2, que representan valores promedio de los parámetros estudiados, en las tres categorías de tableros de madera, son representativos únicamente de la muestra de material observada en esta investigación.



La Tabla 2 presenta además la desviación estándar de los valores medios y el coeficiente de variación que se observó durante la etapa experimental. Estos estadígrafos permiten una mejor visualización y análisis de los resultados.

Tabla 2. Resultados de las pruebas de vibraciones transversales.

Parámetro	Estadístico	Categoría de tablero		
		Aglomerado	Contrachapado	Enlistonado
Probetas recortadas en la dirección transversal				
Densidad (kg/m ³)	\bar{x}	628	532	466
	$\bar{\mu}$	1.96	9.06	10.3
	C.V.	0.003	0.02	0.02
Frecuencia (Hz)	\bar{x}	688	585	572
	$\bar{\mu}$	6.52	124.69	158.45
	C.V.	0.01	0.21	0.28
Módulo de elasticidad (MPa)	\bar{x}	3503	2238	1721
	$\bar{\mu}$	66.9	887.9	951.7
	C.V.	0.02	0.40	0.55
Parámetro	Estadístico	Categoría de tablero		
		Aglomerado	Contrachapado	Enlistonado
Probetas recortadas en la dirección longitudinal				
Densidad (kg/m ³)	\bar{x}	629	532	463
	$\bar{\mu}$	7.10	14.67	15.32
	C.V.	0.01	0.03	0.03
Frecuencia (Hz)	\bar{x}	705	359	560
	$\bar{\mu}$	9.64	145.25	124.86
	C.V.	0.01	0.40	0.22
Módulo de elasticidad (MPa)	\bar{x}	3682	930	1612
	$\bar{\mu}$	134.5	803.6	611.7
	C.V.	0.04	0.86	0.38
Parámetro	Estadístico	Categoría de tablero		
		Aglomerado	Contrachapado	Enlistonado
Direcciones transversal y longitudinal (todas las probetas)				
Densidad (kg/m ³)	\bar{x}	629	532	464
	$\bar{\mu}$	5.22	12.100	12.999
	C.V.	0.01	0.02	0.03
Frecuencia (Hz)	\bar{x}	696	472	566
	$\bar{\mu}$	11.64	176.06	141.67
	C.V.	0.02	0.37	0.25
Módulo de elasticidad (MPa)	\bar{x}	3592	1584	1667
	$\bar{\mu}$	138.7	1067.8	795.7
	C.V.	0.04	0.67	0.48
Contenido de Humedad (%)	\bar{x}	6.38	8.31	7.92
	$\bar{\mu}$	0.19	0.18	0.20
	C.V.	3.03	2.13	2.56



Densidad

La densidad de los tableros aglomerados fue 18% mayor que la densidad correspondiente a los tableros contrachapados y de 35.5% mayor respecto al valor promedio de los tableros enlistonados. Por su parte, el valor promedio de la densidad de los tableros contrachapados resultó ser 14.6% mayor respecto al valor promedio de la densidad de los tableros enlistonados.

La densidad de los tableros aglomerados representa la parte proporcional de la madera, de adhesivo y contenido de humedad en el material. De acuerdo con Stark y col. (2010), la masa de la madera en un tablero aglomerado representa en promedio el 50% del total del tablero, el adhesivo equivale a un 40% y la masa de agua a un 10%.

Esta combinación, asociada a la densidad propia de cada componente del material, resulta en valores demasiado altos de densidad de los tableros, respecto a la densidad de la madera del género *Pinus*, que es el género que representa a las diferentes especies de madera de las cuales están constituidos los tableros. El otro componente es el adhesivo. El valor de los tableros aglomerados denota en consecuencia, la influencia de la densidad de la resina empleada como aglutinante de las partículas de madera.

Por su parte, la densidad de los tableros contrachapados representa la densidad de la madera y la de los revestimientos de adhesivo que aglutinan las diferentes capas de madera. La proporción de adhesivo en el tablero puede explicar el incremento respecto al valor promedio de la madera del género del que están constituidos los tableros, en nuestro caso, de madera de *Pinus*. De esta forma, se puede adelantar que un tablero contrachapado tiene una densidad aparente mayor a la de la madera de la cual está constituida.



La densidad de los tableros enlistonados es más representativa de la densidad de la madera de *Pinus*, de la cual están constituidos mayoritariamente estos tableros, y en consecuencia, sus valores de densidad fueron menores respecto a los de las otras categorías de tableros estudiadas.

Estos resultados no indican necesariamente que la calidad de un tablero de madera está forzosamente asociada a su calidad. Usos específicos requieren mucho peso por unidad de volumen, pero otros empleos precisan de densidad baja para su correcta utilización.

En este mismo tenor, para fines de ingeniería, es más importante la uniformidad en los valores de densidad de los tableros. La proporción del coeficiente de variación de los valores de la densidad de los tableros aglomerados, contrachapados y enlistonados fue de 1:2:3 respectivamente.

Desde esta misma perspectiva, las Figuras 8, 9 y 10, presentan el perfil de densidad en las direcciones perpendicular y longitudinal con respecto a lo largo de los tableros estudiados.

De la observación de la Figura 8, se intuye que los valores de la densidad local a lo largo de los tableros aglomerados, es relativamente constante. En cambio, los valores calculados en las probetas en la dirección paralela variaron notoriamente cerca de los extremos de los tableros. Estos perfiles denotan una desigualdad en la homogeneidad en la densidad de los tableros respecto al plano perpendicular-longitudinal. Si bien a lo largo los tableros son uniformes, a lo ancho son heterogéneos.

Características asociadas al perfil de densidad en el espesor del tablero, deficiencias en la operación de prensado y posible variación en el contenido de humedad cerca de los extremos, pudieran explicar estas alteraciones.



Respecto al mismo fenómeno pero en los tableros contrachapadas y enlistonados, las Figuras 9 y 10 muestran tendencias de variación indistintas entre las dos direcciones de observación y para las dos categorías de tableros. El acomodo entrecruzado de las chapas de madera y el armado de listones de madera, permiten suponer una distribución de densidad local uniforme en estas dos categorías de tableros.



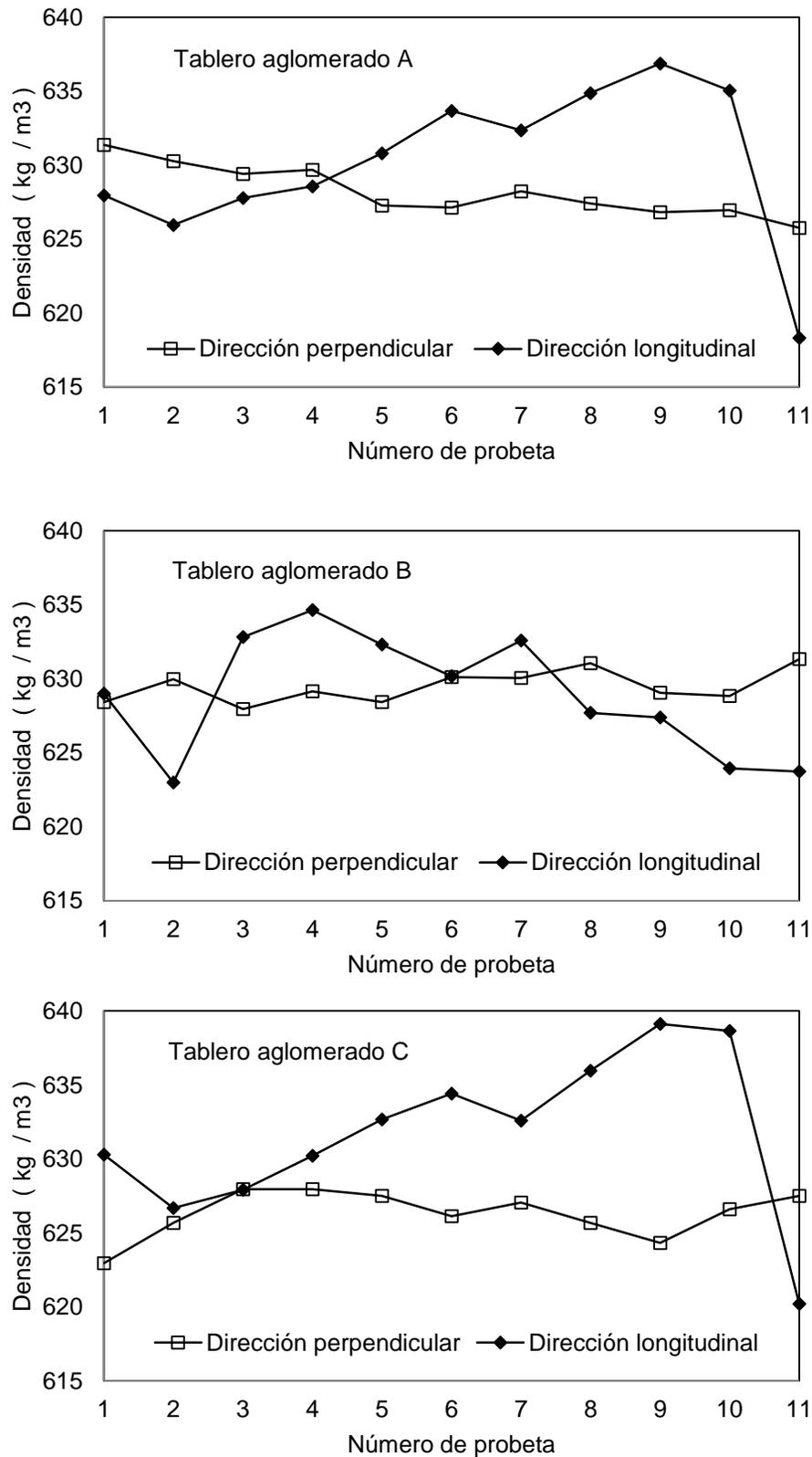


Figura 8. Perfiles de densidad de los tableros aglomerados.



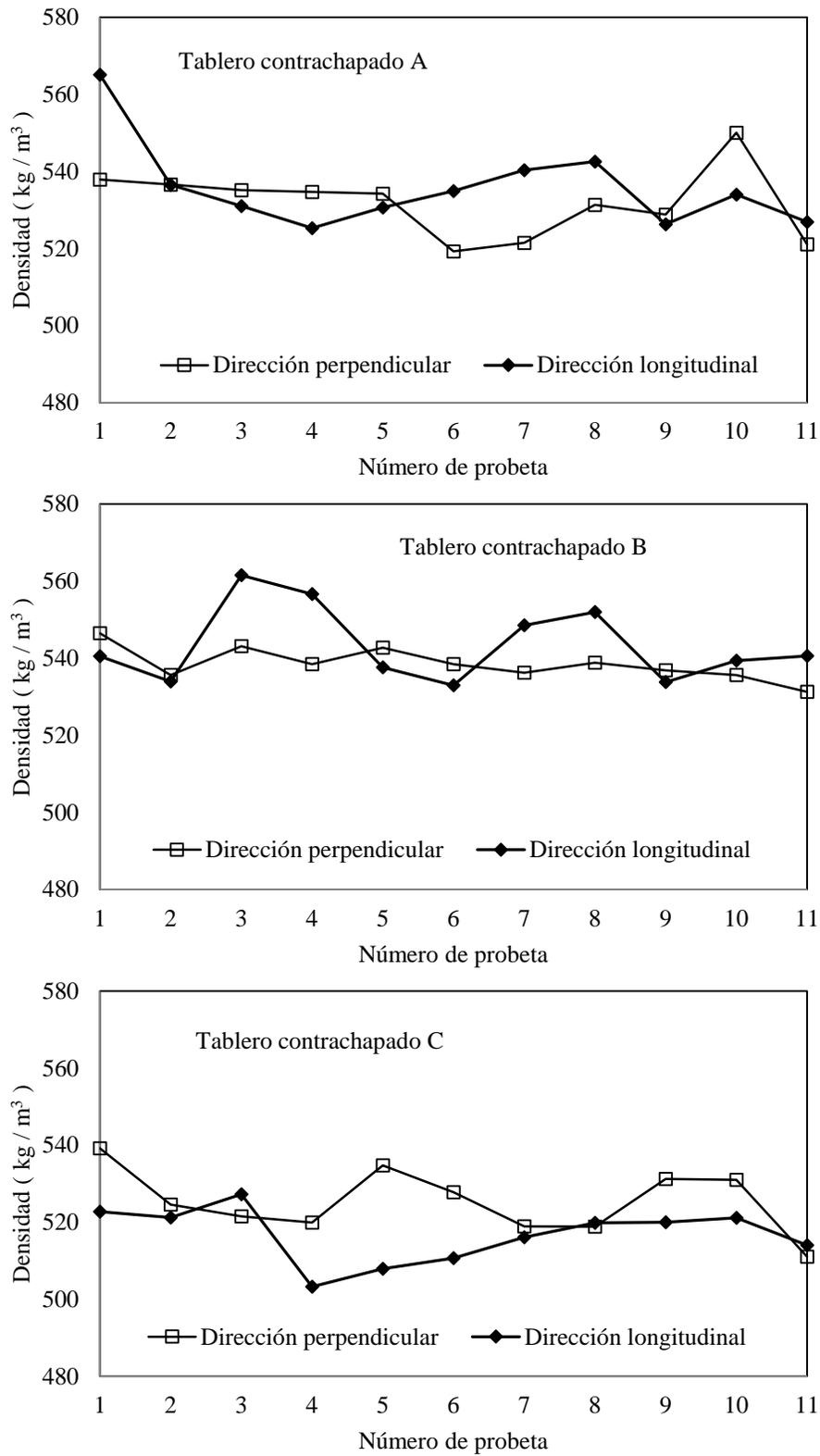


Figura 9. Perfiles de densidad de los tableros contrachapados.



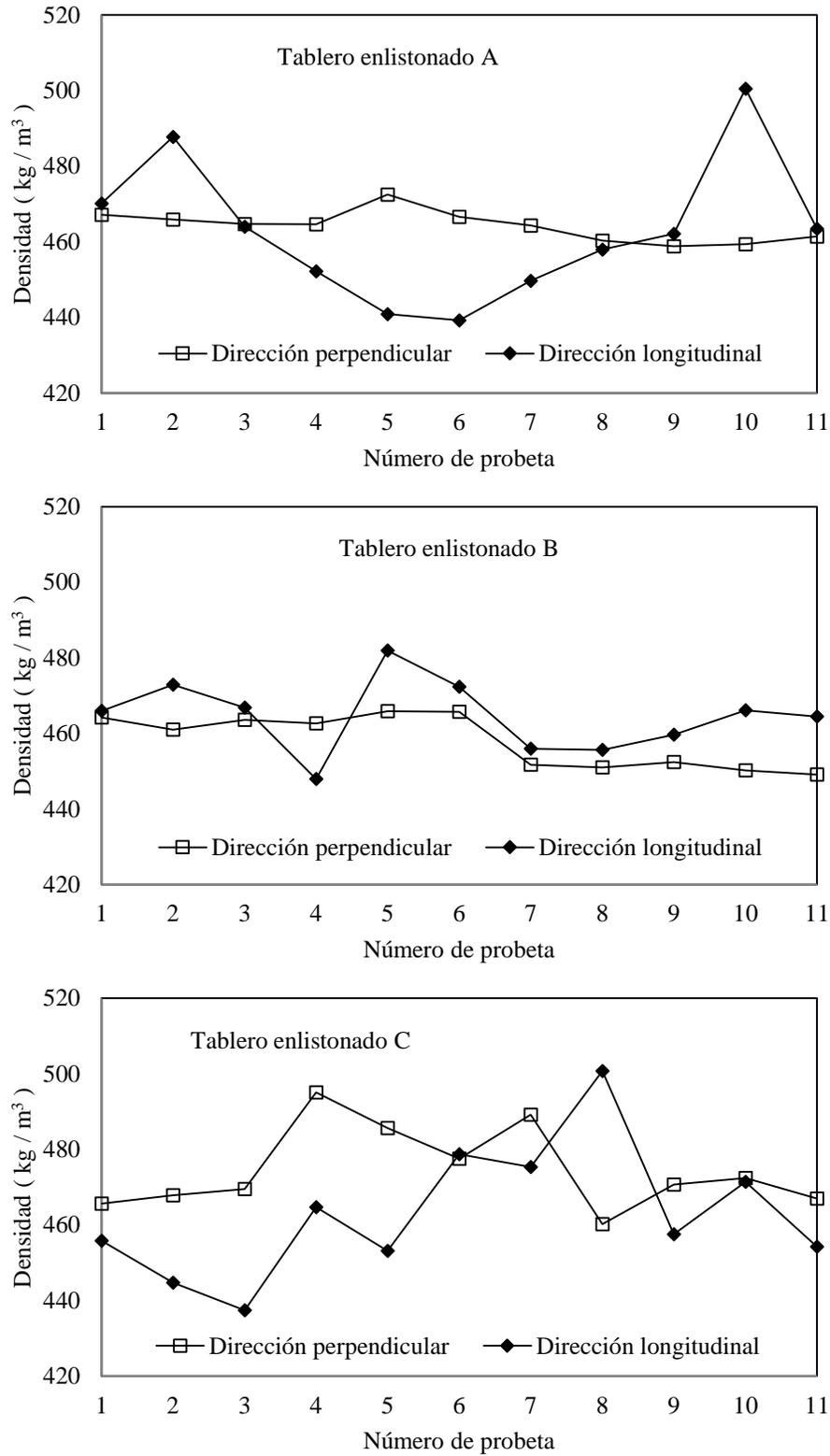


Figura 10. Perfiles de densidad de los tableros enlistonados.



Contenido de humedad

De acuerdo a los resultados presentados en la Tabla 2, el contenido de humedad en los tableros se considera distribuido de manera uniforme en el plano perpendicular-longitudinal de los tableros, lo que permite considerar a esta variable sin influencia significativa en los parámetros estudiados.

Frecuencias

De acuerdo a la Tabla 2, los valores promedios de las frecuencias de las tres categorías de tableros no presentan relaciones entre las frecuencias medidas y el tipo de tablero o la orientación de la probeta. Si bien los tableros aglomerados tienen densidades y frecuencias mayores que las otras dos categorías de tableros, no se distinguió una correspondencia del tipo «mayor densidad-mayor frecuencia».

La Figura 11, ilustra este resultado. Además, esta figura compara las frecuencias con las velocidades de ultrasonido obtenidas con el mismo material estudiado en una investigación anterior (Sotomayor Castellanos y col., 2011), de donde se desprende también que no existe una relación del tipo «mayor densidad-mayor velocidad del ultrasonido»



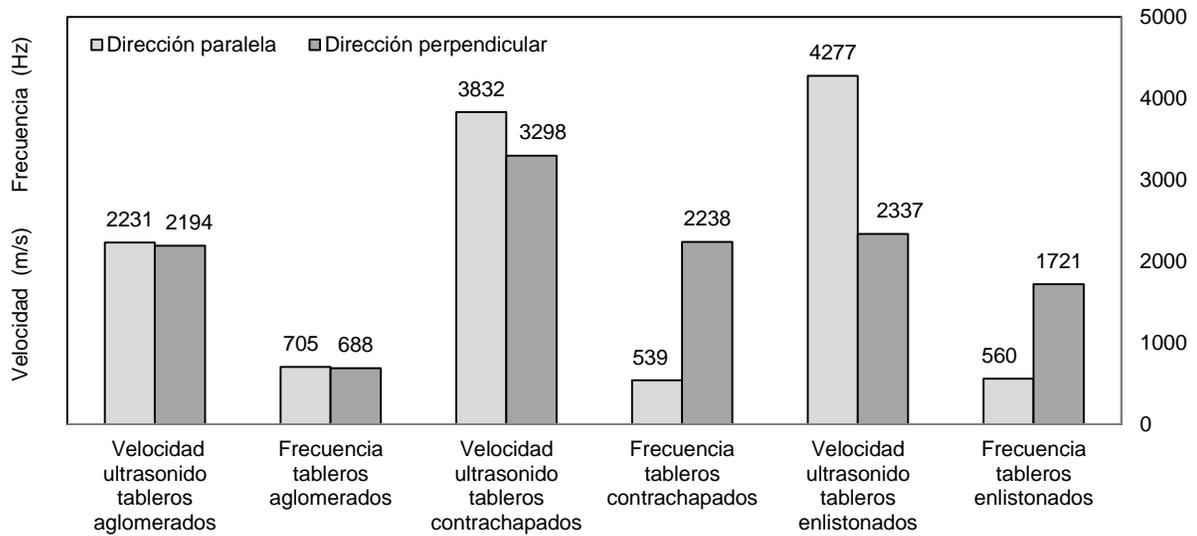


Figura 11. Comparación entre velocidades del ultrasonido y frecuencias en vibraciones transversales.

