



Revista de la Construcción

ISSN: 0717-7925

revistadelaconstruccion@uc.cl

Pontificia Universidad Católica de Chile
Chile

GARAY, M.; SILVA, S.

Comportamiento de tableros a base de madera, durante ensayos de atenuación ultrasónica

Revista de la Construcción, vol. 10, núm. 3, diciembre, 2011, pp. 41-51

Pontificia Universidad Católica de Chile

Santiago, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=127622721005>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

*Behavior of wood based
panel during ultrasonic
attenuation testing*

Comportamiento de tableros a base de madera durante ensayos de atenuación ultrasónica



Autores

GARAY, M. Departamento de Ingeniería de la Madera,
Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile
rgaray@uchile.cl

SILVA, S. Ingeniero de la Madera, Departamento de Ingeniería de la
Madera, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile
msilvasanchez@gmail.com

Fecha de recepción 22/06/2011
Fecha de aceptación 17/11/2011

Resumen

A partir de la normativa vigente en confort térmico y acústico, la madera y los tableros a base de madera presentan ventajas indiscutibles respecto de otros materiales, tales como ladrillo y hormigón. En relación a lo anterior, se plantea caracterizar el comportamiento de atenuante acústico como predictor de cuatro tipos de tableros, mediante la determinación de la atenuación ultrasónica expresada en decibeles. Se establece una metodología de predicción del comportamiento acústico de los materiales en base al posicionamiento de un esquema de transductor emisor y receptor, el cual permite propagaciones de un haz ultrasónico conocido a través de una dirección específica. El comportamiento de propagación de dicha fuente sonora es definido por las estructuraciones internas, composición y distribución de elementos constitutivos. Las frecuencias ultrasónicas utilizadas

fueron 0.1 y 0.5 mHz. Los cuatros tipos de tableros ensayados fueron contrachapado, partículas, hojuelas (OSB) y fibras. Los resultados permiten establecer la importancia y aplicabilidad técnica de la metodología no destructiva utilizada, como también atribuir los distintos niveles de heterogeneidad presente en cada tablero como principal indicador de los distintos comportamientos acústicos. El grado de heterogeneidad presente en cada tablero a nivel de estructura interna, explicó significativamente el comportamiento de la atenuación ultrasónica en tableros contrachapados y OSB, representando así mejores soluciones constructivas desde el punto de vista acústico. El grado de compactación asociado a fibras o partículas pequeñas establece medios continuos de alta densidad y homogéneos, lo que se asocia a altos niveles de propagación, por ende, de baja aislación acústica.

Palabras clave: Evaluación no destructiva, tableros, aislación acústica, atenuación ultrasónica.

Abstract

Based on current regulations into acoustic and thermal comfort of housing, the wood and woods panels have indisputable advantages over other materials, such as, brick, and concrete. Thus, proposes to assess acoustic attenuation as a predictor of behavior of four kind of woods panel, by measuring the ultrasonic attenuation expressed in decibels. Establishing a methodology of acoustical prediction behavior of materials based on a transmitter and receiver transducer positioning schedule, which allows a known ultrasonic propagation through a specific direction. Propagation behavior of the sound source is defined by the internal structure, composition and distribution of elements. The ultrasonic frequencies used were 0.1 and 0.5 mHz. Four kind

woods panel studied were: ply wood, particleboard, oriented strand board (OSB), fiberboard panel. The results indicate the importance and technical applicability of the nondestructive methodology used, also attribute the different levels of heterogeneity present in each board as the main indicator of the different acoustic behavior. The degree of heterogeneity present in each board-level internal structure, significantly explained the behavior of ultrasonic attenuation in plywood and OSB, representing best constructive solutions from the acoustic point of view. The degree of compaction or fibers associated with small particles streaming media provides high density and homogeneous, which is associated with high levels of propagation, hence low acoustic insulation

Key words: *Non-destructive testing, panel, acoustic insulation, ultrasonic attenuation.*

Introducción

En la actualidad la madera y los tableros a base de madera en Chile cumplen con la gran mayoría de las exigencias constructivas modernas en tecnología, en economía y disponibilidad. Se fabrican mayoritariamente a partir de madera de pino radiata, tanto para tableros contrachapados (Arauco 2011), tableros de partículas, MDF (Masisa 2011), OSB (Lp Chile, 2011) y últimamente el CLT (Cross Laminated Timber) y el LVL (Laminated veneer lumber), ambos descritos en Lignum (2011).