Durante las experiencias se advirtió que las mediciones de las frecuencias variaban notoriamente cuando la probeta mostraba alguna anomalía, por ejemplo, chapas discontinuas o despegado en el armado de los contrachapados, y para el caso de los tableros enlistonados, una separación entre sí de los listones o con las chapas que los recubren. De esta forma no se obtuvieron mediciones repetitivas en una misma probeta. Como resultado, la variación de los valores de las mediciones entre probetas y categorías de tableros fue evidente (ver Figuras 13 y 14).

Por el contrario, para el caso de los tableros aglomerados, las mediciones fueron muy repetitivas (ver Figura 12). Este punto se puede ejemplificar con los resultados de los coeficientes de variación de los valores de las frecuencias, especialmente en los tableros contrachapados y enlistonados.



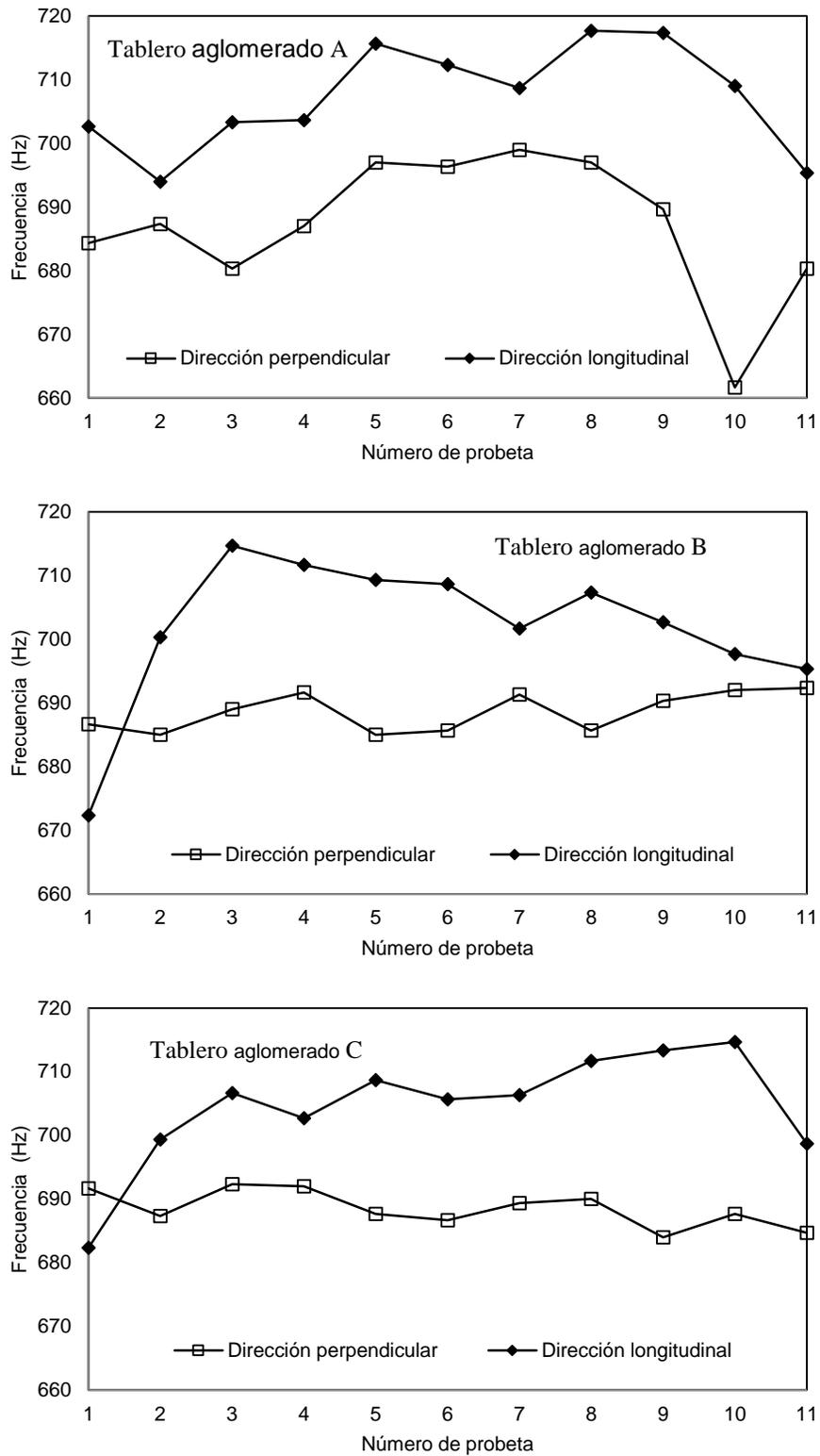


Figura 12. Perfiles de frecuencias de los tableros aglomerados.



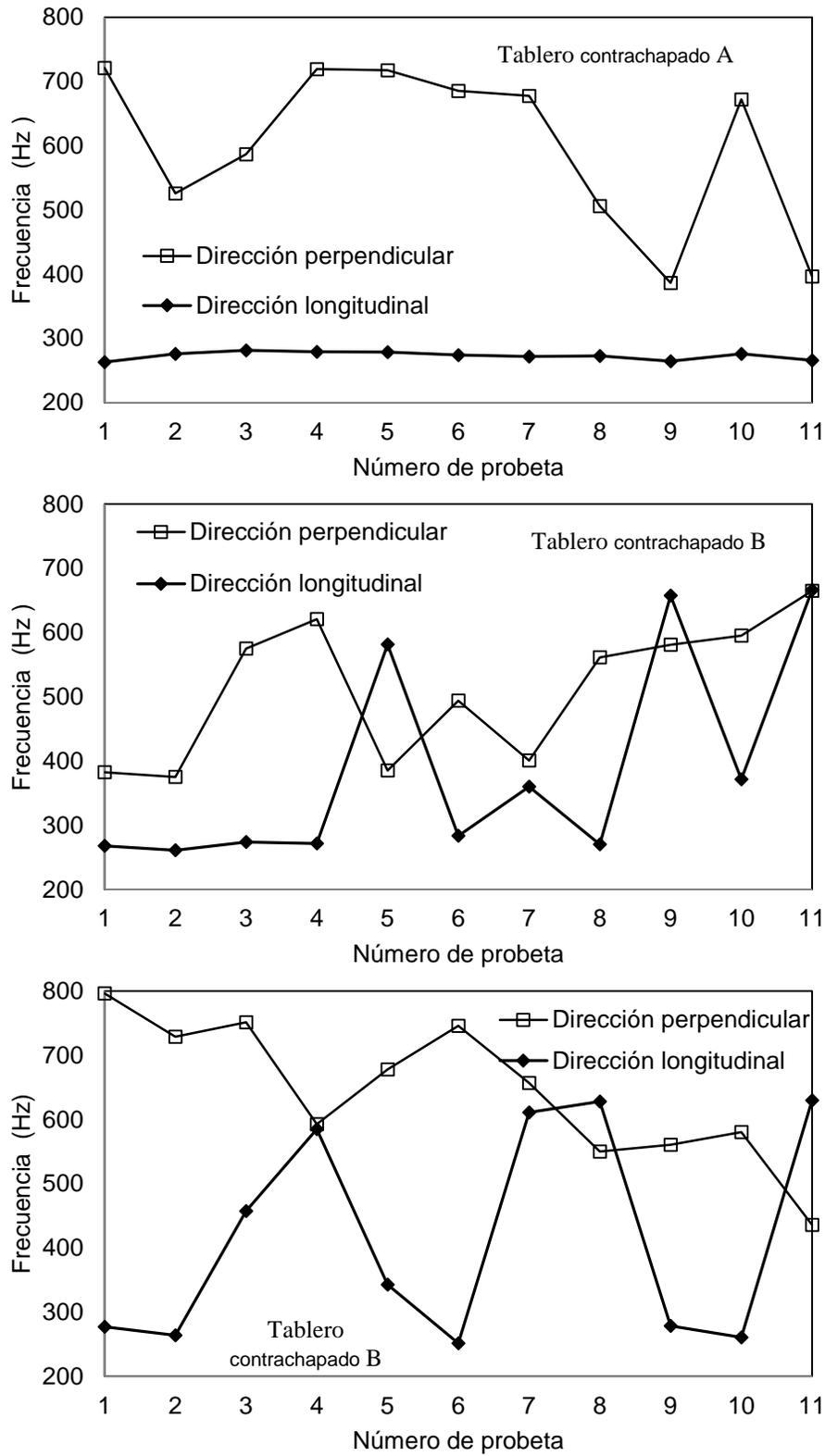


Figura 13. Perfiles de frecuencias de los tableros contrachapados.



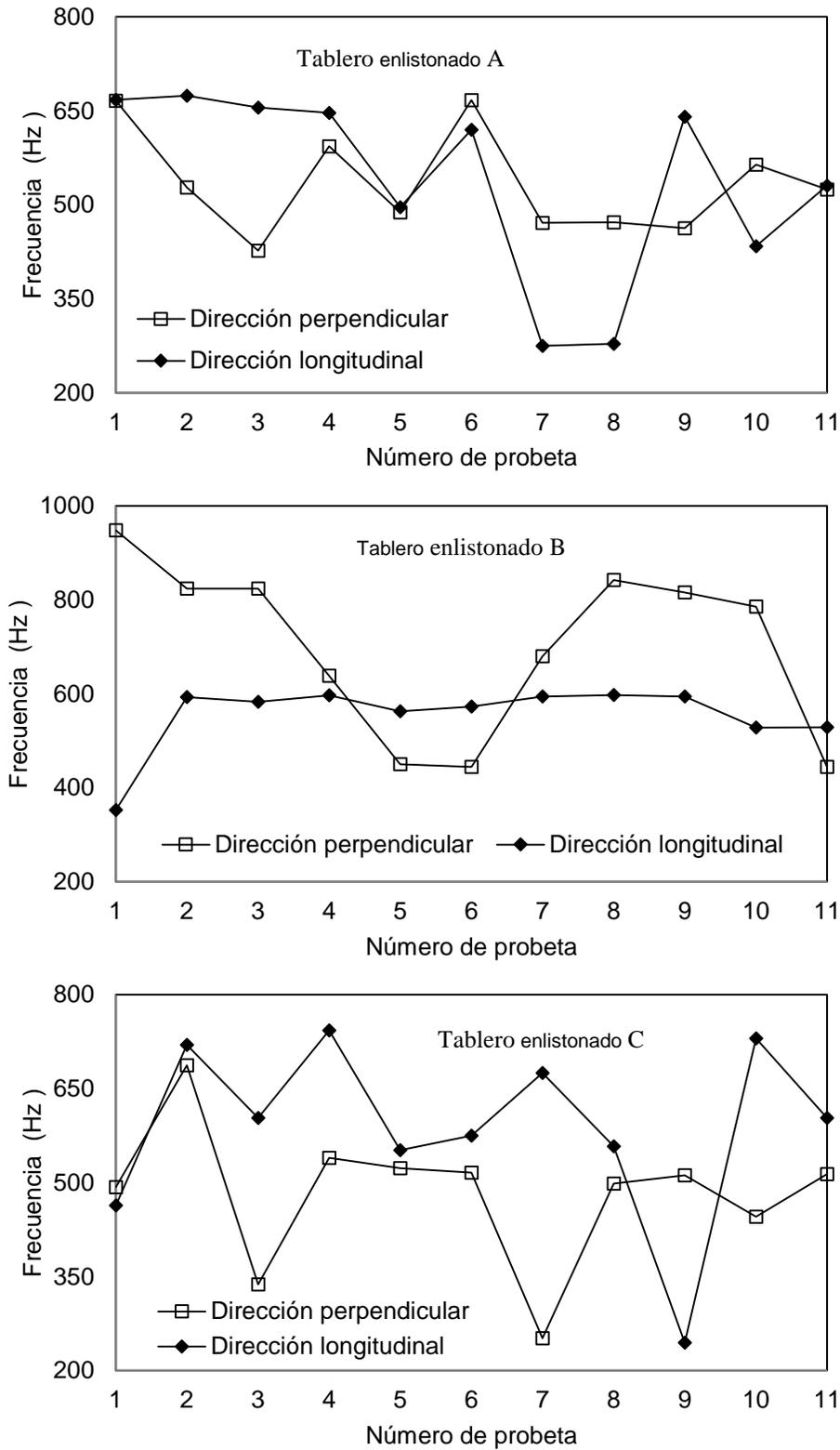


Figura 14. Perfiles de frecuencias de los tableros enlistonados.



Módulos de elasticidad

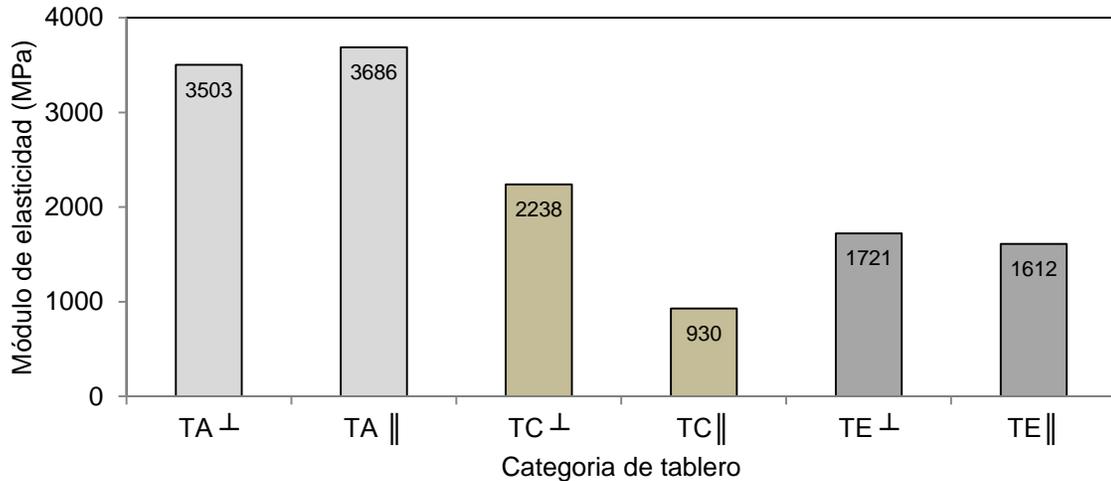
Los tableros aglomerados se caracterizaron por tener los valores más altos de sus módulos de elasticidad en comparación con los valores determinados para los tableros contrachapados y enlistonados (ver Tabla 2 y Figura 15). Este resultado es explícito para las dos direcciones observadas de los tableros. Sin embargo, los resultados de las distintas direcciones de recorte de probetas en los tableros contrachapados, presentaron una diferencia notable.

En el mismo orden de ideas, el coeficiente de variación de los tableros enlistonados fue mínimo. En contraste la variación en los valores de los módulos de elasticidad de los tableros contrachapados y enlistonados fue importante. Este resultado parece ser el efecto de la variación en la densidad y en la frecuencia, ambos parámetros medidos directamente en las probetas, a partir de los cuales se calcularon los módulos de elasticidad. Los módulos de elasticidad, en tanto que son características de segundo orden, es decir, calculadas a partir de parámetros medidos directamente en el material experimental, acumulan la variabilidad encontrada en los datos de base, en este caso, la densidad y la frecuencia.

Para fines de análisis, se efectuaron pruebas *t* de *Student* de diferencias de medias entre los valores de los módulos de elasticidad de las 3 categorías de tableros estudiados. Para un nivel de confianza del 95%, la hipótesis nula fue: $H_0: \bar{x}_P - \bar{x}_L = 0$, y la hipótesis alternativa se propuso como: $H_1: \bar{x}_P - \bar{x}_L \neq 0$. Estos datos se presentan en la Tabla 3, donde \bar{x}_P es el valor de la media estadística de los módulos de elasticidad determinados en las probetas recortadas en la dirección perpendicular y \bar{x}_L es el valor de la media estadística de los módulos de elasticidad determinados en las probetas recortadas en la dirección paralela al sentido longitudinal del tablero. Para el caso de la comparación entre los promedios de los valores agrupados de las direcciones transversal y longitudinal de cada categoría de tableros, en la Tabla 3 se proponen para un nivel de confianza del 95%, la hipótesis nula: $H_0: \bar{x}_A - \bar{x}_B = 0$,



y la hipótesis alternativa: $H_1: \bar{x}_A - \bar{x}_B \neq 0$. Donde los sufijos A y B se refieren a las tres categorías de tableros estudiados: aglomerados, contrachapados y enlistonados.



TA: Tableros aglomerados.

TC: Tableros contrachapados.

TE: Tableros enlistonados.

⊥ : Dirección perpendicular.

|| : Dirección paralela.

Figura 15. Módulos de elasticidad en vibraciones transversales.

Del análisis de la Tabla 3, se concluye que, para el caso de los tableros aglomerados y contrachapados existe una diferencia estadísticamente significativa entre los valores de los módulos de elasticidad medidos según la orientación de las probetas en el plano transversal-longitudinal de los tableros.

Para el caso de los tableros aglomerados, este resultado coincide con las conclusiones anteriores de Sotomayor Castellanos (2003), en el sentido de que experimentalmente los tableros aglomerados exhiben un carácter anisotrópico en el módulo de elasticidad según las direcciones paralela y transversal a la línea de producción.

Para el caso de los tableros enlistonados, no existe una diferencia significativa entre los valores de los módulos de elasticidad medidos según la orientación de las probetas.



Tabla 3. Resultados de las pruebas *t* de Student de diferencias de medias de valores de módulos de elasticidad.

Media de probetas de tableros		Media de probetas de tableros	Hipótesis		Dif. Sig.*
			$H_0: \bar{x}_P - \bar{x}_L = 0$	$H_1: \bar{x}_P - \bar{x}_L \neq 0$	
Dirección perpendicular		Dirección longitudinal			
Aglomerados	vs	Aglomerados	Rechazada	Aceptada	Si
Contrachapados	vs	Contrachapados	Rechazada	Aceptada	Si
Enlistonados	vs	Enlistonados	Aceptada	Rechazada	No
Direcciones transversal y longitudinal			$H_0: \bar{x}_A - \bar{x}_B = 0$	$H_1: \bar{x}_A - \bar{x}_B \neq 0$	
Aglomerados	vs	Contrachapados	Rechazada	Aceptada	Si
Aglomerados	vs	Enlistonados	Rechazada	Aceptada	Si
Contrachapados	vs	Enlistonados	Aceptada	Rechazada	No

* Nivel de confianza del 95%.

Para mejor visualizar las diferencias entre los resultados presentados en la Figura 15, el análisis de la Tabla 3 demuestra que, los valores de los módulos de elasticidad determinados por vibraciones transversales entre los tableros aglomerados y los tableros contrachapados y enlistonados no son diferentes estadísticamente.