Así que cuando existe la necesidad de utilizar materiales sustentables y particularmente amigables ambientalmente, en donde adquiere interés la huella de carbono, el confort térmico y los créditos de certificación LEED, se abren más y nuevas posibilidades para la madera y los tableros, cumpliendo un rol como elementos estructurales y aportando en materia acústica y térmica.

Entonces, los tableros, especialmente de uso estructural y los productos de ingeniería en madera, tienen mayor impacto en la masificación de la madera como material sustentable en la construcción de viviendas en el país, según se describe en Garay (2009a, b y c) y Lignum (2001).

La evaluación no destructiva de materiales (NDT) constituye una importante herramienta para la caracterización de la madera, aplicable a procesos de control de calidad industrial de productos y materias primas (Ericsson *et al.* 2002). Investigaciones en base a NDT en madera y productos a base de madera, integran mediciones de propiedades físico-mecánicas, clasificación de materiales y monitoreo de defectos en árboles en pie, madera elaborada y productos compuestos (Kawamoto y Williams 2002).

La aplicabilidad del uso del ultrasonido, como técnicas convencionales sobre niveles de frecuencia ultrasónicas (AU), permiten determinar la presencia de defectos pequeños y asociarlos a variaciones de algunas propiedades en madera o materiales compuestos a base de madera, el caso de este último material, enfocado a la evaluación del comportamiento de uniones adhesivas (ASTM E1495). El uso de ultrasonido como medio de estudio de materiales compuestos se sustenta en la transmisión y reflexión de la onda sonora (Campbell 2005).

Entre los factores que inciden en la determinación de la atenuación ultrasónica en sólidos, se considera importante la geometría del medio irradiado y la dis-

persión y absorción de la energía ultrasónica debido a las características internas del sólido (Bucur and Bohnke 1994). La señal de llegada se ve afectada por múltiples reflexiones e interacciones asociadas a la estructuración interna del material entre la fuente emisora y receptora (Kawamoto y Williams 2002).

Por otro lado, al pasar la onda de sonido desde el aire a cuerpos sólidos, se produce un debilitamiento de la onda sonora debido a un cambio de medio. Aplicable a lo anterior, los tableros fabricados a base de partículas de madera, están asociados a una gran cantidad de poros, por lo que la velocidad de las ondas experimentada es más lenta que en madera sólida, provocando en teoría mayores atenuaciones (Niemz y Plotnikov 1988).

En los trabajos de Burmester (1965) y Schweitzer y Niemz (1990) se comprobó que al aumentar la densidad del medio, la velocidad de ultrasonido perpendicular al plano aumenta en forma directa, generando condiciones de continuidad de medio.

Según Silva (2007), la propagación sonora sobre la madera sólida experimenta un constante cambio de medios de transmisión, definidos por la disposición macroscópica de tejidos propios de la madera, cambio de medio debido a la interfase madera-aire, difracciones y reflexiones de onda debido a la orientación de anillos de crecimientos de madera de verano y primavera como también debido a la presencia de gradientes de humedad y densidad a lo largo de la distancia característica de irradiación.

En tableros, es relevante considerar la cantidad de adhesivo presente en cada tablero, en términos preliminares a medida que aumenta el contenido de adhesivo, se esperaría mejor continuidad del medio de propagación, ya que este actuaría como puente de conexión entre partículas, hojuelas o fibras según sea el caso, disminuyendo eventualmente la presencia de cavidades de aire al interior (Schweitzer y Niemz 1990).

Con el fin de evaluar la factibilidad de emplear la atenuación ultrasónica como técnica comparativa de la aptitud acústica de distintos tableros a base de madera y a su vez comparar dichos umbrales respecto a madera sólida, se plantea como objetivo determinar la influencia de la composición, distribución y características de elementos constitutivos presentes en cada tablero sobre el comportamiento de atenuación ultrasónico, como principal variable indicadora y de análisis para explicar el comportamiento acústico de estos materiales.

Materiales y método

Materiales

Tableros a base de madera. La tabla 1 detalla las características básicas de los tableros.

Equipos e instrumentos. Generador de pulso ultrasónico marca PANAMETRICS Ultrasonic Pulser / Receiver modelo 5058 PR y Osciloscopio Agilent 54622^a. Figura 1A. Transductores piezoeléctricos de contacto marca PANAMETRICS de onda longitudinal (100 kHz., 500 kHz., 1.000 kHz.), que poseen 1.125" de diámetro, modelo Videoscan P/N V194 – RB. Figura 1B.

Método

Preparación de las muestras y condiciones de ensayo

Los cuatro tableros utilizados corresponden a tableros comerciales sin ningún tipo de recubrimiento o aca-

bado superficial, esta elección se realizó con el fin de atribuir los niveles de atenuación a las características constitutivas de cada muestra. Fueron acondicionados previamente bajo condiciones estándares de 20 °C y 65% de humedad relativa, durante un periodo de 15 días; posteriormente durante la experimentación se registró en promedio una temperatura de 17 °C y 55% HR.

Los niveles de frecuencia utilizados fueron 0.1 y 0.5 MHz. La aplicación del método de ultrasonido consistió en el posicionamiento de dos transductores en ambas caras en el material a ser evaluado, mediante un montaje de alineación que permitió provocar una propagación en la dirección en espesor de cada probeta.

La onda ultrasónica es inducida por uno de los transductores y captada por el otro, registrando las diferencias o pérdida de energía de la fuente sonora debida a una distancia de propagación equivalente para cada tipo de tablero.

Tabla 1. Dimensiones y propiedades físicas de las muestras

Tipo de tablero	Densidad (kg/m ³)	Contenido humedad (%)	Dimensiones (mm)
Contrachapado	555	12	100x100x15
OSB	601	11	100x100x15
Partículas	536	10	100x100x15
Fibras	523	10	100x100x15

Figura 1. Equipo generador de pulso ultrasónico y osciloscopio (A). Transductores de contacto y gel de acople (B)



Configuración del ensayo y lectura de datos

Por cada tipo de tableros se consideraron cuatro repeticiones. El diseño de toma de datos se basó en distribuir dos posiciones de acople del transductor dentro del área disponible de cada muestra (cara o contracara), provocando propagaciones en ambos sentidos a través del espesor, generando condiciones representativas en lo largo del espesor de cada probeta.

Específicamente, el diseño del estudio fue dirigido a medir las diferencias de atenuación ultrasónica atribuible a los tipos de tableros y los niveles de frecuencia utilizados, mediante la lectura del voltaje máximo ($V_{\text{peak/peak}}$), registrado en osciloscopio a través del traductor receptor. El diseño metodológico se definió mediante una modificación de la norma ASTM E1495, la cual define procedimientos dirigidos a evaluación de propiedades de materiales compuestos, propiedades físico/mecánicas y detección de defectos, la cual implícitamente permite medir las variables respuesta definida para el presente ensayo.

Variables respuesta del estudio

Determinación de la atenuación ultrasónica: el cálculo de la atenuación ultrasónica procede mediante el registro de la intensidad inicial del transductor emisor y la intensidad remanente debido a la propagación a través de la muestra, ambas mediante la lectura de señal en osciloscopio, para luego realizar el cálculo mediante la ecuación 1.

$$dB = 20 \log \left(\frac{I_0}{I} \right) \quad (1)$$

I : Intensidad remanente debido a una distancia x de propagación.
 I_0 : Intensidad inicial.
 dB : Caída de decibels.

Determinación de la constante de atenuación ultrasónica α : adicionalmente se calculó el comportamiento de la constante de atenuación ultrasónica α , como variable respuesta complementaria, la cual específicamente describe aptitudes de aislación del medio propagado, haciendo uso de las mismas lecturas de señal eléctrica, para luego aplicar el cálculo de la ecuación 2 extraída en base al modelo teórico de atenuación ultrasónica.

$$\alpha = \frac{1}{2x} \ln \frac{I_0}{I} \Leftrightarrow I = I_0 e^{-2\alpha x} \quad (2)$$

I : Intensidad remanente debido a una de propagación x [Volt].
 I_0 : Intensidad inicial (dada por el transductor) [Volt].
 x : recorrido de la onda o propagación [mm].
 α : constante de atenuación [mm^{-1}].