Finalmente, el presente estudio empleando vibraciones transversales es continuación de la investigación efectuada por Sotomayor Castellanos y col. (2011). En ambos trabajos se estudió el mismo material experimental y solo variaron las técnicas de medición. En el trabajo de Sotomayor Castellanos y col. (2011), se emplearon el ultrasonido y las ondas de esfuerzo. Las solicitaciones y mediciones del tiempo de transmisión de onda fueron en la dirección longitudinal de las probetas. En cambio, la solicitación en esta investigación fue en el sentido transversal de las probetas.



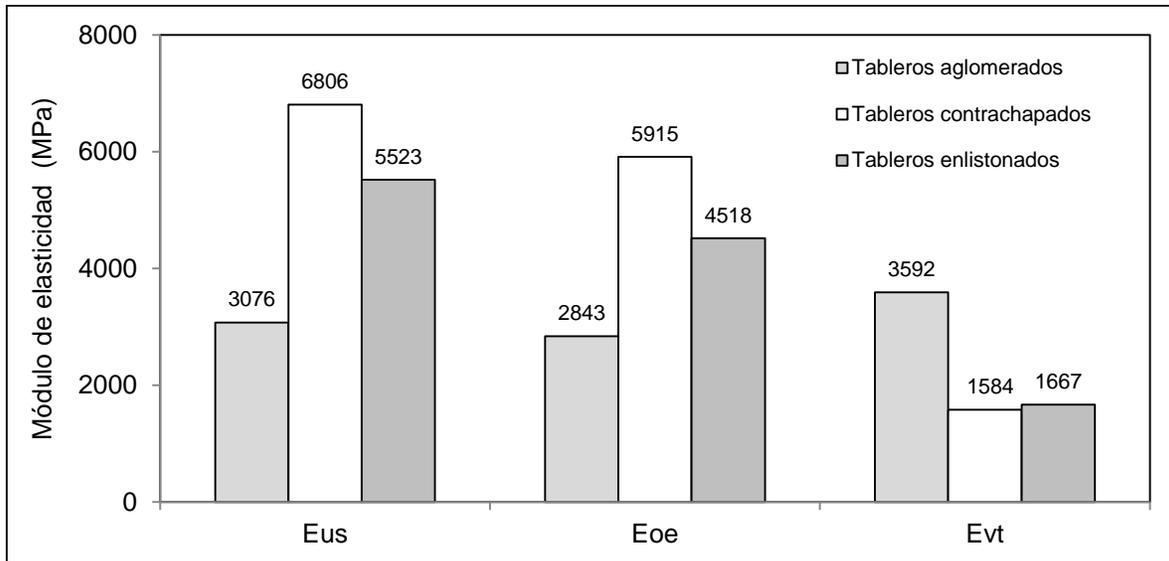


Figura 16. Comparación de valores de módulo de elasticidad de acuerdo a diferentes tipos de pruebas no destructivas. Eu: Módulo de elasticidad por ultrasonido. Eoe: Módulo de elasticidad por ondas de esfuerzo. Evt: Módulo de elasticidad en vibraciones transversales.

Las diferentes sollicitaciones de las técnicas empleadas, no proporcionan datos comparables sobre las características elásticas de las tres categorías de tableros estudiados. Sin embargo, a manera de síntesis, se presenta la Figura 16, donde se comparan los valores promedio de todas las probetas, para los tres tipos de tableros estudiados con diferentes técnicas.

Los tableros contrachapados presentan los más altos valores promedio de módulos de elasticidad, determinados en pruebas de ultrasonido y ondas de esfuerzo. Un hecho particular es para el caso de las vibraciones transversales, el valor correspondiente al módulo de elasticidad mostrado en la Figura 3, representa el promedio de las probetas en las direcciones perpendicular y paralela de los tableros. Si se grafica el valor promedio del módulo de elasticidad en la dirección transversal (2238 MPa, ver Tabla 2 y Figura 15), la proporción relativa para las tres técnicas es similar para las tres tipos de tableros.



Esta excepción denota que las probetas ensayadas en la dirección transversal de los tableros contrachapados son más rígidas que las correspondientes a la dirección paralela (930 MPa, ver Tabla 2 y Figura 15). Dado que los contrachapados tienen un armado de chapas que uniformizan las propiedades del material a lo largo de los tableros, este resultado es difícil de interpretar.

Desde otra perspectiva, en esta investigación los módulos de elasticidad fueron determinados a partir de valores particulares a cada probeta, cada una de las cuales representa solo un segmento o fracción de un tablero. En consecuencia, estos resultados significan solo valores locales de cada tablero, no la respuesta completa de toda su superficie. En la práctica, es el tablero en su totalidad el que funciona como elemento estructural.

Este argumento sugiere que para mejorar la caracterización de los tableros de madera, es recomendable realizar ensayos con probetas de tamaño real, es decir pruebas en las cuales los tableros en sus dimensiones de empleo sean utilizados como probetas.

Sin embargo, la metodología aplicada en esta investigación, puede ser útil para desarrollar sistemas de control de calidad en lo referente a la uniformidad de las características físicas en la producción de tableros 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.



Conclusiones

Las pruebas de vibraciones transversales realizadas en tableros enlistonados, contrachapados y aglomerados, resultaron útiles para la caracterización mecánica de estas maderas reconstituidas.

Cada tipo de tablero presentó características físicas y mecánicas propias y relacionadas preferentemente con la dirección relativa al plano del tablero de que se trate. Estas diferencias pueden ser atribuidas entre otros factores, a la estructura interna de los tableros, independientemente de su especie, proceso de elaboración y/o calidad del agente aglutinante. Para fines de Diseño y Cálculo estructural, es recomendable considerar la orientación en la cual el elemento en cuestión trabajará en condiciones de servicio.

Referencias

Cai, Z.; Ross, R.J. 2010. Wood Handbook, Chapter 12: Mechanical Properties of Wood-Based Composite Materials. General Technical Report FPL-GTR-190. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. USA.

Chui, Y.H.; Smith, I. 1990. Influence of rotatory inertia, shear deformation and support condition on natural frequencies of wooden beams. *Wood Science and Technology*. 24:233-245.

Comisión Forestal de América del Norte (COFAN). 1994. Manual de Construcción de Estructuras Ligeras de Madera. Editado por el Consejo Nacional de la Madera en la Construcción, A.C. (COMACO). México.

Dirección General de Normas. 2006. NMX-C-438-2006. Industria de la Construcción – Tableros Contrachapados de Madera de Pino y otras Coníferas. Clasificación y Especificaciones. NMX-C-439-ONNCCE-2006. Propiedades físicas y métodos de



ensayo. NMX-C-440-ONNCCE-2006. Propiedades mecánicas y métodos de ensayo. México.

Gobierno del Distrito Federal. 2004. Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de madera. Gaceta oficial del Distrito Federal. Tomo I no. 103-bis. pp: 54-87. México.

Goens, E. 1931: Determination of Young's modulus from flexural vibrations. *Annalen der Physik*. 11(6):649-678.

Görlacher, R. 1984. Ein neues Messverfahren zur Bestimmung des E-modulus von Holz. *Holz als Roh-und Werkstoff*. (42):212-222.

Han, G.; Wu, Q.; Wang, X. 2006. Stress-wave velocity of wood-based panels: Effect of moisture, product type, and material direction. *Forest Products Journal*. 56(1):28-33.

Hearmon, R.F.S. 1966. Theory of the Vibration Testing of Wood. *Forest Products Journal*. 16(8):29-40.

Lemmens, J.W. (sin fecha). Operating Instructions for the GrindoSonic MK5 "Industrial" Instrument. J.W. Lemmens, Inc. USA.

Machek, L.; Militz, H.; Sierra-Alvarez, R. 2001a. The influence of wood moisture content on dynamic modulus of elasticity measurements in durability testing. *Forschung verwertung*. 5(2001):97-100.

Machek, L.; Militz, H.; Sierra-Alvarez, R. 2001b. The use of an acoustic technique to assess wood decay in laboratory soil-bed tests. *Wood Science and Technology* 34(6):467-472.



Maloney, T.M. 1993. Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing. Miller Freeman. USA.

Morlier, P.; Castéra, P.; Bos, F. 1999. Coordonateurs. Les matériaux composites à base de bois. *Revue des composites et des matériaux avancés*. Volume 9. Numéro hors série. Hermes Sciences Publications. France.

Moslemi, A.A. 1974. Particleboard. Vols. I and II. Southern Illinois University Press. USA.

Pellerin, R.F.; Ross, R.J. Editors. 2002. Nondestructive Evaluation of Wood. Forest Products Society. USA.

Perstorper, M. 1992. Predicting the stiffness of structural timber using dynamic modal tests. In: Proceedings of IUFRO S5.02 Timber Engineering 1992 Conference. France. pp:305-324.

Perstorper, M. 1993. Dynamic modal tests of timber evaluation according to the Euler and Timoshenko theories. In: Proceedings of the 9th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. Washington State University. USA. pp: 45-54.

Ross, R.J.; Pellerin, R.F. 1988. NDE of wood-based composites with longitudinal stress waves. *Forest Products Journal*. 38(5):39-45.

Smulski, S. Editor. 1997. Engineered Wood Products. A Guide for Specifiers, Designers and Users. PFS Research Foundation. USA.

Sotomayor Castellanos, J.R. 2003. Caracterización Mecánica de madera reconstituida: Módulo de Elasticidad de Tableros de Partículas de Madera evaluado con métodos no destructivos. *Revista Maderas: Ciencia y Tecnología*. (5)1:20-43. Chile.



Sotomayor Castellanos, J.R.; Correa Olivares, V.E.; García Mariscal, J.L.; Hernández Maldonado, S.A.; Moya Lara, C.E.; Olgúin Cerón, J.B.; Zurita Valencia, W. 2011. Caracterización mecánica de madera reconstituida. Tableros aglomerados, contrachapados y enlistonados de madera evaluados con métodos no destructivos. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 7(1):3-32. México.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Guridi Gómez, L.I.; García Moreno, T. 2010. Características acústicas de la madera de 152 especies mexicanas. Velocidad del ultrasonido, módulo de elasticidad, índice material y factor de calidad. Base de datos. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 6(1):3-32. México.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Ohashi, K.; Hatano, Y.; Shibusawa, T. 2006. Influencia del Perfil de densidad en las propiedades mecánicas y físicas de tableros de fibra de madera. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 2(1): 3-36. México.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Metzger, M.T. 2007. Módulo de elasticidad y resistencia interna de tableros de *Picea abies* con adhesivos a base de soya y de trigo. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 3(1):3-15. México.

Stark, N.M.; Cai, Z.; Carll, C.G. 2010. Wood-Based Composite Material. In: Wood Handbook, Chapter 11. General Technical Report FPL-GTR-190. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. USA.

Timoshenko, S.; Young, D.H.; Weaver, W. 1994. Reprinted Edition. Vibration problems in Engineering. New York: John Wiley. USA.

Winandy, J.E.; Kamke, F.A. (Editors). 2004. Fundamentals of composite processing. Proceedings of a workshop. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-149. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. USA.



CAPÍTULO 6

Higro-contracción e higro-expansión.

Resumen

La madera es un material higroscópico y sus dimensiones varían de manera diferente según la dirección de observación y de acuerdo al contenido de humedad de la madera. Este comportamiento es conocido como higro-contracción e higro-expansión de la madera con un carácter anisotrópico. El objetivo de la investigación fue determinar experimentalmente los parámetros de higro-contracción y de higro-expansión, en las direcciones paralela, longitudinal y en el espesor de una muestra comercial de tableros aglomerados, contrachapados y enlistonados de madera. Las principales conclusiones son: Las contracciones y expansiones ocasionadas por la adquisición o pérdida de humedad, son diferentes para cada tipo de tablero. Además, son mayores en la dirección transversal de los tres tipos de tableros, es decir en el espesor, en comparación con la variación en las direcciones perpendicular y longitudinal de los tableros.

Palabras clave: higroscopía, anisotropía, tableros aglomerados, contrachapados y enlistonados de madera.

Abstract

Wood is a hygroscopic material and its dimensions vary differently depending on the direction of observation and according to the wood moisture content. This behavior is known as hygro-contraction and hygro-expansion of the wood with an anisotropic character. The objective of the research was to experimentally determine the parameters of hygro-contraction and hygro-expansion, in the parallel, longitudinal and thickness directions of a commercial sample of particleboard, plywood and



blockboard. The main conclusions are: contractions and expansions caused by the acquisition or loss of moisture are different for each type of wood board. In addition, they are higher in the transverse direction of the three types of boards, namely the thickness, compared with the variation in the perpendicular and longitudinal directions of the boards.

Key words: hygroscopy, anisotropy, particleboard, plywood and blockboard.

Introducción

En comparación con la madera en estado natural, en el cual la madera aserrada presenta rasgos de variabilidad y heterogeneidad importantes en sus características físicas y tecnológicas, los productos de madera reconstituidos pretenden, entre otras ventajas, uniformizar su anisotropía material, así como disminuir su variación dimensional preferentemente en el dominio higroscópico. Éste es el caso de los tableros aglomerados, contrachapados y enlistonados de madera.

Esta iniciativa tiene varias perspectivas. Por una parte, es de utilidad en el diseño y cálculo de productos, materiales y estructuras compuestos de madera. Por otra, la elaboración de tableros de madera incrementa el empleo integral de la biomasa forestal.

La madera es un material higroscópico y sus dimensiones varían de manera diferente según la dirección de observación y de acuerdo al contenido de humedad de la madera. Este comportamiento es conocido como higo-contracción e higo-expansión de la madera con un carácter anisotrópico. A partir de los resultados experimentales de investigadores como Jayne, 1972; Kelly, 1977; Carll, 1986; Saka, 1993; Smulski, 1997; Morlier y col., 1999; Rowell, 2007; Cai y Ross, 2010; Stark y col., 2010; Winandy y Kamke, 2004, entre otros, se puede deducir que estas propiedades se transmiten proporcionalmente a los productos elaborados con este material.



La presente investigación es seguimiento de estudios anteriores sobre la caracterización mecánica de madera reconstituida, realizados en la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, particularmente sobre tableros aglomerados, contrachapados y enlistonados de madera. Los tableros aquí investigados han sido evaluados anteriormente con métodos no destructivos de ultrasonido y ondas de esfuerzo (Sotomayor Castellanos y col., 2011), y estudiados con vibraciones transversales (Sotomayor Castellanos y Arellano García, 2011). Consideraciones sobre el comportamiento mecánico de los tableros de madera estudiados y su problemática, pueden ser consultadas en estas investigaciones.

Los datos de estabilidad dimensional indican las variaciones dimensionales, aumentos o disminuciones, que se producen en los tableros cuando varían las condiciones ambientales, la humedad relativa y la temperatura del aire (Peraza Sánchez y col., 2004). Siguiendo a estos autores, la variación dimensional de los tableros fabricados con madera maciza, en nuestro caso tableros enlistonados, dependerá de los coeficientes de contracción volumétrica, radial y tangencial de cada especie de madera y de la composición del tablero. Tomando en cuenta que en las piezas de madera encolada los coeficientes antes mencionados son inferiores al de la madera maciza.

Cuando los tableros de partículas de madera son sometidos a un tratamiento cíclico de humidificación y calentado, su espesor aumenta. Esta higo-expansión es causada por la liberación de esfuerzos de compresión, resultantes de la operación de prensado de los tableros, por el hinchamiento propio de las partículas de madera y por el deterioro de las uniones entre las partículas (Sun y Arima, 1998).

La variación dimensional ocasionada por la adquisición de agua por tableros de madera es una propiedad material importante para su uso adecuado (Xu y Suchsland, 1997). Por ejemplo, la restricción de la expansión puede resultar en torceduras de componentes de muebles de uso interior. Además, las diferencias



entre la variación dimensional y las características del sustrato de materiales de recubrimiento para tableros, puede ocasionar alabeos de los paneles.

Para el caso de usos en exterior de paneles de astillas orientadas, la variación provocada por su exposición a la humedad provoca distorsiones en las conexiones entre elementos estructurales. Por su parte, Korai y col. (2012), estudiaron el deterioro de tableros de partículas de madera y de astillas orientadas, después de 5 años de exposición a la intemperie. Los investigadores notaron un incremento en los espesores originales de los tableros, acompañado éste de una reducción en sus propiedades de resistencia mecánica. El incremento en el volumen dado de madera compuesta, como es el caso de los tableros, puede resultar en una pérdida de cohesión interna y consecuentemente en una disminución de su resistencia mecánica.

Zhang y col. (1994) estudiando el efecto de mezclar fibras de yute y de madera de especies gimnospermas en las propiedades de higo-expansión en tableros aglomerados de fibra, con densidades variando entre 0.45 y 1 g/cm³, determinaron aumentos en el espesor de los tableros entre 5 y 18 % y para la expansión lineal a lo largo del plano formado por las direcciones perpendicular y longitudinal de los tableros de entre 0.5 y 1 %.

Wong y col. (1999) estudiando el efecto del perfil de densidad de tableros de partículas de madera de *Shorea* spp en sus propiedades físicas, determinaron un aumento en el espesor de los tableros de hasta 15 % cuando fueron sumergidos en agua a temperatura normal durante un período de 24 horas.

Dado que la demanda para tableros de madera está en aumento y su uso se extiende en aplicaciones constructivas expuestas en exteriores, recientemente se han estudiado varios tratamientos con el objeto de disminuir el deformado de los tableros de madera. Entre otros, el tratamiento higo-térmico de las fibras o partículas que componen los tableros. Resultados recientes de Mohebbi y col.



(2008), mostraron una disminución en el hinchamiento de tableros si las fibras son sometidas, previo a su transformación en tableros, a temperaturas que van desde 120 hasta 180 °C, durante 0, 30 y 90 min.

Con otra perspectiva, Garcia y col. (2005) trataron de mejorar la estabilidad dimensional de tableros de fibra de media densidad incorporando a las fibras, previo a la fabricación de los tableros, cera mezclada de polipropileno. Sus resultados indican que la contracción y expansión lineal incrementan para humedades relativas de 80 y 50 %. Sin embargo, el encogimiento y la expansión del espesor de los tableros estudiados fueron reducidos de manera importante con el tratamiento aplicado. Además, este procedimiento no afectó las propiedades mecánicas ni el perfil de densidad de los tableros.

Wu (1999) calculó la expansión del espesor de tableros contrachapados comerciales con densidades de entre 0.55 y 0.58 g/cm³ para contenidos de humedad de 52.9 %, valor que representa el porcentaje de agua adquirida por el material. La higo-expansión fue de 11.1 %. Igualmente, el autor determinó higo-expansión para tableros de partículas del orden de 13.1 % para densidades de 0.78 g/cm³ y contenidos de humedad de 36.3 %.

Dieste y col. (2008) estudiaron el efecto de una resina de urea sobre la estabilidad dimensional de tableros contrachapados de *Betula* sp. y *Fagus sylvatica*. En los tableros de control, los cuales no fueron tratados, los investigadores observaron higo-expansiones del espesor del orden de 9 a 13 % para tableros de *Betula* sp. y de 7 a 10 % para *Fagus sylvatica*.

Tenorio y col. (2011) estudiaron las propiedades físicas de tableros contrachapados fabricados con madera de *Gemila arbórea*. Los autores determinaron valores de la higo-expansión del espesor de los tableros del orden de 2.09 %.



A manera de síntesis, se puede decir que los tableros aglomerados, contrachapados y enlistonados de madera presentan un carácter higroscópico, el cual resulta en una variación dimensional si su contenido de humedad se modifica. La magnitud de los indicadores de higo-contracción e higo-expansión es diferente según la dirección y/o el plano del tablero en el que se midan.

Objetivo

El objetivo de la investigación es determinar experimentalmente los parámetros de higo-contracción y de higo-expansión, en las direcciones paralela, longitudinal y en el espesor de una muestra comercial de tableros aglomerados, contrachapados y enlistonados de madera.