Se deduce de la ecuación 2 que para medios no aislantes, la intensidad de llegada I es equivalente en modulo a la intensidad inicial I_0 , por lo cual el coeficiente (α) es cero ($I = I_0$). Por consiguiente para medios aislantes el valor de α tiende a tomar valores más cercanos o iguales a la unidad, determinando una intensidad final, independiente de la distancia de propagación, estimada en $I = I_0 / e^2$.

Como base de análisis, fue de interés evaluar cuantitativamente la variación de los niveles de atenuación ultrasónica arrojados por cada tipo de tablero debido al aumento del nivel de frecuencia de 0.1 a 0.5 MHz, en relación al primer nivel de frecuencia. La ecuación 3 representa el índice de variación relativa de decibels mencionado.

$$Id_r = \frac{dB_{0.5} - dB_{0.1}}{dB_{0.1}} [\%] \quad (3)$$

Id_r : índice de variación relativa de decibels registrados entre frecuencias 0.1 – 0.5 MHz
 $dB_{0.5}$: Caída de decibels al nivel de frecuencia de 0.5 MHz.
 $dB_{0.1}$: Caída de decibels al nivel de frecuencia de 0.1 MHz.

El análisis estadístico de la variable respuesta se realizó mediante un modelo de efectos fijos para un diseño completamente al azar, donde los efectos fueron: tipo de tablero y niveles de frecuencia. La ecuación 4 ilustra el modelo de la siguiente manera.

$$Y_{IJ} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ijk} \quad (4)$$

μ : media general.
 α : influencia del factor tipo de tablero (cuatro niveles)
 β : influencia del factor nivel de frecuencia (dos niveles).
 ε : error experimental.

Resultados y discusión

El efecto del tipo de tablero y los niveles de frecuencias se muestra en la tabla 2.

Se desprende de la tabla 2 que para ambos niveles de frecuencia ensayados el tipo de tablero que presentó mejores aptitudes de aislación acústica fue OSB, arrojando atenuaciones de 48 y 59,6 dB sobre los niveles de frecuencia 0,1 y 0,5 MHz respectivamente. Por el contrario, el tablero que entregó menor atenuaciones fue el constituido por Fibras MDF registrando 27,48 y 47,25 dB en los niveles de frecuencia 0.1 y 0.5 MHz respectivamente. Adicionalmente, se observó un comportamiento homogéneo en relación a las diferencias entre las atenuaciones máximas y mínimas entre tipos de tableros. Para el nivel de frecuencia de 0,1 MHz, dicha diferencia alcanzó los 20,52 dB, entre los tableros OSB y fibras y diferencia de 12 dB entre los mismos tableros para el nivel de frecuencia de 0,5 MHz.

En relación al efecto del nivel de frecuencia, se observó que al aumentar esta variable de 0,1 a 0,5 MHz, se registró prácticamente un aumento de 12 a 20 dB en promedio sobre todos los tipos de tableros ensayados, comportamiento totalmente esperado en relación a los fundamentos de acústica, los cuales señalan mayores atenuaciones al aumentar la frecuencia de irradiación. Situación semejante entregó el comportamiento de la constante de atenuación, en la cual se observaron aumentos de 0,05 -0,1 mm⁻¹ en promedio, debido al mismo aumento del nivel de frecuencia.