Materiales y métodos

Materiales

El material experimental consistió en tres tableros aglomerados, tres tableros contrachapados y tres tableros enlistonados, adquiridos en un establecimiento comercial especializado en venta de productos forestales, en la ciudad de Morelia, Michoacán.

Estos tableros comerciales, fueron los mismos que se estudiaron en investigaciones anteriores en el Laboratorio de Mecánica de la Madera de la FITECMA (Sotomayor Castellanos y col., 2011; Sotomayor Castellanos y Arellano García, 2011).

De acuerdo a la información proporcionada por el establecimiento comercial, los tableros aglomerados son catalogados comercialmente como tableros estructurales compuestos por partículas mezcladas de madera de varias especies del género *Pinus*. Igualmente, los tableros contrachapados son catalogados comercialmente



como tableros estructurales contrachapados con siete capas de madera del género *Pinus*.

Los tableros enlistonados están armados por listones de madera del género *Pinus*, de sección cuadrada de 15 mm de arista y recubiertos en sus dos caras con chapas de madera de cedro rojo (*Cedrela* spp), de acuerdo a la información proporcionada por el establecimiento comercial. Los diagramas del espesor y de la estructura interna de los tres tipos de tableros estudiados se presentan en la Figura 1. Las dimensiones de los tableros y de las probetas se muestran en la Tabla 1.

Métodos

El procedimiento general de la investigación se presenta en la Figura 2. Las pruebas de higro-contracción y de higro-expansión se realizaron en las probetas correspondientes a cada tipo de tableros y a su orientación con respecto a la dirección paralela (longitudinal), al largo del tablero, a la dirección perpendicular y a la dirección transversal, es decir, el espesor de los tableros. Los valores promedio de los resultados por categoría y por orientación fueron utilizados en el análisis. A continuación, se describen cada uno de las etapas de la metodología.

Acondicionamiento y preparación de probetas

Los nueve tableros fueron marcados y recortados de acuerdo al diagrama presentado en la Figura 3. De esta forma, de cada tablero se obtuvieron once listones recortados en la dirección paralela al largo del tablero y once probetas recortadas en la dirección perpendicular al largo del tablero, dando un total de 66 listones por categoría de tablero. Una vez recortados los listones, éstos se acondicionaron durante 60 días en el laboratorio en condiciones de temperatura (T) de 20°C y 65% de humedad relativa (HR).



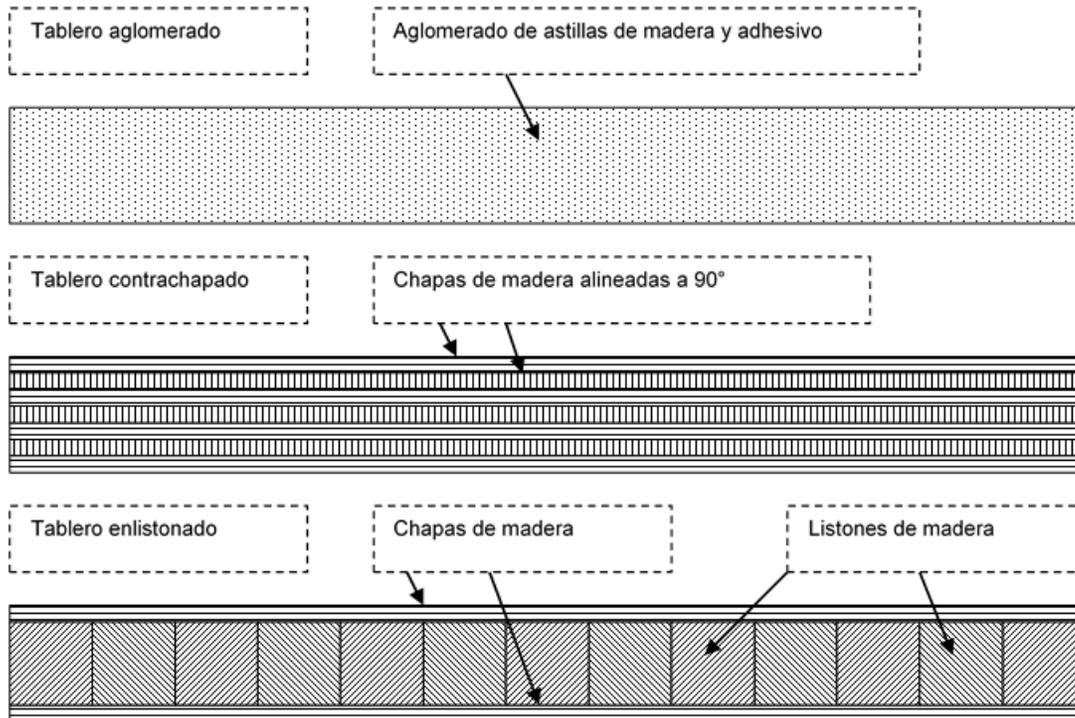


Figura 1. Diagramas del espesor y de la estructura interna de los tableros.

Las probetas para las pruebas fueron recortadas de los listones perpendicular 6 y paralelo 6 mostrados en la Figura 3. Las dimensiones de las probetas se detallan en la Tabla 1.

Pruebas de higo-contracción

Las pruebas de higo-contracción consistieron en deshidratar las probetas en un horno desecador a una temperatura de 103 °C durante 24 horas. Sus dimensiones en las direcciones perpendicular (P), longitudinal (L) y transversal (T o espesor), fueron medidos antes y después del secado.

Las higo-contracciones (HC en %) correspondientes a cada grupo de probetas y a cada una de las direcciones estudiadas fueron calculadas con la fórmula:



$$HC_{P,L,T} = \left(\frac{X_{P,L,T}^{H1} - X_{P,L,T}^{H0}}{X_{P,L,T}^{H1}} \right) \quad (1)$$

Donde:

HC_{P,L,T}: Higro-contracción en la dirección P,L,T, a un contenido de humedad H.

X_{P,L,T}: Dimensión medida en la dirección P,L,T, a un contenido de humedad H.

H1: Contenido de humedad inicial de los tableros.

H0: Contenido de humedad de los tableros después de 24 h a 103 °C.

P: Dirección paralela.

L: Dirección longitudinal.

T: Dirección transversal (espesor).

Tabla 1. Dimensiones de los tableros y de las probetas.

Material	Número de tableros	Dimensiones de los tableros			Número de Probetas	Dimensiones de las probetas		
		Ancho (m)	Largo (m)	Espesor (m)		Ancho (m)	Largo (m)	Espesor (m)
Tableros aglomerados	3	1.22	2.44	0.018	18 HC 18 HE	Recortadas en la dirección paralela al largo del tablero		
						0.100	0.100	0.018
Tableros contrachapados	3	1.22	2.44	0.018	18 HC 18 HE	Recortadas en la dirección perpendicular al largo del tablero		
						0.100	0.100	0.018
Número de capas: 7	3	1.22	2.44	0.018	18 HC 18 HE	Recortadas en la dirección paralela al largo del tablero		
						0.100	0.100	0.018
Tableros enlistonados	3	1.22	2.44	0.019	18 HC 18 HE	Recortadas en la dirección paralela al largo del tablero		
						0.100	0.100	0.019
	3	1.22	2.44	0.019	18 HC 18 HE	Recortadas en la dirección perpendicular al largo del tablero		
						0.100	0.100	0.019

Leyenda: HC: Probetas para pruebas de higro-contracción. HE: Probetas para pruebas de higro-expansión.



Para fines de análisis posterior, se calcularon los coeficientes de higo-contracción (α HC) correspondientes a cada grupo de listones y a cada una de las direcciones estudiadas, con la siguiente expresión:

$$\alpha\text{HC}_{P,L,T} = \left(\frac{\text{HC}_{P,L,T}}{\Delta H1} \right) \quad (2)$$

Donde:

$\alpha\text{HC}_{P,L,T}$: Coeficiente de higo-contracción en P,L,T, a un contenido de humedad H0.

$\text{HC}_{P,L,T}$: Higo-contracción en la dirección P,L,T, a un contenido de humedad H0.

$\Delta H1$: Disminución del contenido de humedad de los tableros: H1 – H0.

H0: Contenido de humedad de los tableros después de 24 h a 103 °C.

P: Dirección paralela.

L: Dirección longitudinal.

T: Dirección transversal (espesor).

Pruebas de higo-expansión

Las pruebas de higo-expansión consistieron en dos etapas. Durante la primera, las probetas se humidificaron sumergiéndolas en agua a una temperatura ambiente de laboratorio de 23 °C, durante 24 horas. Las dimensiones de las probetas fueron medidas antes y después de la operación de hidratado, en las direcciones perpendicular, longitudinal y transversal (espesor).



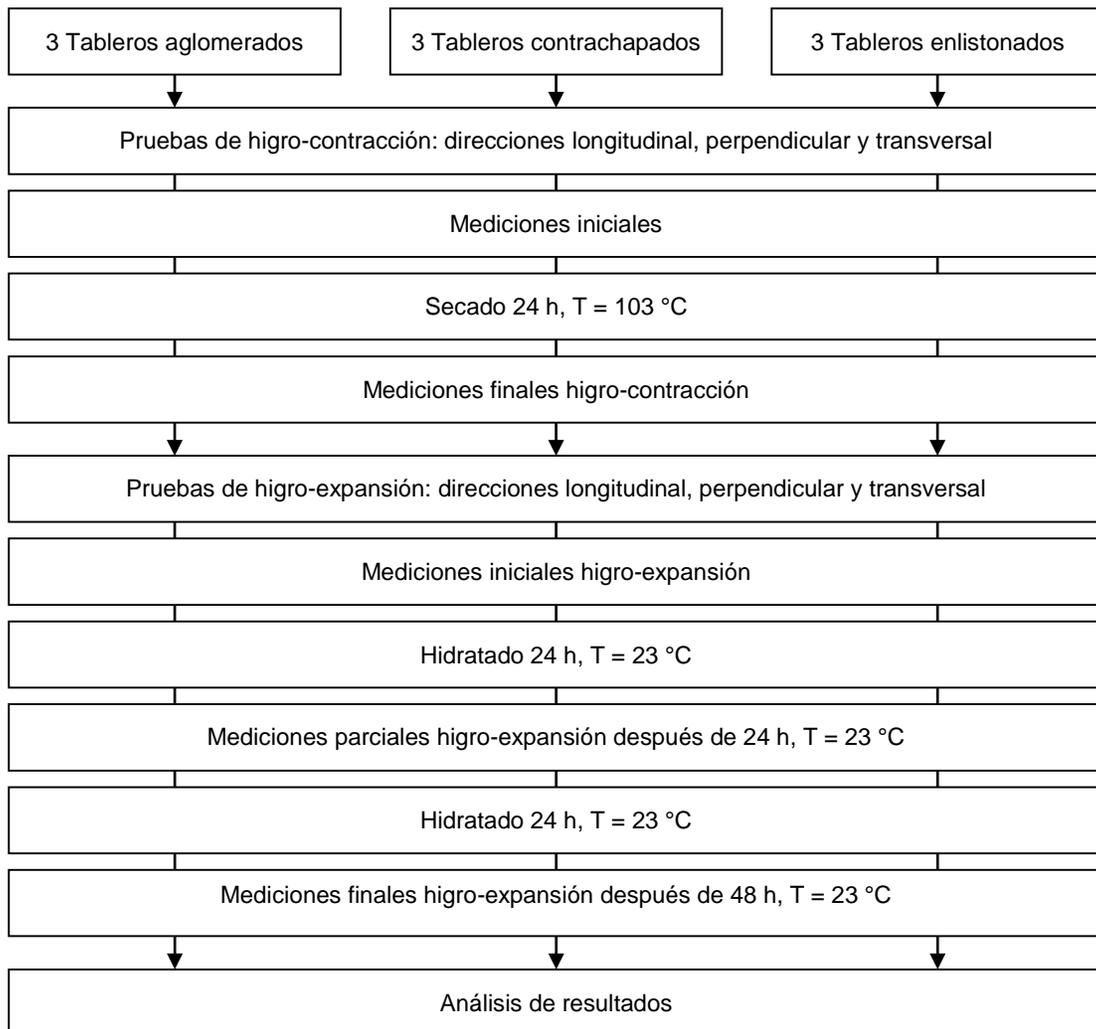


Figura 2. Procedimiento general de la investigación.

Posteriormente, en la segunda etapa, las probetas continuaron su humidificación a una temperatura ambiente de laboratorio de 23 °C, durante 24 horas adicionales. Las dimensiones de las probetas fueron medidas antes y después de la segunda operación de hidratado, en las direcciones perpendicular, longitudinal y transversal (espesor).

Las higo-expansiones (HE en %) correspondientes a cada grupo de listones y a cada una de las direcciones estudiadas fueron calculadas con la fórmula:



$$HE_{P,L,T} = \left(\frac{X_{P,L,T}^{H1} - X_{P,L,T}^{H0}}{X_{P,L,T}^{H1}} \right) \quad (3)$$

Donde:

- HE_{P,L,T}: Higro-expansión en la dirección P,L,T, a un contenido de humedad H.
- X_{P,L,T}: Dimensión medida en la dirección P,L,T, a un contenido de humedad H.
- H1: Contenido de humedad inicial de los tableros.
- H0: Contenido de humedad de los tableros después de 24 h a 23 °C.
- P: Dirección paralela.
- L: Dirección longitudinal.
- T: Dirección transversal (espesor).

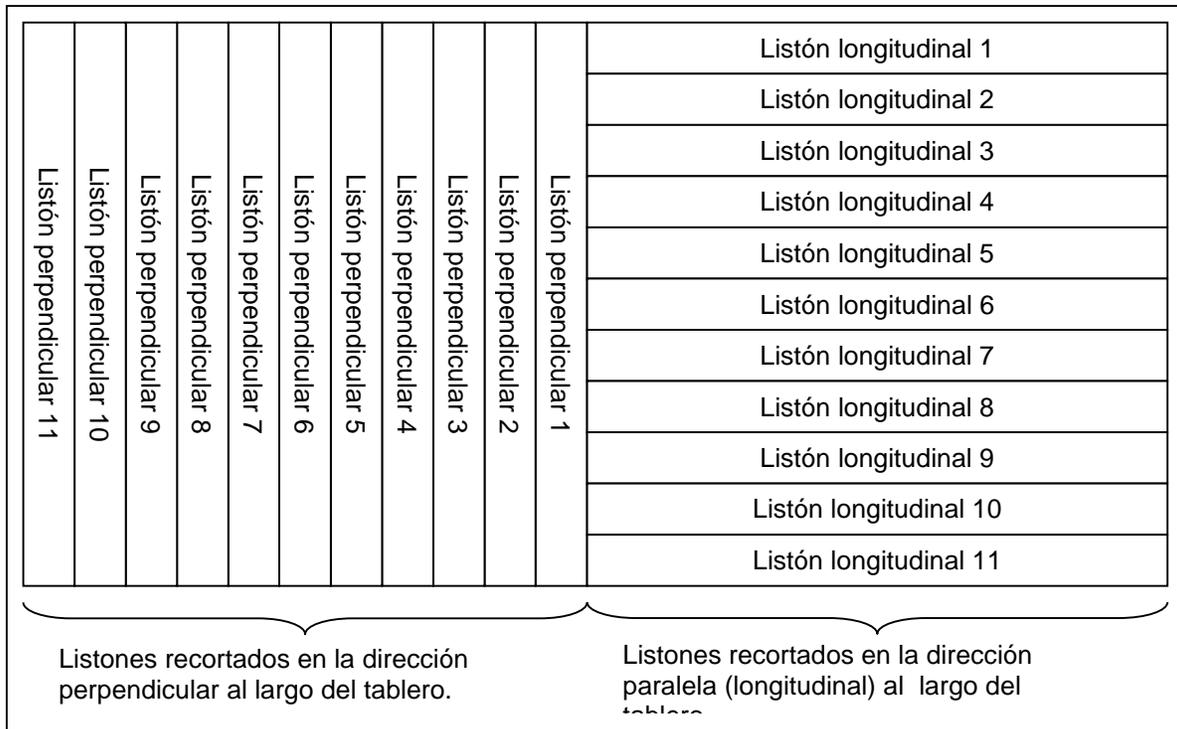


Figura 3. Recorte de los listones en el plano transversal-longitudinal de los tableros.

Para fines de análisis posterior, se calcularon los coeficientes de higro-expansión (βHE , con un factor de 24 y 48 para β : tiempo de hidratado) correspondientes a cada grupo de listones y a cada una de las direcciones estudiadas, con la siguiente expresión:



$$\beta_{HE_{P,L,T}} = \left(\frac{HE_{P,L,T}}{\Delta H_i} \right) \quad (4)$$

Donde:

- $\beta_{HE_{P,L,T}}$: Coeficiente de higo-expansión en P, L, T a un contenido de humedad H_i .
- $HE_{P,L,T}$: Higo-expansión en la dirección P, L, T a un contenido de humedad H_0 .
- ΔH_i : Aumento del contenido de humedad de los tableros: $H_{i+1} - H_i$.
- H_{i+1} : Contenido de humedad de los tableros después de 24/48 h hidratados a 23 °C.
- H_i : Contenido de humedad de los tableros después de 24/48 h hidratados a 23 °C.
- P: Dirección paralela.
- L: Dirección longitudinal.
- T: Dirección transversal (espesor).

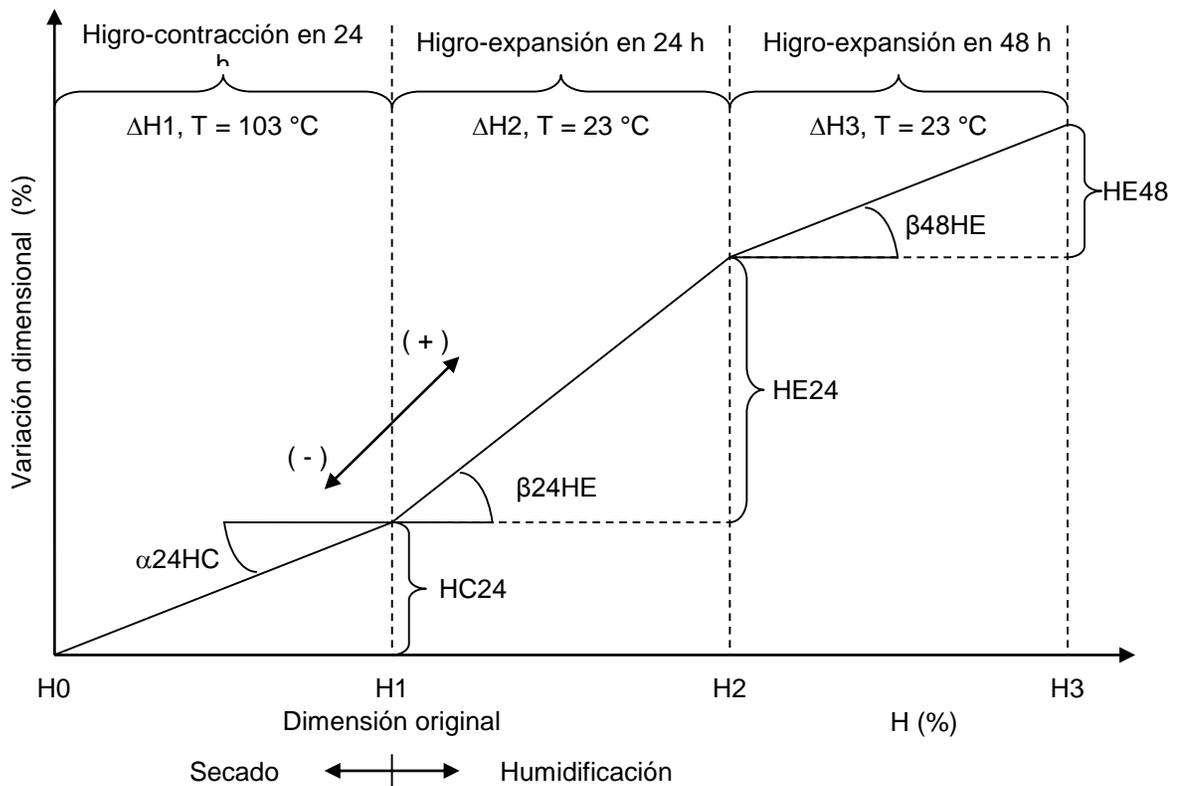


Figura 4. Conceptos empleados en la metodología (ver leyenda en la Tabla 3).



Resultados y análisis

Los resultados experimentales se presentan en la Tabla 2 y la leyenda de las abreviaciones se explica en la Tabla 3.

Los resultados están tabulados respecto al tipo de material estudiado: tableros enlistonados, tableros contrachapados y tableros aglomerados, para los procesos observados de higo-contracción y de higo-expansión, así como de acuerdo a las direcciones de los tableros: perpendicular, longitudinal y transversal. Los datos de la Tabla 2 representan los valores promedio de cada tipo de tablero. Cuando aparece un signo negativo (-) se refiere al fenómeno de disminución en las dimensiones de las probetas, correspondiente a la higo-contracción de los tableros.

Tabla 2. Higo-contracciones, higo-expansiones y coeficientes respectivos.

	Higo-contracción en 48 h a T = 103 °C							Dirección en el tablero					
	H0 (%)	H1 (%)	H2 (%)	H3 (%)	$\Delta H1$ (%)	$\Delta H2$ (%)	$\Delta H3$ (%)	Perpendicular		Longitudinal		Transversal	
								HCP24 (%)	$\alpha 24HCP$ (%/%)	HCL24 (%)	$\alpha 24HCL$ (%/%)	HCT24 (%)	$\alpha 24HCT$ (%/%)
TE	0.0	7.92			7.92			-0.11	-0.0139	-0.21	-0.0265	-1.22	-0.1540
TC	0.0	8.31			8.31			-0.14	-0.0168	-0.15	-0.0180	-1.40	-0.1685
TA	0.0	6.38			6.38			-0.26	-0.0407	-0.25	-0.0392	-3.49	-0.5470
	Higo-expansión en 24 h a T = 23 °C							Dirección en el tablero					
	H0 (%)	H1 (%)	H2 (%)	H3 (%)	$\Delta H1$ (%)	$\Delta H2$ (%)	$\Delta H3$ (%)	Perpendicular		Longitudinal		Transversal	
								HEP24 (%)	$\beta 24HEP$ (%/%)	HEL24 (%)	$\beta 24HEL$ (%/%)	HET24 (%)	$\beta 24HET$ (%/%)
TE	0.0	7.92	14.03			6.11		0.22	0.0157	0.52	0.0851	2.44	0.3993
TC	0.0	8.31	42.52			5.17		0.35	0.0678	0.52	0.1006	4.80	0.9284
TA	0.0	6.38	25.61			19.23		0.20	0.0104	0.16	0.0083	11.97	0.6224
	Higo-expansión en 48 h a T = 23 °C							Dirección en el tablero					
	H0 (%)	H1 (%)	H2 (%)	H3 (%)	$\Delta H1$ (%)	$\Delta H2$ (%)	$\Delta H3$ (%)	Perpendicular		Longitudinal		Transversal	
								HEP48 (%)	$\beta 48HEP$ (%/%)	HEL48 (%)	$\beta 48HEL$ (%/%)	HET48 (%)	$\beta 48HET$ (%/%)
TE	0.0		14.03	21.23			7.2	0.15	0.0208	0.21	0.0292	3.23	0.4486
TC	0.0		42.52	49.44			6.92	0.08	0.0116	0.14	0.0202	0.40	0.0578
TA	0.0		25.61	40.75			15.14	0.10	0.0066	0.10	0.0066	5.46	0.3606
	Higo-expansión total en 48 h a T = 23 °C							Dirección en el tablero					
	H0 (%)	H1 (%)	H2 (%)	H3 (%)	$\Delta H1$ (%)	$\Delta H2$ (%)	$\Delta H2+3$ (%)	Perpendicular		Longitudinal		Transversal	
								HEPt (%)	$\beta tHEP$ (%/%)	HELt (%)	$\beta tHEL$ (%/%)	HETt (%)	$\beta tHET$ (%/%)
TE	0.0						13.31	0.37	0.0278	0.73	0.0548	5.67	0.4560
TC	0.0						12.9	0.43	0.0333	0.66	0.0512	5.20	0.4031
TA	0.0						34.37	0.30	0.0087	0.26	0.0076	17.43	0.5071

TE: Tableros enlistonados; TC: Tableros contrachapados; TA: Tableros aglomerados

Nota: Ver leyenda en el Tabla 3.



Tabla 3. Leyenda de abreviaciones y símbolos de la Tabla 2.

h	Tiempo en horas	
T	Temperatura en grados centígrados	
C	Contracción en porcentaje	
E	Expansión en porcentaje	
H0:	Contenido de humedad de los tableros después de 24 h a 103 °C	
H1:	Contenido de humedad inicial de los tableros	
H2:	Contenido de humedad en los tableros después de 24 h	
H3:	Contenido de humedad después de 48 h	
$\Delta H1$:	Disminución del contenido de humedad (24 h, T = 103 °C)	= H1 - H0
$\Delta H2$:	Aumento del contenido de humedad (24 h, T = 23 °C)	= H2 - H1
$\Delta H3$:	Aumento del contenido de humedad (48 h, T = 23 °C)	= H3 - H2
$\Delta H1+2$:	Aumento del contenido de humedad total	= H3 - H1
HCP24:	Higro-contracción perpendicular después de 24 h a 103 °C	
$\alpha 24HCP$:	Coeficiente de higro-contracción perpendicular después de 24 h a 103 °C	= HCP24 / $\Delta H1$
HCL24:	Higro-contracción longitudinal después de 24 h a 23 °C	
$\alpha 24HCL$:	Coeficiente de higro-contracción longitudinal después de 24 h a 103 °C	= HCL24 / $\Delta H1$
HCT24:	Higro-contracción transversal después de 24 h a 23 °C	
$\alpha 24HCT$:	Coeficiente de higro-contracción transversal después de 24 h a 103 °C	= HCT24 / $\Delta H1$
HEP24:	Higro-expansión perpendicular después de 24 h a 23 °C	
$\beta 24HEP$:	Coeficiente de higro-expansión perpendicular después de 24 h a 23 °C	= HEP24 / $\Delta H2$
HEL24:	Higro-expansión longitudinal después de 24 h a 23 °C	
$\beta 24HEL$:	Coeficiente de higro-expansión longitudinal después de 24 h a 23 °C	= HEL24 / $\Delta H2$
HET24:	Higro-expansión transversal después de 24 h a 23 °C	
$\beta 24HET$:	Coeficiente de higro-expansión transversal después de 24 h a 23 °C	= HET24 / $\Delta H2$
HEP48:	Higro-expansión perpendicular después de 48 h a 23 °C	
$\beta 48HEP$:	Coeficiente de higro-expansión perpendicular después de 48 h a 23 °C	= HEP48 / $\Delta H3$
HEL48:	Higro-expansión longitudinal después de 48 h a 23 °C	
$\beta 48HEL$:	Coeficiente de higro-expansión longitudinal después de 48 h a 23 °C	= HEL48 / $\Delta H3$
HET48:	Higro-expansión transversal después de 48 h a 23 °C	
$\beta 48HET$:	Coeficiente de higro-expansión transversal después de 48 h a 23 °C	= HET48 / $\Delta H3$
HEPT:	Higro-expansión perpendicular total después de 48 h a 23 °C	
$\beta tHEP$:	Coeficiente de higro-expansión perpendicular total después de 48 h a 23 °C	= HEP48 / $\Delta H1+2$
HELT:	Higro-expansión longitudinal total después de 48 h a 23 °C	
$\beta tHEL$:	Coeficiente de higro-expansión longitudinal total después de 48 h a 23 °C	= HEL48 / $\Delta H1+2$
HETt:	Higro-expansión transversal total después de 48 h a 23 °C	
$\beta tHET$:	Coeficiente de higro-expansión transversal total después de 48 h a 23 °C	= HET48 / $\Delta H1+2$



Higro-contracción

El análisis del proceso de higro-contracción corresponde al dominio higroscópico que va del contenido de humedad inicial de los tableros (H1) al contenido de humedad de cero de los tableros, después de su desecado durante 24 horas, tal como se ilustra en la Figura 4.

El contenido de humedad inicial promedio (H1) de los tres tipos de tablero fue de 7.56%. Para el caso del proceso de higro-contracción, este valor corresponde a la disminución del contenido de humedad de la madera ($\Delta H1$) hasta un valor de 0%, el cual se alcanzó después de 24 horas de desecado del material.

El valor promedio de la higro-contracción (HC) de los tableros enlistonados fue, para las tres direcciones perpendicular, longitudinal y transversal mayor en comparación a los valores de los tableros contrachapados y enlistonados.

La magnitud de la HC para las direcciones P y L es mínima, alrededor de -0.11 a -0.26 %. No obstante, para el espesor de los tableros, es decir para la dirección T, el valor de HC aumenta comparativamente de manera importante y excepcionalmente para los TA.

En comparación con los valores encontrados usualmente para madera aserrada, estos datos son muy pequeños, ya que van de 2 al 8 % para las direcciones radial y tangencial, y de alrededor de 1% para la dirección longitudinal. Es decir, los coeficientes de higro-contracción (α_{HC}) resultan en valores relativamente pequeños en comparación con los de la madera aserrada. Particularmente para las direcciones P y L de los tableros. Para el caso del espesor de los tableros, el coeficiente α_{HC} es del mismo orden que los valores correspondientes a las direcciones radial y tangencial de la madera de *Pinus douglasiana*, los cuales van desde 0.162 hasta 0.315 %/% (Villaseñor Aguilar, 2007).



Estos resultados coinciden con uno de los objetivos que es el de reconstruir la madera en combinación de adhesivos sintéticos, para mejorar las propiedades tecnológicas de la madera, en este caso, disminuir la contracción ocasionada por la deducción del contenido de humedad.

Las Figuras 7 y 8 esquematizan la variación dimensional de los tableros, en las tres direcciones estudiadas, y en relación a la variación del contenido de humedad correspondiente a los procesos de deshidratado e hidratado. Estos resultados muestran que los tableros aglomerados se contrajeron alrededor del doble en comparación con los tableros contrachapados y enlistonados, esto para las tres direcciones medidas.

Higro-expansión

El análisis del proceso de higro-expansión se divide en dos fases: la primera de 24 horas, la segunda de 24 horas adicionales de hidratado de la madera y la higro-expansión total de 48 horas (ver Figuras 4, 5 y 6).



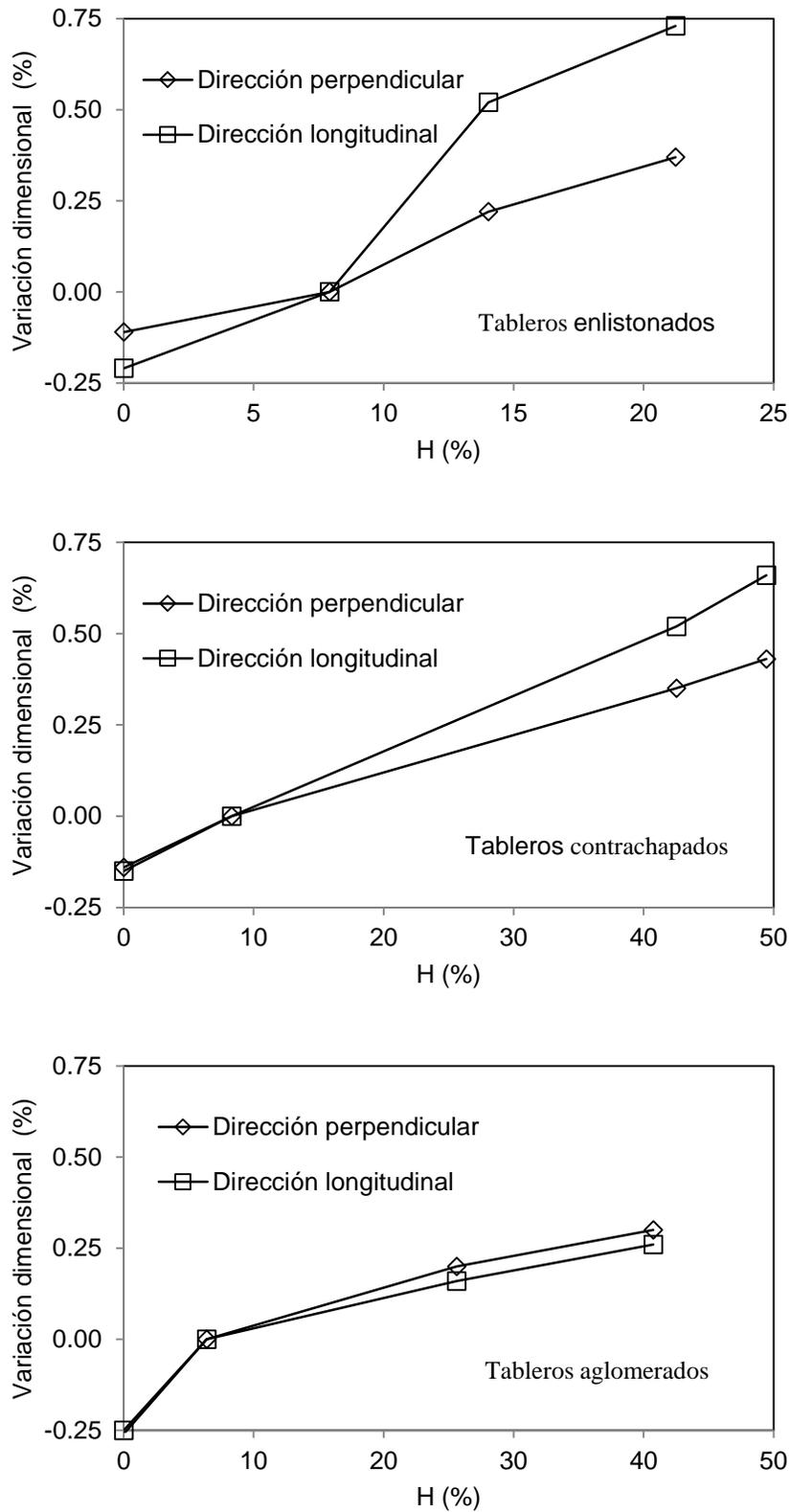


Figura 5. Variación dimensional en las direcciones perpendicular y longitudinal.



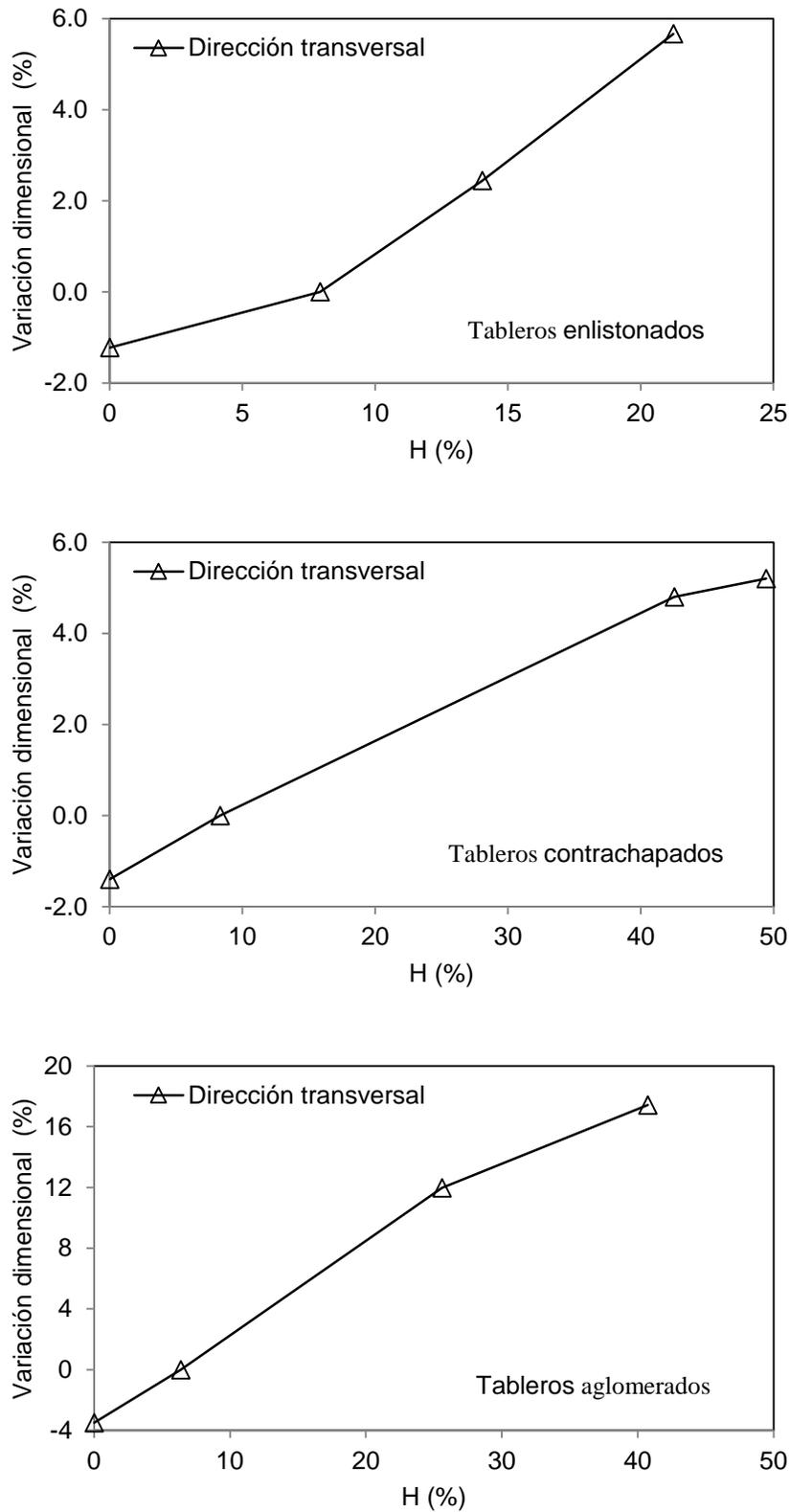


Figura 6. Variación dimensional en la dirección transversal (espesor).