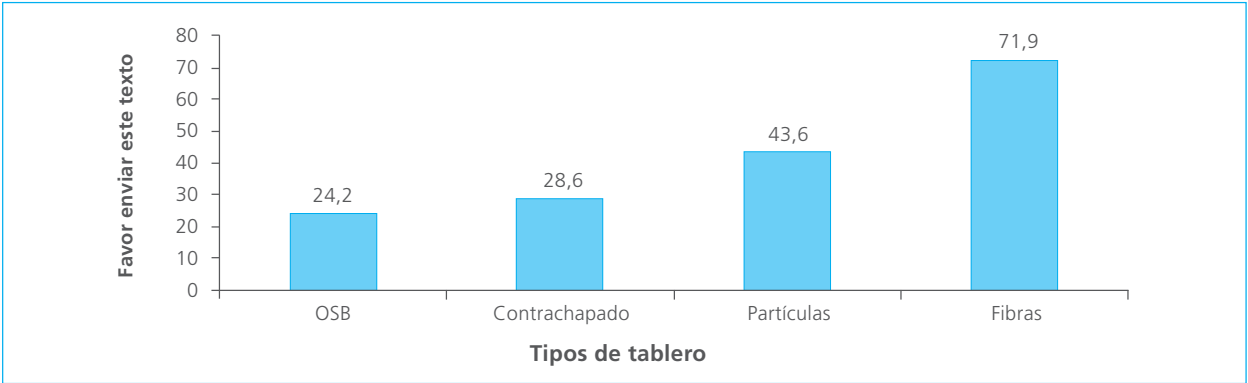
Con el objeto de ilustrar el efecto del aumento del nivel de frecuencia sobre los tableros, se presenta en la figura 2 el índice de variación relativa, haciendo uso de la ecuación 3.

De la figura 2, se desprende un comportamiento heterogéneo del índice Id_r (índice de variación relativa de decibels registrados entre frecuencias 0.1 – 0.5

Tabla 2. Atenuación y constante ultrasónica para tableros y niveles de frecuencia

Tipos de tablero	Atenuación (dB)		Constante α (mm-1)	
	0,1 MHz	0,5 MHz	0,1 MHz	0,5 MHz
OSB	48	59,6	0,21	0,26
Contrachapado	39,76	51,15	0.17	0.23
Partículas	33,79	48,53	0,15	0,21
Fibras	27,48	47,25	0,12	0,21

Figura 2. Efecto del aumento del nivel de frecuencia sobre la atenuación ultrasónica



MHz). Cabe mencionar que los tableros que arrojaron las menores atenuaciones individuales (partículas y fibras), experimentaron los mayores aumentos relativos, alcanzando valores de 43,6 y 71,9%, respectivamente, situación contraria a la experimentada en los tableros Contrachapado y OSB, los cuales registraron las mayores atenuaciones individuales para cada nivel de frecuencia, y en contraparte, los menores aumentos relativos de 28,6 y 24,2% respectivamente.

Para fines comparativos entre los tableros estudiados y la madera sólida, se presenta la figura 3, la cual ilustra los niveles de la atenuación ultrasónica de los tableros y el comportamiento en madera sólida de *Pinus radiata* (Silva, 2007), en base a un estudio diseñado para medir el efecto de las direcciones ortotrópicas de la madera sobre el comportamiento de la atenuación ultrasónica, bajo los mismos procedimientos de determinación y niveles de frecuencia.

(*): Atenuación ultrasónica en dirección mixta en *Pinus radiata*. Distancia de propagación de 1 pulgada (25.4 mm). Silva (2007).

Considerando la figura 3, se puede inferir mejores aptitudes de aislación de los tableros estudiados, en relación a madera sólida *Pinus radiata*. En términos cuantitativos, hay un mejor comportamiento acústico de todos los tableros, aun teniendo en cuenta las mayores distancias de propagación en el estudio que se compara (25.4 mm madera sólida *versus* 15 mm en tableros), atribuible a mayores atenuaciones, situación que no ocurrió significativamente en mayoría de los casos.

Las principales variables que describieron o modelaron el medio de propagación de los distintos tableros ensayados fueron los elementos constitutivos, definidos por el tamaño, forma y la distribución espacial de ellos dentro de su formación volumétrica, definida por el proceso de fabricación de cada tipo de tablero. Al analizar estos factores, se desprende que cada tablero arroja distintos escenarios definitorios de medios con buenas y/o excelentes aptitudes de aislamiento, asociados principalmente a diferencias de continuidad de medio, explicado principalmente por la presencia de gradientes de densidad como también por la orientación y grado de compactación de elementos como partículas, fibras, hojuelas y chapas, en relación a la dirección específica de propagación del flujo ultrasónico.