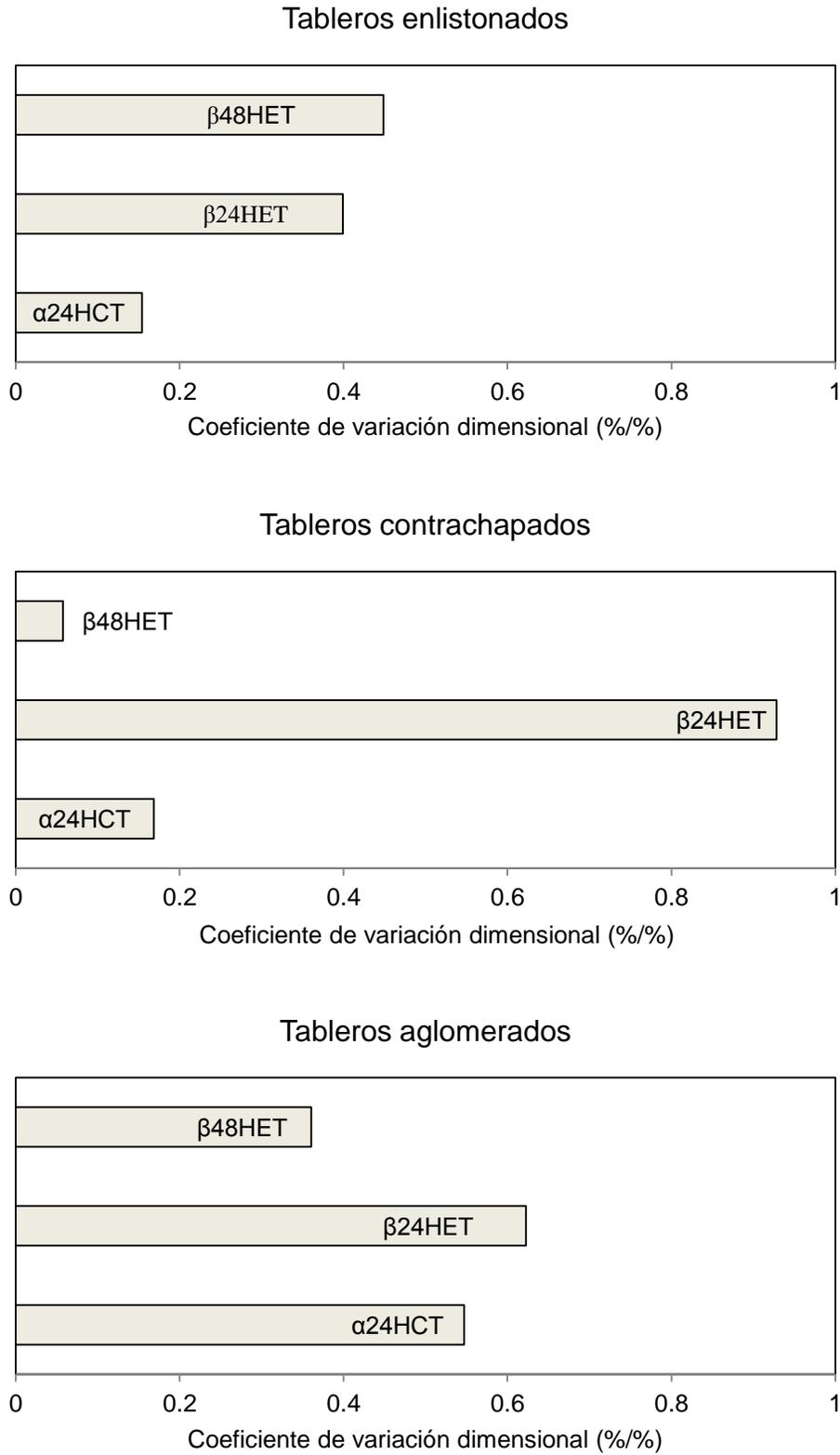


Figura 7. Coeficientes de higo-expansión en la dirección transversal (espesor).



Higro-expansión en 24 h a $T = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$

El aumento en el contenido de humedad (ΔH_2) de los tableros, para el periodo de hidratado de 24 horas, representa la masa del agua que absorbieron los tableros a partir del contenido de humedad inicial. De acuerdo con la Tabla 2, ΔH_2 aumentó en los tableros aglomerados un poco más de tres veces que en los tableros enlistonados y contrachapados. Esto quiere decir que los tableros aglomerados pueden adquirir más humedad en comparación con los otros. Sin embargo, los valores de la higro-expansión (HEP24) son relativamente proporcionales para los tres grupos en los casos de las direcciones perpendicular y radial. La higro-expansión transversal (HET) guarda la proporción del agua absorbida y su higro-expansión es hasta 2 y 4 veces mayor en esta dirección y en comparación con las direcciones P y T. Es decir, los tableros aglomerados absorben más agua y se expanden proporcionalmente en comparación con los tableros enlistonados y contrachapados.

Para el caso de los coeficientes de higro-expansión β , los cuales ponderan la capacidad de absorción con la cantidad de humedad absorbida, cada una de las diferentes clases de tableros presentó valores particulares según la dirección de observación.

Higro-expansión en 48 h a $T = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$

El aumento en el contenido de humedad (ΔH_3) de los tableros, para el período de hidratado de 48 horas, representa la masa del agua que absorbieron los tableros a partir del contenido de humedad H_2 después de 24 horas de hidratado.

Los valores para la higro-expansión (HP48) en el espesor de los tableros aglomerados es mayor que la correspondiente a la de los tableros enlistonados y mucho mayor que la de los tableros contrachapados. Mientras que los tableros E y A continúan adquiriendo masa de agua, los tableros C lo hacen a una tasa mucho



menor, tal como es esquematizado en las Figuras 5 y 6. Para el caso de los coeficientes β no se observa una tendencia en relación al tipo y/o dirección de los tableros.

Higro-expansión total en 48 h a $T = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$

El parámetro Higro-expansión total en 48 h β_t ejemplifica la higro-expansión adicionada y total de los tableros después de un periodo de 48 horas de hidratación. Una vez más, los tableros aglomerados se distinguieron de los otros dos grupos: los tableros A absorbieron más masa de agua, en las direcciones P y T, sus higro-expansiones totales HET fueron menores que las correspondientes a los tableros E y C. En cambio, su higro-expansión total para el espesor (dirección T) fue muy superior. Respecto a sus coeficientes de higro-expansión, los tres tipos de tableros mostraron valores similares, particularmente en la dirección transversal, es decir en el espesor. Estas observaciones se esquematizan en la Figura 7.

Respecto a las variaciones en el contenido de humedad para cada tipo de tableros y en cada una de las tres pruebas: secado 48 h e hidratados 24 h y 48 h, los tableros enlistonados y contrachapados denotaron comportamientos similares. En contraste, los tableros aglomerados absorbieron más humedad. A partir del análisis de los resultados es difícil establecer regularidades en la caracterización mecánica de los tres tipos de tableros estudiados. Cada tablero tiene una clase y tamaño desiguales de partícula o placa de madera. Igualmente, su composición en tipo y proporción madera/pegamento son diferentes.

A manera de contribución al análisis de resultados, la Figura 8 esboza las diferentes direcciones favorecidas en la estructura interna de los tableros. Los tableros enlistonados presentan un acomodo de los listones que favorece la dirección longitudinal de la madera. Los tableros contrachapados equilibran la anisotropía natural de la madera sólida al funcionar como un material compuesto por placas adheridas perpendicularmente.



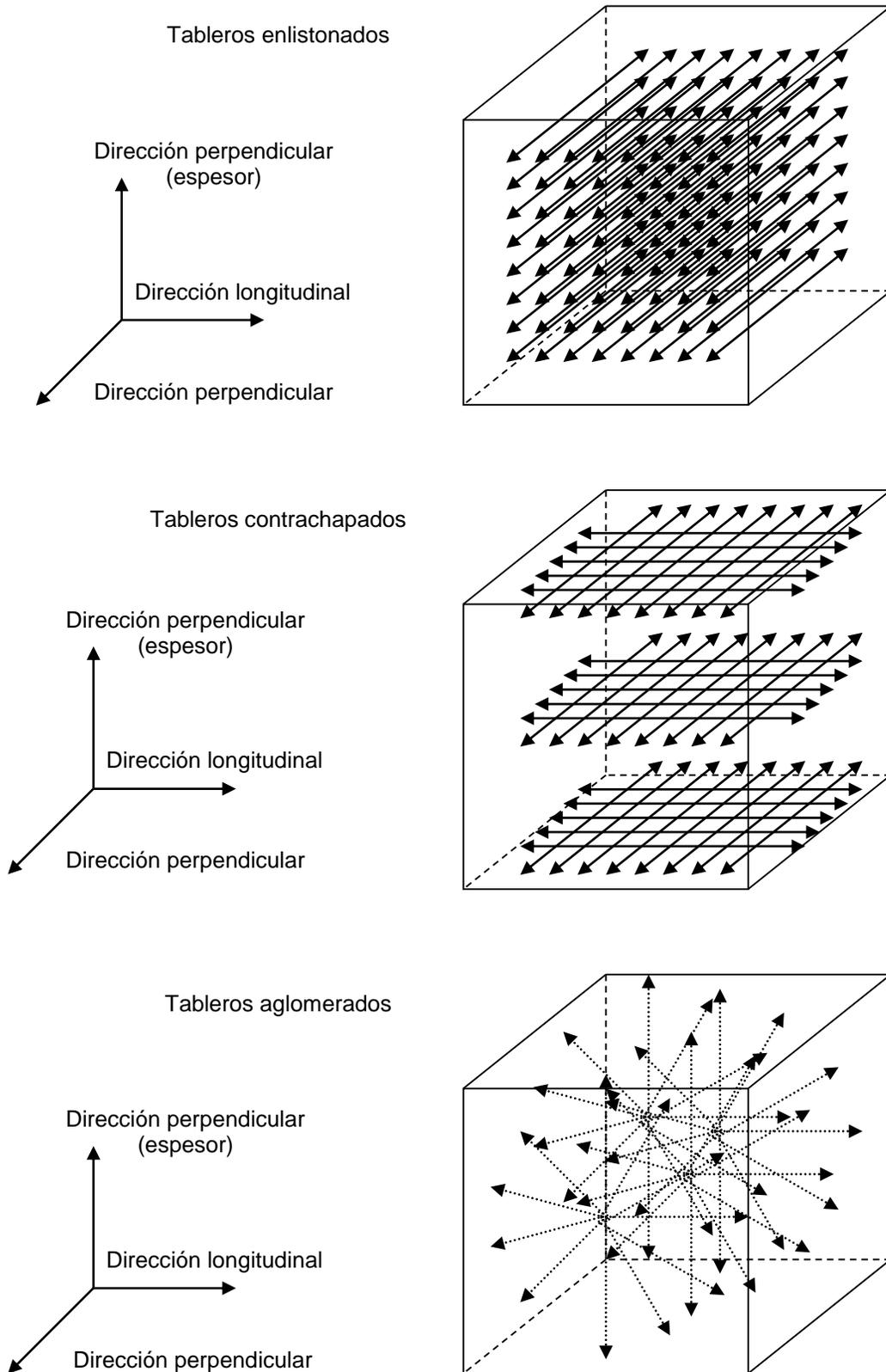


Figura 8. Direcciones favorecidas en la estructura interna de los tableros.



Aun así, los tableros contrachapados denotan una fuerte anisotropía entre el plano formado por las direcciones perpendicular y longitudinal, en relación a la dirección transversal o espesor del tablero. Los tableros aglomerados, reconstituyen completamente la configuración natural de la madera en un material de madera reconstituida de pequeñas partículas y adhesivo (ver Figura 1 y Tabla 1).

La variación dimensional determinada no refleja la expansión libre de cada partícula, pliego o elemento de madera que constituyen los tableros en estudio. Los resultados reflejan más bien la suma de la variación dimensional del conjunto de todas las partículas, ligadas a su orientación relativa a la dirección de expansión medida. Además, es importante considerar que la expansión total del los tableros será disminuida por las restricción impuesta por el adhesivo presente y su distribución entre las partículas, elementos o chapas de madera.

Conclusiones

Las contracciones y expansiones ocasionadas por la adquisición o pérdida de humedad, son mayores en la dirección transversal de los tres tipos de tableros, es decir en el espesor, en comparación con la variación en las direcciones perpendicular y longitudinal de los tableros.

Los tableros aglomerados adquirieron más humedad en comparación con los tableros enlistonados y contrachapados. Sin embargo, para el caso del coeficiente de higro-expansión, en el ensayo de 24 horas, los tableros contrachapados presentaron una mayor dilatación en comparación con los otras tipos de tableros estudiados.

La variación dimensional de todos los tableros y en las tres direcciones observadas no fue necesariamente lineal. A manera de recomendación, es necesario realizar este tipo de pruebas pero con intervalos de medición más estrechos y secuenciales, de tal forma que se puedan estimar las tendencias que relacionen los parámetros



de variación dimensional y la evolución del contenido de humedad de madera reconstituida.

Referencias

Cai, Z.; Ross, R.J. 2010. Wood Handbook, Chapter 12: Mechanical Properties of Wood-Based Composite Materials. General Technical Report FPL-GTR-190. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. USA.

Carll, C.G. 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. USA.

Dieste, A.; Krause, A.; Bollmus, S.; Militz, M. 2008. Physical and mechanical properties of plywood produced with 1.3-dimethylol-4.5-dihydroxyethyleneurea (DMDHEU)- modified veneers of *Betula* sp. and *Fagus sylvatica*. *Holz Roh Werkst.* 66:281-287.

Garcia, R.A.; Cloutier, A.; Riedl, B. 2005. Dimensional stability of MDF panels produced from fibres treated with maleated polypropylene wax. *Wood Science and Technology.* 39: 630-650.

Jayne, B.A. 1972. Theory and Design of Wood and Fiber Composite Materials. Syracuse University Press. USA.

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. USA.



Korai, H.; Adachi, K; Saotome, H. 2012. Deterioration of wood-based boards subjected to outdoor exposure in Tsukuba. *Journal of Wood Science*. Published online September 2012. DOI: 10.1007/s10086-012-1291-5.

Mohebbi, B.; Ilbeighi, F.; Kazemi-Najafi, S. 2008. Influence of hydrothermal modification of fibers on some physical and mechanical properties of medium density fiberboard (MDF). *Holz Roh Werkst.* 66:213-218.

Morlier, P.; Castéra, P.; Bos, F. 1999. Coordonateurs. Les matériaux composites à base de bois. *Revue des composites et des matériaux avancés*. Volume 9. Numéro hors série. Hermes Sciences Publications. France.

Peraza Sánchez, F.; Arriaga Martitegui, F; Peraza Sánchez, J.E. 2004. Tableros de madera de uso estructural. Asociación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho. España.

Rowell, R.M. 2007. Composite Materials from Forest Biomass: A review of Current Practices, Science, and Technology. In: *Materials, Chemicals, and Energy from Forest Biomass: Chapter 5*. Dimitris S. Argyropoulos, Editor. ACS Symposium Series 954. American Chemical society. USA.

Saka, S. 1993. Structure and Chemical Composition of Wood as a Natural Composite Material. In: *Recent Research on Wood and Wood-Based Materials. Current Japanese Materials Research Volume 11*. Elsevier Science Publishers, England, and The Society of Materials Science, Japan.

Smulski, S. Editor. 1997. Engineered Wood Products. A Guide for Specifiers, Designers and Users. PFS Research Foundation. USA.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Arellano García, S. H. 2011. Caracterización mecánica de madera reconstituida. Tableros aglomerados, contrachapados y



enlistonados de madera evaluados con vibraciones transversales. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 7(2):2-32. México.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Correa Olivares, V.E.; García Mariscal, L.J.; Hernández Maldonado, S.A.; Moya Lara, C.E.; Olguín Cerón, J.B.; Zurita Valencia, W. 2011. Caracterización mecánica de madera reconstituida. Tableros aglomerados, contrachapados y enlistonados de madera evaluados con métodos no destructivos. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 7(1):16-35. México.

Stark, N.M.; Cai, Z.; Carll, C.G. 2010. Wood Handbook, Chapter 11: Wood-Based Composite Materials-Panel Products, Glued-Laminated Timber, Structural Composite Lumber, and Wood-Nonwood Composite Materials. General Technical Report FPL-GTR-190. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. USA.

Sun, Y.G.; Arima, T. 1998. Structural mechanics of Wood composites materials I: Ultrasonic evaluation of internal bond strength during an accelerated aging test. *Journal of Wood Science*. 44:348-353.

Tenorio, C.; Moya, R.; Muñoz, F. 2011. Comparative study on physical and mechanical properties of laminated veneer lumber and plywood panels made of Wood from fast-growing *Gemila arborea* trees. *Journal of Wood Science*. 57:134-139.

Villaseñor Aguilar, J.M. 2007. Comportamiento higroelástico de la madera de *Pinus douglasiana*. Evaluado mediante ultrasonido, ondas de esfuerzo, vibraciones transversales y flexión estática. Tesis de Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.



Winandy, J.E.; Kamke, F.A. (Editors). 2004. Fundamentals of composite processing. Proceedings of a workshop. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-149. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. USA.

Wong, E.D.; Zhang, M.; Wang, Q.; Kawai, S. 1999. Formation of the density profile and its effects on the properties of particleboard. *Wood Science and Technology*. 33:327-340.

Wu, Q. 1999. Influence of moisture on stress-wave properties of Wood-based panels. In: proceedings of the Eleventh International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. pp:19-26. Forest Products Society. USA.

Xu, W.; Suchsland, O. 1997. Linear expansion of Wood composites: A model. *Wood and Fiber Science*. 29(3):272-281.

Zhang, M.; Kawai, S.; Sasaki, H. 1994. Production and Properties of Composite Fiberboard I. Influence of Mixing Ratio on Jute/Wood Fiber on the Properties of Boards. *Mokusai Gakkaishi*. 40(8):816-823.



CAPÍTULO 7

Caracterización mecánica en flexión estática.

Resumen

El objetivo de la investigación fue determinar la densidad, el módulo de elasticidad y el módulo de ruptura de tableros de madera aglomerados, contrachapados y enlistonados. Se realizaron pruebas de flexión estática en 66 probetas representativas de una muestra comercial. Se compararon sus valores promedio entre los diferentes tipos de tableros según las direcciones transversal y longitudinal. La densidad de los tableros es mayor en los aglomerados en comparación con los contrachapados, y la menor es para los enlistonados. Los valores promedio de los módulos de elasticidad y de ruptura son distintos para cada tipo de material. El módulo de elasticidad es mayor para los tableros contrachapados, seguido por el de los enlistonados y finalmente el de los aglomerados. El módulo de ruptura fue mayor para los contrachapados, seguido por los aglomerados y los tableros enlistonados con el menor módulo. Los valores promedio de los módulos de elasticidad y de ruptura son distintos según las direcciones transversal y longitudinal, denotando un carácter de anisotropía para los tableros.

Palabras clave: densidad, flexión estática, módulo de elasticidad, módulo de ruptura, anisotropía

Abstract

The objective of the research was to determine the density, the modulus of elasticity and the modulus of rupture of wood particleboard, plywood and blockboard. Static bending tests were performed on 66 specimens representative of commercial samples. The average values among the different types of boards were compared,



according to the transverse and longitudinal directions. The density of the boards is higher on particleboard as compared to plywood, and the lowest is for blockboard. The average values of the moduli of elasticity and of rupture are different for each type of material. The modulus of elasticity is higher for plywood, followed by blockboard and finally particleboard. The modulus of rupture was higher for plywood, followed by particleboard and blockboard with the lower modulus. The average values of the moduli of elasticity and of rupture differ according to the transverse and longitudinal directions, denoting a character of anisotropy for the boards.

Key words: density, static bending, modulus of elasticity, modulus of rupture, anisotropy.

Introducción

Los tableros aglomerados, contrachapados y enlistonados son las tipologías usualmente encontradas en el mercado de placas reconstituidas a partir de material lignocelulósico combinado con un adhesivo, usualmente a base de urea-formaldehído o fenol-formaldehído. Dependiendo del uso específico del tablero, éste puede contener aditivos para aumentar la repelencia al agua y mejorar el comportamiento al fuego, e incrementar la resistencia al ataque de hongos e insectos. Los tableros derivados de la madera se definen como una placa en la que predominan la longitud y el ancho sobre el espesor. Estos productos de madera reconstituida pretenden disminuir las propiedades de anisotropía y de heterogeneidad propios de la madera y encuentran empleo al incorporarse como elementos de soporte en cimbras para la industria de la edificación y como elementos estructurales en armaduras, puertas, escaleras, plafones y muros. Además, los tableros de madera son empleados en muebles y embalajes (Peraza Sánchez *et al.* 2004).

El diseño de productos y estructuras que incorporan en su elaboración madera reconstituida, requiere parámetros técnicos de: la densidad, que es el parámetro



que influye en el peso del producto; el módulo de elasticidad, que es la variable relacionada con las cualidades de estabilidad elástica; y del módulo de ruptura, magnitud necesaria al cálculo para uso estructural de los tableros. Información sobre los procesos de fabricación y acerca de sus propiedades tecnológicas, puede ser consultada, entre otros autores en: Carll (1986), Winandy y Kamke (2004), Peraza Sánchez et al. (2004), Rowell (2007), Cai y Ross (2010) y Stark et al. (2010).

Un tablero aglomerado de partículas de madera, se puede modelar como un material compuesto, formado por un constituyente principal, en este caso partículas de madera, embebidas en una matriz de adhesivo. La interacción y endurecimiento de las partículas de madera y el adhesivo se logran con ayuda de presión y temperatura. Para el caso de un tablero contrachapado, éste se puede definir como un material compuesto de tipo multicapas, formado por delgadas chapas de madera alineadas alternativamente en las direcciones longitudinal y transversal, según la dirección de la fibra, y unidas entre sí con un adhesivo apropiado para el empleo final del tablero. Por su parte, un tablero enlistonado puede ser idealizado como un material compuesto y reconstituido a partir de pequeños paralelepípedos de madera y delgadas capas externas también de madera u otro material. Todos los constituyentes estando adheridos con un pegamento conveniente.

La caracterización mecánica de tableros de madera presenta, entre otras dificultades, la variación en los valores de los parámetros empleados en Diseño e Ingeniería de la Madera. Además de la variabilidad natural de la especie botánica a partir de la cual están confeccionados, las características tecnológicas de los tableros dependen por una parte, de los diferentes niveles de tecnología empleados para su fabricación, y por otra, de la calidad del adhesivo empleado para consolidar su forma e incrementar su rigidez (Peraza Sánchez *et al.* 2004). En consecuencia, para tableros de madera, con calidad y clasificación comercial similares, se encuentran valores de resistencia mecánica muy diferentes.



En México, existe poca información sobre el tema de la caracterización mecánica de tableros de madera. Por una parte, Sotomayor-Castellanos y colaboradores presentan información sobre las características físicas y mecánicas de tableros aglomerados, contrachapados y enlistonados (Sotomayor-Castellanos 2003; Sotomayor-Castellanos y Arellano-García 2011; Sotomayor-Castellanos *et al.* 2011; Sotomayor-Castellanos *et al.* 2012). Respecto a la normativa sobre el tema del uso de tableros de madera en la edificación, el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, en sus Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Madera (Gobierno del Distrito Federal 2004) reporta únicamente valores promedio para el módulo de elasticidad y para la resistencia en flexión para tableros contrachapados de especies coníferas. En el mismo contexto, el Manual de Construcciones ligeras de la Comisión Forestal de América del Norte (Comisión Forestal de América del Norte 1994), refiere valores del módulo de elasticidad y de la resistencia en flexión de tableros de madera, basados en literatura extranjera.

Estos documentos no presentan información actualizada para tableros contrachapados, ni requieren cálculos y/o consideraciones técnicas para tableros aglomerados y enlistonados. De tal forma que el ingeniero y el constructor, quienes emplean tableros de madera adquiridos en el mercado nacional, no tienen acceso a información técnica de productos locales necesaria para el cálculo y diseño de productos y estructuras donde la madera reconstituida es incorporada como componente estructural. Además, y como resultado de la ausencia de información tecnológica actualizada, los tableros son empleados de manera discrecional y de acuerdo a la experiencia del usuario.

Con el objeto de contribuir a la solución de esta problemática, la investigación tuvo como objetivo determinar para tableros aglomerados, contrachapados y enlistonados de madera, los parámetros de densidad, módulos de elasticidad y módulos de ruptura en flexión.



Materiales y métodos

Diseño experimental

Se diseñaron dos experimentos siguiendo las recomendaciones de Gutiérrez-Pulido y de la Vara-Salazar (2012). El primero fue una comparación de medias de los tres parámetros medidos, densidad (ρ), módulo de elasticidad (MOE) y módulo de ruptura (MOR), los cuales se consideran variables de respuesta en cada uno de los tres tipos de tableros estudiados: tableros aglomerados (TA), tableros contrachapados (TC) y tableros enlistonados (TE). El segundo experimento consistió en una comparación de medias de ρ , MOE y MOR, considerados igualmente variables de respuesta, según las dos direcciones de medición en cada tipo de tablero: dirección transversal (T) y dirección longitudinal (L). De esta forma se calcularon las relaciones de anisotropía. Los cálculos estadísticos fueron realizados con el programa *Statgraphycs*®. Para cada uno de los tres parámetros, se corrió una prueba con 33 réplicas para cada una de las dos direcciones y en cada uno de los tres tipos de tablero, totalizando 594 observaciones experimentales. Suponiendo una distribución normal con media cero (\bar{x}) y varianza constante (σ^2) e independientes entre sí, se verificó la hipótesis nula $H_0: \bar{x}_1 - \bar{x}_2 = 0$, y se contrastó con la hipótesis alterna $H_A: \bar{x}_1 - \bar{x}_2 \neq 0$.

El material experimental consistió en tres tableros aglomerados, tres tableros contrachapados y tres tableros enlistonados, adquiridos en un establecimiento comercial especializado en venta de productos forestales, en la ciudad de Morelia, Michoacán, México. Las dimensiones promedio fueron 1,22 m de ancho, 2,44 m de largo y un espesor de 18 mm.

Los tableros aglomerados son catalogados comercialmente como tableros estructurales compuestos por partículas mezcladas de madera de varias especies del género *Pinus*. Los tableros contrachapados están compuestos de siete capas de madera del género *Pinus*. Los tableros enlistonados están armados por listones



de madera del género *Pinus*, de sección cuadrada de 15 mm de arista y recubiertos en sus dos caras con chapas de madera de *Cedrela* spp., cada una de 1,5 mm de espesor.

Las probetas fueron marcadas y recortadas de acuerdo a la metodología de Sotomayor-Castellanos (2003). De esta forma, se obtuvieron once probetas recortadas en la dirección paralela y once probetas recortadas en la dirección perpendicular al largo de cada tablero, dando un total de 66 probetas por tipo de tablero. Las probetas recortadas se acondicionaron durante 60 días con una temperatura de 20 °C y humedad relativa de 65 %.

La densidad de los tableros se calculó con la fórmula (Bodig y Jayne 1982):

$$\rho = \frac{W_H}{V} \quad (1)$$

Donde:

ρ = Densidad (kg/m³)

w_H = Peso de la probeta al momento del ensayo (kg)

v = Volumen de la probeta al momento del ensayo (m³)

El contenido de humedad se calculó con la fórmula (Bodig y Jayne 1982):

$$CH = \frac{W_H - W_0}{W_0} \quad (2)$$

Donde:

CH = Contenido de humedad (%)

w_H = Peso de la probeta al momento del ensayo (kg)

w_0 = Peso de la probeta en estado seco (kg)



Las pruebas de flexión consistieron en observar el proceso de carga-deformación, midiendo la carga (P) aplicada en medio de la portada de flexión (L) (670 mm) y la deflexión (y) medida igualmente en $L/2$ (Figuras 1 y 2). Se realizaron dos cargas: la primera, de carácter no destructivo, comprendió una precarga menor a 100 N, correspondiente al 10 % del esfuerzo al límite elástico (ELE), después de la cual se calculó en el dominio elástico el módulo de elasticidad (MOE) en un intervalo entre 10 % y 20 % del ELE, después de descargar la probeta, se procedió con una segunda carga continua hasta la ruptura, donde se midió la carga a la ruptura (P_r). Las pruebas fueron realizadas en una máquina universal de ensayos mecánicos *Tinius-Olsen®*, utilizando una velocidad de desplazamiento de la carga de 0,05 mm/s.



Figura 1. Pruebas de flexión estática.

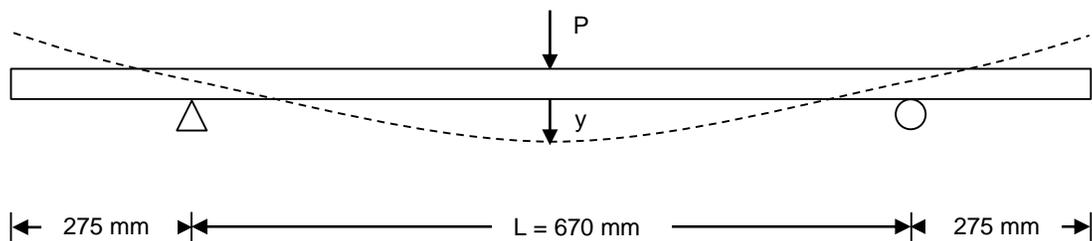


Figura 2. Configuración de las pruebas de flexión estática. P : Carga; y : Deformación.



El módulo de elasticidad se calculó con la fórmula (Bodig y Jayne 1982):

$$\text{MOE} = \frac{P}{y} \frac{L^3}{48 I} \quad (3)$$

Donde:

MOE = Módulo de flexión en flexión estática (Pa)

P = Carga (N)

L = Portada de flexión (m)

y = Deflexión (m)

I = Momento de inercia de la sección transversal de la probeta (m⁴)

El módulo de ruptura se calculó con la fórmula (Bodig y Jayne 1982):

$$\text{MOR} = \frac{3}{2} \frac{P_r L}{b h^2} \quad (4)$$

Donde:

MOR = Módulo de ruptura en flexión estática (Pa)

P_r = Carga a la ruptura (N)

L = Portada de flexión (m)

b = ancho de la probeta (m)

h = Grueso de la probeta (m)

Resultados y análisis

La Tabla 1 presenta, la densidad básica, el módulo de elasticidad y el módulo de ruptura para las direcciones transversal (T) y longitudinal (L), y para el promedio de las dos direcciones (TL) de los tableros aglomerados, contrachapados y enlistonados.



Tabla 1. Densidad, módulo de elasticidad y módulo de ruptura para tableros aglomerados, contrachapados y enlistonados de madera.

	Dirección transversal			Dirección longitudinal			Transversal+Longitudinal		
	ρ kg/m ³	MOE _T MPa	MOR _T MPa	ρ kg/m ³	MOE _L MPa	MOR _L MPa	ρ kg/m ³	MOE _{TL} MPa	MOR _{TL} MPa
Tableros aglomerados CH = 7,22 %									
\bar{x}	628	3140	32,33	630	3353	32,24	629	3247	32,28
σ	1,96	131	1,02	4,99	105	1,63	3,93	160	1,35
CV	0,01	0,04	0,03	0,01	0,03	0,05	0,01	0,05	0,04
Tableros contrachapados CH = 10,35 %									
\bar{x}	532	3136	33,02	532	7246	60,67	532	5191	46,85
σ	9,06	361	4,25	14,67	359	4,91	12	2101	14,66
CV	0,02	0,12	0,13	0,03	0,05	0,08	0,02	0,40	0,31
Tableros enlistonados CH = 8,45 %									
\bar{x}	466	3888	26,17	463	5339	31,75	464	4613	28,96
σ	10,30	814	5,22	15,32	741	6,81	13,00	1063	6,65
CV	0,02	0,21	0,20	0,03	0,14	0,21	0,03	0,23	0,23

CH: Contenido de humedad; ρ : Densidad; MOE; Módulo de elasticidad; MOR: Módulo de ruptura; T: Transversal; L: Longitudinal; \bar{x} : Media; σ : Desviación estándar; CV: Coeficiente de variación.

Contenido de humedad

El contenido de humedad representa el porcentaje del peso del agua retenida por el tablero en relación a su peso total. En este caso, los valores de resistencia elástica y de ruptura, están referidos a un contenido de humedad en el material que corresponde a una temperatura de 20 °C y una humedad relativa de 65 %. La variación en el contenido de humedad de un tablero o material compuesto de madera, modifica los parámetros físicos de estos materiales de manera similar y proporcional a los de la madera de la cual están constituidos. No obstante que los tres tipos de tableros fueron expuestos a las mismas condiciones de temperatura, humedad relativa del aire y durante un periodo de tiempo similar, el intervalo entre el CH mínimo y el máximo es de 3.13 %.

Las diferencias pueden explicarse, en el caso de los aglomerados, porque su composición contiene una proporción importante de adhesivo, sustancia repelente al agua, además de que las partículas de madera están mecánicamente comprimidas, de tal forma que es difícil que retengan humedad. En el caso de los



contrachapados y enlistonados, la cantidad de materia leñosa de chapas y listones de madera con capacidad para retener humedad, representa una proporción importante en relación a la masa del pegamento, de tal forma que estos tableros pueden retener más humedad comparativamente con los tableros aglomerados. Los valores de CH tabulados en la Tabla 1 se sitúan dentro de los rangos referidos en la normativa estadounidense para tableros de uso estructural (Carll 1986) y en la europea (Peraza Sánchez *et al.* 2004). La normativa nacional (Gobierno del Distrito Federal 2004) y los documentos mexicanos relacionados con la construcción (Comisión Forestal de América del Norte 1994) no hacen mención al contenido de humedad de tableros de madera como parámetro en el diseño de productos o para el cálculo estructural.

Densidad

El valor de la densidad de los tableros, es menor en los enlistonados, aumenta en los contrachapados y es mayor en los aglomerados (Tabla 1). La magnitud de sus coeficientes de variación se sitúa al interior de los rangos presentados en la literatura (Peraza Sánchez *et al.* 2004). Sus coeficientes según el tipo de tablero, denotan importantes diferencias entre grupos (Tabla 2).

Tabla 2. Cocientes según el tipo de tablero y relaciones de anisotropía.

Densidades según el tipo de tablero					
$\frac{\rho_A}{\rho_C}$	$\frac{\rho_A}{\rho_E}$	$\frac{\rho_C}{\rho_A}$	$\frac{\rho_C}{\rho_E}$	$\frac{\rho_E}{\rho_A}$	$\frac{\rho_E}{\rho_C}$
1,18	1,35	0,85	1,14	0,74	0,86
Módulos según el tipo de tablero					
$\frac{MOE_A}{MOE_C}$	$\frac{MOE_A}{MOE_E}$	$\frac{MOE_C}{MOE_E}$	$\frac{MOR_A}{MOE_C}$	$\frac{MOR_A}{MOR_E}$	$\frac{MOR_C}{MOR_E}$
0,63	0,70	1,13	0,69	1,11	1,62
Módulos según la dirección de observación					
Aglomerados		Contrachapados		Enlistonados	
$\frac{MOE_L}{MOE_T}$	$\frac{MOR_L}{MOR_T}$	$\frac{MOE_L}{MOE_T}$	$\frac{MOR_L}{MOR_T}$	$\frac{MOE_L}{MOE_T}$	$\frac{MOR_L}{MOR_T}$
1,07	0,99	2,31	1,84	1,37	1,21

ρ : Densidad; MOE; Módulo de elasticidad; MOR: Módulo de ruptura; A: Aglomerados; C: Contrachapados; E: Enlistonados; L: Longitudinal; T: Transversal



Estos resultados se pueden explicar por el hecho de que la densidad, como parámetro intensivo, representa la combinación del peso de los diferentes materiales de que está compuesto el tablero, en este caso madera en forma de partículas, chapas y/o listones de madera, más el adhesivo y los aditivos, en relación a su volumen.

Para el caso de los tableros aglomerados, el porcentaje del peso correspondiente al adhesivo y el endurecedor, puede representar hasta el 24 % del peso del material fibroso (Sotomayor-Castellanos *et al.* 2006). Para los tableros contrachapados y enlistonados, la proporción en peso de adhesivo y aditivo varían de acuerdo al número y acomodo de las chapas y/o listones del tablero, lo cual resulta en la cantidad de superficie de contacto entre los componentes de la estructura interna de los tableros, los cuales es necesario adherir. Coincidiendo con Smulski (1997), cuando se diseña un producto o se calcula un componente estructural con madera reconstituida, es recomendable considerar una densidad diferente para cada tipo de tablero.

Módulo de elasticidad

Los valores del módulo de elasticidad son distintos para cada tipo de tablero. Estas diferencias no muestran un arreglo definido. El coeficiente de variación es mayor para los tableros enlistonados, seguido por los contrachapados y menor para los aglomerados (Tabla 1). Sus cocientes entre parámetros y sus relaciones de anisotropía varían tanto para el tipo de tablero, como para la dirección de observación (Tabla 2), denotando un carácter anisotrópico en el plano transversal-longitudinal en los tableros contrachapados y enlistonados. Este resultado puede explicarse por el acomodo de las capas y listones de madera que transmiten sus propiedades de anisotropía al tablero. La magnitud de los valores promedio del módulo de elasticidad permite establecer la relación: $TC > TE > TA$.



La estructura interna de los tableros aglomerados puede modelarse como la de un material compuesto, homogéneo y con densidad uniforme (Figura 3). De tal forma, que la relación de anisotropía MOE_L/MOE_T es menor comparada con la de los tableros contrachapados y enlistonados (Tabla 2). En efecto, los tableros contrachapados pueden idealizarse como un material compuesto y multicapas, que si bien sus propiedades materiales son homogéneas en el plano formado por las direcciones transversal y longitudinal del tablero, éstas no lo son a través de su espesor (Figura 3).

El argumento anterior implica que el MOE de un contrachapado es función de las propiedades de la madera de la cual está constituida cada capa del tablero, ponderado con el efecto del adhesivo y del aditivo. En este caso, el módulo de elasticidad en flexión de cada chapa controla la deformación local del tablero según el número y arreglo en el tablero. De tal forma, que en la dirección longitudinal el módulo de elasticidad es más grande en relación al MOE en la dirección transversal. Este resultado es importante cuando el diseño de un producto o estructura de madera requiere el acomodo u orientación específicos de un tablero contrachapado.

Para el caso de los tableros enlistonados, el argumento anterior puede también aplicarse, pero en relación a las propiedades mecánicas de la especie de la cual están fabricados los listones. En la configuración de la estructura interna de estos tableros predomina la dirección longitudinal de los elementos de madera sólida, de tal forma que su acomodo forma una placa compuesta por elementos de dimensiones que no pueden considerarse partículas o pliegues de madera. Así, que las propiedades de anisotropía del módulo de elasticidad de la especie que conforma los listones, serán transferidas al comportamiento global del tablero, de acuerdo con Bodig y Jane (1982).

Como corolario, las relaciones de anisotropía entre las direcciones transversal y longitudinal del módulo de elasticidad, presentadas en la Tabla 2, son diferentes a la unidad, dependiendo del tipo de tablero en cuestión.



Módulo de ruptura

El módulo de ruptura de los tres tableros denota una variación similar a la de los valores del módulo de elasticidad (Tabla 1). Es difícil distinguir una tendencia general correspondiente al tipo de tablero o a la dirección de observación.

Los valores del MOR en la dirección longitudinal son mayores que los valores para la dirección transversal, excepto para el cociente de anisotropía MOR_L/MOR_T de los tableros aglomerados (Tabla 2). En efecto, parece ser que el tipo y el acomodo espacial a nivel local de los componentes que conforman cada tipo de tablero transmiten sus propiedades a todo el tablero. De acuerdo a la Figura 3, los tableros aglomerados presentan uniformidad en la distribución de las partículas, adhesivo y aditivos en el plano formado por las direcciones longitudinal y transversal, las cuales forman la superficie del tablero. De tal forma, que su resistencia a la ruptura no denota una diferencia significativa entre las direcciones L y T (Tabla 4).

Por su parte, los tableros contrachapados presentaron valores del MOR mayores respecto a los tableros aglomerados y enlistonados (Tabla 2). Además, los valores promedio del MOR de los tableros enlistonados fueron menores comparativamente con los de los otros tableros. Como resultado, la magnitud del módulo de ruptura de los tres tipos de tableros estudiados presenta la relación: $TC > TE > TA$. De acuerdo con la normativa estadounidense para tableros de uso estructural (Carll 1986) y la europea (Peraza Sánchez *et al.* 2004), los valores del MOR clasifican a los tres tipos de tableros como de uso estructural.