Las razones obedecen a las diferencias en tamaños de fibras, partículas, chapas u hojuelas generadas para cada tipo de tablero, lo cual conlleva a densidades finales diversas y que responden a las características

particulares de cada producto. Del mismo modo influyen las dosificaciones de adhesivo y los tipos usados, los procesos de transformación asociados en cada caso (Kollmann 1081; Poblete, 2001; Garay 2007), todas propiedades que determinan un particular comportamiento ultrasónico y sónico.

La mayor o menor facilidad en el avance de la onda ultrasónica dependerá de los obstáculos que se presenten en su camino, siendo en general más fácil cuando las fibras de madera son más homogéneas y se vuelve más lento cuando se enfrenta con distribución de células morfológicamente muy distintas, tales como paredes celulares y lúmenes; en el caso del contrachapado, por su fabricación la onda enfrenta la mayor cantidad de cambios de dirección en su camino, producto de las variaciones celulares; en cambio en MDF o partículas hay una mayor homogeneidad en la conformación interna de las células, sin embargo, una cuantificación que permita establecer una comparación del comportamiento acústico no ha sido abordada previamente.

En base al análisis y al sustento bibliográfico, fue esperable registrar las menores atenuaciones en tipo de tableros formados por elementos de menor tamaño, capaces de generar altos niveles de compactación, indicativo de medios homogéneos, continuos y de alta densidad (HB – MDF), sobre los cuales las diferencias o cambio de medio o presencia de interfases (cambio de medio aire a madera) son menores, minimizando pérdidas de señal por difracción y reflexiones de onda debido a diferencias de impedancias acústicas. Los resultados obtenidos en tableros de fibras concuerdan con lo descrito por Burmester (1965 y 1968), Schweitzer y Niemz (1990), en cuanto a que existe una estrecha relación entre la velocidad del sonido y la densidad del tablero. La causa de esta relación está en la mayor cantidad de material sólido y la disminución de los espacios entre elementos a medida que aumenta la densidad, logrando una mejor transmisión de las ondas de sonido.

En los tableros de partículas, el uso de distintas granulometrías por capas, provocó mayores atenuaciones en relación al tipo fibras, ya que la propagación experimentó una variación significativa de medio (capa externa e interna), asociadas a variaciones de densidad entre capas y tamaño de partículas, generando condiciones adversas en términos de continuidad de medio. En términos acústicos, este cambio de medio durante el paso del ultrasonido, causa alternaciones en las condiciones de propagación, alterando básicamente la velocidad de propagación, provocadas por pérdidas de energía por cambios de impedancia del medio asociada a alteraciones forzadas de la velocidad

de propagación. Situación concordante con lo indicado por Niemz y Plotnikov, 1988, quienes postularon que durante el paso de la onda de sonido desde un medio aire a cuerpos sólidos se produce un debilitamiento de la onda sonora. Aunque las ondas ultrasónicas se movilizan a menores frecuencias que las ondas sónicas, es posible utilizar como predictor del comportamiento acústico, las ondas ultrasónicas.

Coincidiendo con los resultados obtenidos en este estudio, en el trabajo realizado por Espejo (2002) se concluye que existe un evidente efecto de la densidad del medio sobre la velocidad de propagación y por ende sobre el nivel de atenuación, en cada una de las direcciones ortotrópicas de la madera.

Para la madera y los tableros, la variable Contenido de humedad reviste especial importancia, asociada a resistencia mecánica, resistencia al biodeterioro, asimismo, se comprueba que el contenido de humedad presente en el medio de propagación también define distintos niveles de atenuación acústica, generando sobre este tipo de ondas mayores atenuaciones en altos contenido de humedad en relación a especímenes secados al aire. Estudios basados en la determinación de la atenuación ultrasónica a través de la lectura RMS verifican lo expuesto (Chen y Beall 2000).

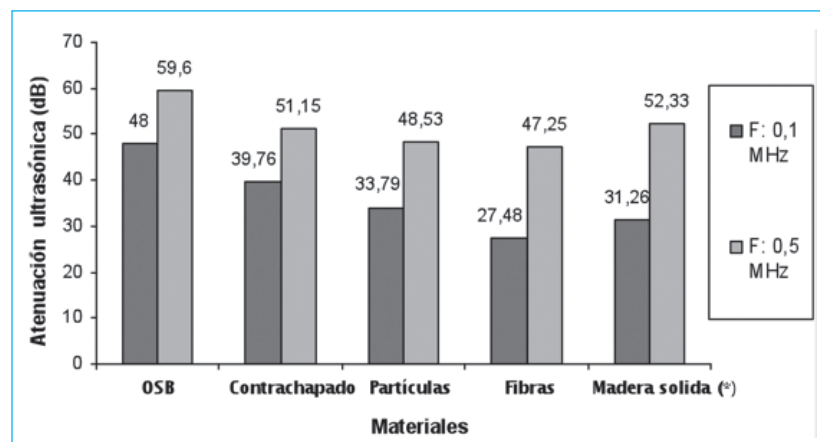
Como experiencia práctica, cabe expresar que en términos metodológicos, el uso de técnicas basadas en medición de umbrales ultrasónicos necesariamente debe considerar una apropiada elección de transductores para asegurar buenos acoples entre la superficie del material y el transductor (ASTM E1495-

97). Especial atención se debe tener cuando el buen posicionamiento de los transductores depende de otros factores, tales como presión de acoplamiento, rugosidad superficial y ruidos de fondo, esto también fue explicado por Kawamoto y Williams (2002).

El comportamiento elástico del medio de propagación, en términos del módulo de elasticidad, toma relevancia en propagaciones a altos niveles de frecuencia, ya que a medida que aumentan los niveles de frecuencias, mayores son las atenuaciones, a igualdad de distancia y características del medio, ello fue corroborado por Marín (1999), quien postuló en un estudio relativo a la anisotropía elástica de madera de *Pinus radiata* medida por ultrasonido, que el módulo de elasticidad de la madera es mayor en sentido longitudinal, seguido por la sentido radial y tangencial ($E_L > E_R > E_T$), estableciendo que la elasticidad radial es dos veces la tangencial. También, Silva (2007) corroboró el efecto de la anisotropía elástica en madera sólida de *Pinus radiata* sobre la atenuación ultrasónica, logrando mayores atenuaciones ultrasónicas en sentido tangencial seguido por el sentido radial.

Aunque los trabajos desarrollados usando ultrasonido como predictor en tableros son pocos, Morales *et al.* (2007) ensayaron tableros de uso estructural OSB/3, uno con 15 mm de espesor y otro con 25 mm. Los valores medios de velocidad obtenidos en tableros OSB en las direcciones longitudinal y transversal, así como la significativa correlación lineal entre algunas propiedades físico-mecánicas, valores de velocidades y de constantes dinámicas, sugieren la posibilidad de uso del método de ultrasonido en el control de calidad

Figura 3. Comparación de comportamiento de la atenuación ultrasónica en tableros y madera sólida



del OSB. Los resultados de esta investigación son preliminares, pero apuntan hacia orientar posibles aplicaciones prácticas de esta tecnología, así los resultados pueden indicar que las lecturas registradas permiten establecer un comportamiento diferenciador en los tableros, idealmente podría continuar la investigación para evaluar las variaciones de densidad de un tipo en particular de tablero a nivel industrial.

Los mayores niveles de atenuación registrados en los tableros estructurales OSB y Contrachapado, se explican principalmente por disposición espacial de elementos hojuelas para OSB y por la estructuración en capas de chapas de Contrachapado, ambos escenarios asociados a la generación de variaciones continuas del medio de propagación.