Resumiendo, los valores de los módulos de elasticidad y de ruptura de los tres tipos de tableros, son superiores a los recomendados por la Asociación Americana de Madera de Ingeniería (APA- The Engineered Wood Association 2011) para usos estructurales. Sin embargo, para su utilización práctica, es necesario considerar si los tableros están fabricados con los aditivos necesarios para su uso en componentes que están expuestos al Intemperismo u otros agentes de deterioro.



Relaciones de anisotropía

La Figura 3 propone las diferentes direcciones favorecidas en la estructura interna de los tableros. Los tableros enlistonados presentan un acomodo de los listones que favorece la dirección longitudinal de la madera. Los tableros contrachapados equilibran la anisotropía natural de la madera sólida al funcionar como un material compuesto por placas adheridas perpendicularmente. Aun así, los tableros contrachapados denotan una fuerte anisotropía entre el plano formado por las direcciones perpendicular y longitudinal, en relación a la dirección transversal o espesor del tablero. Los tableros aglomerados reconstituyen completamente la configuración natural de la madera en un material reconstituido por pequeñas partículas y adhesivo. De tal forma que los módulos determinados reflejan la constitución y acomodo de cada tipo de tablero estudiado.

Las relaciones de anisotropía entre los módulos de elasticidad y de ruptura según las direcciones longitudinal y transversal de los tableros, confirman la propiedad de anisotropía en el plano longitudinal-transversal de las propiedades mecánicas de la madera reconstituida, resultados que son congruentes con las relaciones de anisotropía para tableros de madera indicadas en la norma de la Asociación Americana de Madera de Ingeniería (APA- The Engineered Wood Association 2011) y propuestas por Sotomayor-Castellanos y colaboradores (Sotomayor-Castellanos 2003; Sotomayor-Castellanos y Arellano-García 2011; Sotomayor-Castellanos *et al.* 2011).

De acuerdo al diseño experimental, la Tabla 3 presenta los resultados del análisis de diferencia de medias según el tipo de tablero. Igualmente, la Tabla 4 indica los resultados de la prueba de comparación de medias según la dirección de medición en el tablero. En las Tablas 3 y 4, sí el valor P calculado correspondiente al estadístico t es menor que 0,05, se puede rechazar la hipótesis nula $H_0: \bar{x}_1 - \bar{x}_2 = 0$, en favor de la alterna $H_A: \bar{x}_1 - \bar{x}_2 \neq 0$, es decir, existe una diferencia significativa entre las dos medias para un nivel de confianza de 95 %.



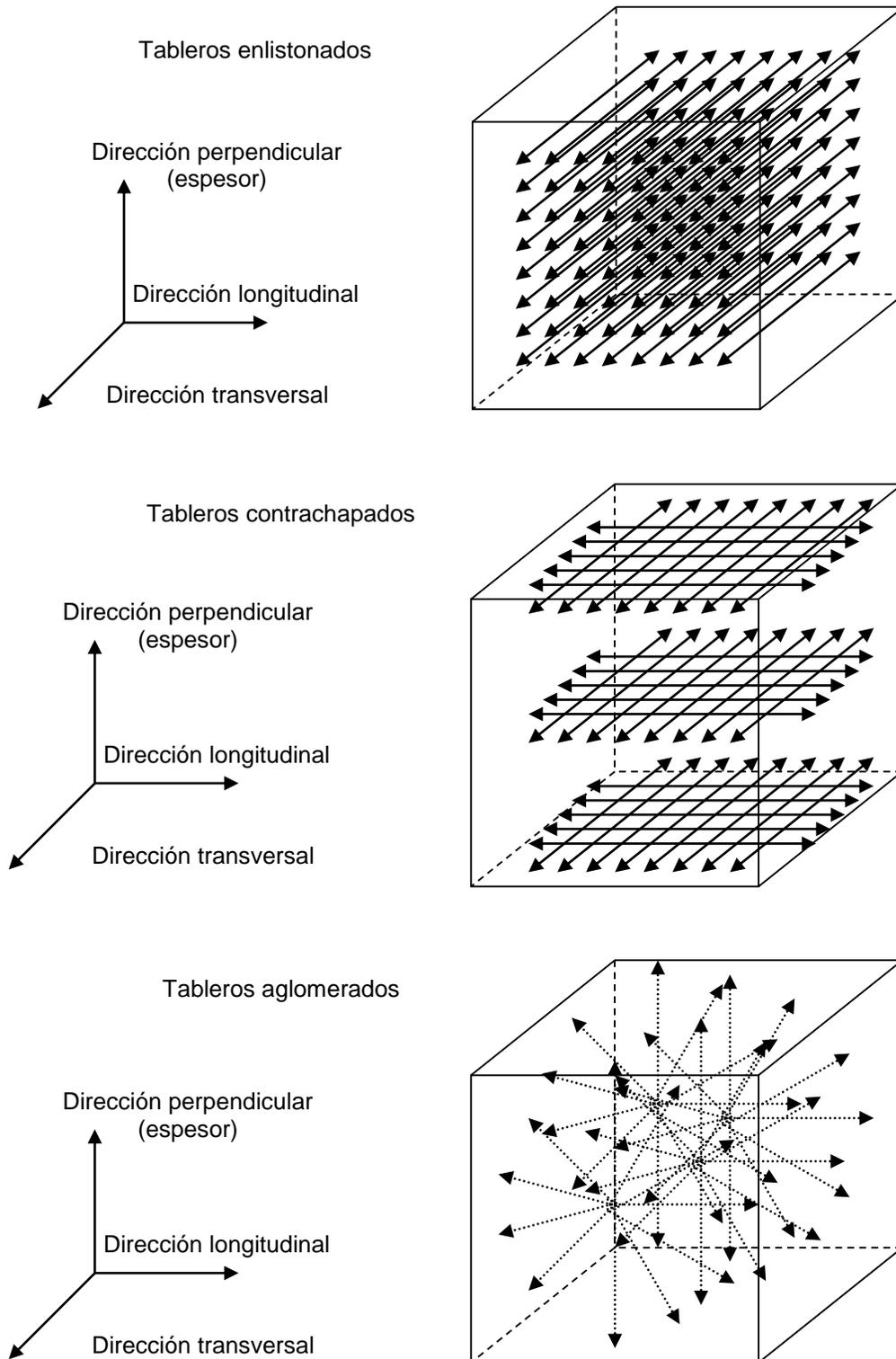


Figura 3. Direcciones favorecidas en la estructura interna de los tableros (Sotomayor-Castellanos *et al.* 2012).



Tabla 3. Comparación de medias según el tipo de tablero.

		Tableros contrachapados		Tableros enlistonados	
		$t_{\alpha=0.05}$	Valor- P	$t_{\alpha=0.05}$	Valor- P
ρ	Tableros aglomerados	61,769	< 0,001	98,013	< 0,001
	Tableros contrachapados	-	-	30,727	< 0,001
MOE	Tableros aglomerados	-7,495	< 0,001	-10,329	< 0,001
	Tableros contrachapados	-	-	1,993	0,0484
MOR	Tableros aglomerados	-8,038	< 0,001	3,978	< 0,001
	Tableros contrachapados	-	-	9,028	< 0,001

ρ : Densidad; MOE; Módulo de elasticidad; MOR: Módulo de ruptura.

Con excepción de la diferencia entre medias entre tableros contrachapados y enlistonados, donde el valor- P es cercano a 0,05, los valores promedio de la densidad y los módulos de elasticidad y de ruptura pueden considerarse significativamente diferentes (Tabla 3). Este resultado sugiere que para fines de cálculo y diseño de productos y estructuras de madera, debe considerarse cada tipo de tablero, con características físicas y mecánicas específicas.

En el mismo contexto, los resultados de la Tabla 4 proponen que solamente el módulo de ruptura para los tableros aglomerados no presenta una diferencia significativa entre las direcciones longitudinal y transversal, esto es debido a su estructura interna discutida anteriormente. Es decir, los tableros de madera tienen características mecánicas con carácter anisotrópico en el plano longitudinal-transversal. De tal suerte, que para fines de cálculo y diseño de productos y estructuras de madera, deben considerarse, sus módulos de elasticidad y de ruptura, como específicos según la dirección de observación en el plano longitudinal-transversal en cada tipo de tablero.

Tabla 4. Comparación de medias según la dirección de medición en el tablero.

	Dirección longitudinal					
	ρ		MOE		MOR	
	$t_{\alpha=0.05}$	Valor- P	$t_{\alpha=0.05}$	Valor- P	$t_{\alpha=0.05}$	Valor- P
Dirección transversal	Tableros aglomerados					
	-2,489	0,015	7,274	< 0,001	-0,275	0,785*
	Tableros contrachapados					
	0,060	0,952*	46,392	< 0,001	24,441	< 0,001
	Tableros enlistonados					
	-0,685	0,496*	7,572	< 0,001	27,641	< 0,001

ρ : Densidad; MOE; Módulo de elasticidad; MOR: Módulo de ruptura.

* No existe diferencia significativa entre las dos medias para un nivel de confianza de 95 % ($t_{\alpha=0.05}$).



Conclusiones

El acomodo relativo de las partículas, chapas y listones que conforman los tableros de madera aglomerados, contrachapados y enlistonados, modifica de manera significativa los valores promedio de su densidad, de su módulo de elasticidad y de su módulo de ruptura. Para fines de cálculo y diseño de productos y estructuras de madera, debe considerarse cada tipo de tablero, con características físicas y mecánicas específicas.

Los valores promedio de la densidad, del módulo de elasticidad y del módulo de ruptura, varían significativamente entre las direcciones transversal y longitudinal de cada tipo de tablero. Sus módulos de elasticidad y de ruptura, deben considerarse como específicos según la dirección de observación en el plano transversal-longitudinal.

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.

Referencias

APA-The Engineered Wood Association. (2011). "Voluntary Product Standard PS-210, Performance Standard for Wood-Based Structural-Use Panels", APA-The Wood Engineered Association, USA.

Bodig J., Jayne B.A. (1982). "Mechanics of Wood Composites", Van Nostrand Reinhold, USA.



Cai Z., Ross R.J. (2010). Mechanical Properties of Wood-Based Composite Materials, Chapter 12. En “Wood Handbook, General Technical Report FPL-GTR-190”, Forest Products Laboratory. (ed.), 12-1-12-12. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, USA.

Carll C.G. (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, USA.

Comisión Forestal de América del Norte. (1994). “Manual de Construcción de Estructuras Ligeras de Madera”, Consejo Nacional de la Madera en la Construcción, México.

Gobierno del Distrito Federal. (2004). “Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Madera”, Gaceta Oficial Del Distrito Federal, Tomo I No. 103-Bis, 54-87. México.

Gutiérrez Pulido H., de la Vara Salazar R. (2012). “Análisis y diseño de experimentos”, 3a ed., Mc Graw Hill, México.

Peraza Sánchez F., Arriaga Martitegui F., Peraza Sánchez J.E. (2004). “Tableros de madera de uso estructural”, Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho, Madrid, España.

Rowell R.M. (2007). Composite Materials from Forest Biomass: A review of Current Practices, Science, and Technology, Chapter 5. En “Materials, Chemicals, and Energy from Forest Biomass”, Dimitris S. Argyropoulos (ed.), 76-92, ACS Symposium Series 954. American Chemical Society. USA.



Smulski, S. (1997). (Ed.). "Engineered Wood Products. A Guide for Specifiers, Designers and Users", PFS Research Foundation, Wisconsin, USA.

Sotomayor Castellanos J.R. (2003). Caracterización Mecánica de madera reconstituida: Módulo de Elasticidad de Tableros de Partículas de Madera evaluado con métodos no destructivos. "Maderas: Ciencia y Tecnología", (5)1, 20-43.

Sotomayor Castellanos J.R., Ohashi K., Hatano Y., Shibusawa T. (2006). Influencia del Perfil de densidad en las propiedades mecánicas y físicas de tableros de fibra de madera. "Investigación e Ingeniería de la Madera", 2(1), 3-36.

Sotomayor Castellanos J.R., Arellano García S.H. (2011). Caracterización mecánica de madera reconstituida. Tableros aglomerados, contrachapados y enlistonados de madera evaluados con vibraciones transversales. "Investigación e Ingeniería de la Madera", 7(2), 3-31.

Sotomayor Castellanos J.R., Correa Olivares V.E., García Mariscal L.J., Hernández Maldonado S.A., Moya Lara C.E., Olgún Cerón J.B., Zurita Valencia W. (2011). Caracterización mecánica de madera reconstituida. Tableros aglomerados, contrachapados y enlistonados de madera evaluados con métodos no destructivos. "Investigación e Ingeniería de la Madera", 7(1), 16-35.

Sotomayor Castellanos J.R., Hernández Corona E., Pérez López M., Soto Rangel D. (2012). Caracterización mecánica de madera reconstituida. Tableros aglomerados, contrachapados y enlistonados de madera. Higro-contracción e higro-expansión. "Investigación e Ingeniería de la Madera", 8(1), 3-22.

Stark N.M., Cai Z., Carll C.G. 2010. Wood-Based Composite Materials-Panel Products, Glued-Laminated Timber, Structural Composite Lumber, and Wood-Nonwood Composite Materials, Chapter 11. En "Wood Handbook, General



Technical Report FPL-GTR-190”, 11-1-11-28. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, USA.

Winandy J.E., Kamke F.A. (Eds.). (2004). “Fundamentals of composite processing. Proceedings of a workshop. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-149”, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, USA.



CONCLUSIONES

Capítulo 1 Influencia del Perfil de densidad en las propiedades mecánicas y físicas de tableros de fibra de madera.

La influencia del Perfil de densidad en las propiedades mecánicas y físicas de tableros de fibra de madera de media densidad fueron investigados utilizando métodos de evaluación normalizados y de carácter no destructivo.

La velocidad de prensado en la manufactura de tableros de fibra de madera de media densidad influye de manera significativa en la formación de su Perfil de densidad: Velocidades altas (10 mm/s) y medias (2 mm/s) produjeron perfiles tradicionales en forma de “U” y valores mayores de Densidades pico en comparación con el prensado de velocidad baja (0.5 mm/s) y el de dos velocidades (10 y 2 mm/s) que formaron Perfiles de densidad más homogéneos.

Los tratamientos de velocidades media y alta, proporcionaron valores de resistencia mecánica del Módulo de Elasticidad en flexión estática, del Módulo de Ruptura en flexión, del Módulo dinámico por Ultrasonido y de la Resistencia Interna en el sentido transversal al espesor de los tableros, mayores a los obtenidos con los tratamientos de velocidad baja y de dos velocidades.

Igualmente, los tratamientos de velocidades media y alta, proporcionaron valores de Absorción y de Variación dimensional menores a los obtenidos con los tratamientos de velocidad baja y de dos velocidades.

La velocidad del sonido en los tableros estudiados se relacionó proporcionalmente con las propiedades de resistencia. Fue confirmada la utilidad del ultrasonido en la evaluación del Modulo de Elasticidad dinámico en tableros con diferentes Perfiles de densidad.



El desarrollo de pruebas de laboratorio y el estudio de las propiedades mecánicas y físicas de tableros de fibra de madera revelan una respuesta más realista en condiciones de servicio y de esta manera los resultados de investigación pueden encontrar utilidad para el establecimiento de normas y estándares de calidad que contribuyan a su comercialización y correcta utilización como material de Ingeniería.

Capítulo 2 Módulo de elasticidad y resistencia interna de tableros de Picea abies con adhesivos a base de soya y de trigo.

A partir de los resultados de la investigación, se deduce que el tipo de adhesivo a base de proteínas de soya o de trigo utilizado en tableros armados con tabletas de madera de Picea abies, influyen de manera diferente según el esfuerzo al cual son sometidos. Para los esfuerzos de transmisión de ondas mecánicas, como los aplicados durante las pruebas de ultrasonido y de ondas de esfuerzo, la influencia es mínima. En contraste para las pruebas donde los esfuerzos de vibración son transversales al plano de aplicación del pegamento, como es el caso de las pruebas de vibraciones transversales el tipo de pegamento es un factor importante de variación.

Capítulo 3 Módulo de elasticidad de tableros de partículas de madera evaluado con métodos no destructivos.

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 Modulo 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 Modulo de Elasticidad en la dirección Transversal a la línea de producción, es superior al Modulo 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 avenir 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.

Capítulo 4 Caracterización mecánica con métodos no destructivos.

Los valores de la velocidad del ultrasonido y de las ondas de esfuerzo, así como los valores de sus parámetros derivados: módulo de elasticidad, índice de calidad e índice material, fueron determinados experimentalmente para diferentes materiales



a base de madera reconstituida: tableros aglomerados, contrachapados y enlistonados.

Estos resultados son útiles para la caracterización técnica de estos materiales de construcción y para su empleo en diseño de productos y para el cálculo de estructuras en Ingeniería de la Madera.

El tipo, forma y acomodo de los diferentes componentes que forman los tableros de madera, influyen en los valores de sus características tecnológicas.

En un tablero de madera, como los estudiados en esta investigación, las propiedades de anisotropía material y elástica de la madera sólida y en su defecto de chapas de madera y/o astillas, influyen en los resultados de acuerdo a su orientación en la fabricación de los tableros.

Capítulo 5 Caracterización mecánica con vibraciones transversales.

Las pruebas de vibraciones transversales realizadas en tableros enlistonados, contrachapados y aglomerados, resultaron útiles para la caracterización mecánica de estas maderas reconstituidas.

Cada tipo de tablero presentó características físicas y mecánicas propias y relacionadas preferentemente con la dirección relativa al plano del tablero de que se trate. Estas diferencias pueden ser atribuidas entre otros factores, a la estructura interna de los tableros, independientemente de su especie, proceso de elaboración y/o calidad del agente aglutinante. Para fines de Diseño y Cálculo estructural, es recomendable considerar la orientación en la cual el elemento en cuestión trabajará en condiciones de servicio.

Capítulo 6 Higo-contracción e higo-expansión.

Las contracciones y expansiones ocasionadas por la adquisición o pérdida de humedad, son mayores en la dirección transversal de los tres tipos de tableros, es



decir en el espesor, en comparación con la variación en las direcciones perpendicular y longitudinal de los tableros

Los tableros aglomerados adquirieron más humedad en comparación con los tableros enlistonados y contrachapados. Sin embargo, para el caso del coeficiente de higo-expansión, en el ensayo de 24 horas, los tableros contrachapados presentaron una mayor dilatación en comparación con los otras tipos de tableros estudiados.

La variación dimensional de todos los tableros y en las tres direcciones observadas no fue necesariamente lineal. A manera de recomendación, es necesario realizar este tipo de pruebas pero con intervalos de medición más estrechos y secuenciales, de tal forma que se puedan estimar las tendencias que relacionen los parámetros de variación dimensional y la evolución del contenido de humedad de madera reconstituida.

Capítulo 7 Caracterización mecánica en flexión estática.

El acomodo relativo de las partículas, chapas y listones que conforman los tableros de madera aglomerados, contrachapados y enlistonados, modifica de manera significativa los valores promedio de su densidad, de su módulo de elasticidad y de su módulo de ruptura. Para fines de cálculo y diseño de productos y estructuras de madera, debe considerarse cada tipo de tablero, con características físicas y mecánicas específicas.

Los valores promedio de la densidad, del módulo de elasticidad y del módulo de ruptura, varían significativamente entre las direcciones transversal y longitudinal de cada tipo de tablero. Sus módulos de elasticidad y de ruptura, deben considerarse como específicos según la dirección de observación en el plano transversal-longitudinal.