En OSB, se debe tener en cuenta los altos niveles de heterogeneidad presentes, asociadas a un patrón de distribución de hojuelas de distintas densidades conformadas en capas por partículas alargadas (hojuelas), donde las distintas orientaciones de hojuelas dentro de una misma capa y a su vez la distribución preferentemente ortogonal de hojuelas entre capas, explica el potencial de este producto para la generación de medios altamente heterogéneos y por consiguiente aislantes. Esta conformación estructural provocó altos niveles de divergencia o separación del haz sonoro, explicado por la preferencia del flujo sonoro por propagarse por el material leñoso en relación a la matriz de adhesivo. A su vez, a estas pérdidas de señal por divergencia, se les adiciona las asociadas a refracción y reflexión o rebote de onda, propio de medios que generan distintos ángulos de acople entre la dirección del haz sonoro y la distintas disposiciones de elementos constitutivos, redundando en pérdidas de la energía total transmitida. Por otro lado, el buen comportamiento aislante de Contrachapado es explicado por el tipo de distribución de elementos, correspondiente a una estructuración multicapa mediante chapas de madera unidas perpendicular entre sí, el cual entrega, independiente de la composición interna de las capas, altos estándares de aislación, más aún, lo atribuido a las atenuaciones debido a propagación por madera y adhesivo consecutivamente. En este escenario multicapa definido por propagaciones alternada entre madera-adhesivo-madera, se logran mayores niveles de aislación a medida que el número de chapas constituyentes aumente, entregando mejores aptitudes acústicas como aislante.

Al analizar la composición estructural de cada tablero como principal característica de diferenciación, se desprende que tanto la distribución espacial y el tipo de elementos constitutivos, toman aplicabilidad técnica para el diseño de productos con potencial de aislación acústico, capaces de generar medios no continuos asociados a poca compactación, mediante el uso de elementos de forma irregular y haciendo uso de distintas granulometrías presente en un mismo producto, como son las configuraciones por capas y/o multicapas heterogéneas entre sí.

En resumen, es esperable un comportamiento similar de la atenuación ultrasónica entre los tableros OSB, Contrachapado y la madera de *Pinus radiata*, a medida que aumentan los niveles de frecuencia, ya que sobre estos materiales se encuentran los mejores comportamientos elásticos debido a la aplicación estructural de servicio que cumplen.

Conclusiones

El estudio permitió concluir la aplicabilidad técnica de la metodología propuesta en términos de la evaluación cualitativa y cuantitativa de los distintos niveles de aptitud acústica de los tableros estudiados en relación a madera sólida de *Pinus radiata* D. Don.

Del análisis estadístico se concluyó que existe un efecto significativo de ambas variables de ensayo: tipo de tablero y nivel de frecuencia y de la interacción de ambas, sobre la variable respuesta atenuación ultrasónica, expresada en decibeles.

Se determinó que el grado de heterogeneidad presente en cada tablero a nivel de estructura interna, explicó significativamente el comportamiento de la atenuación ultrasónica en tableros contrachapados y OSB, representando así mejores soluciones constructivas desde el punto de vista acústico.

Asimismo, se determinó que el grado de compactación asociado a pequeños elementos constitutivos (fibras o partículas) establece medios continuos de alta densidad y homogéneos, lo que se asocia a altos niveles de propagación, por ende, de baja aislación acústica.

Fue posible establecer un mejor comportamiento aislante de los tableros evaluados en relación a los niveles de atenuación presentes en madera sólida de *Pinus radiata*, en dirección mixta.

Bibliografía

- APAWOOD. 2007. Performance Standard for Wood-Based Structural-Use Panels. Covers Voluntary Product Standard PS 2-04 and describes the requirements for producing and testing wood-based structural-use panels. *Updated May 2007* http://www.apawood.org/level_c.cfm?content=pub_ply_libmain
- ARAUCO, 2011. <http://www.arauco.cl/pdf/TRUPAN.PDF>
- ASTM E1495-97. Standard guide for acousto-ultrasonic assessment of composites, laminates, and bonded joints.
- Bucur, V.; Bohnke, I. 1994. Factors affecting ultrasonic measurements in solid wood. *Ultrasonics* 32 (5): 385-390.
- Burmester, A. 1965. "Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und morphologischen, physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Holz", *Holz als Roh- und Werkstoff*, Berlin 23(6): 227-236.
- Burmester, A. 1968. "Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und Rodichte, Querzug sowie Biegefestigkeit von Holzspanplatten", *Holz als Roh- und Werkstoff* 26(4): 113- 117.
- Campbell, F. 2005. *Non-destructive inspection. Manufacturing Processes for Advanced Composites*. Published on Elsevier (ISBN 1-8561-7415-8).
- Chen, L; Beall, F.C. 2000. Monitoring bond strength development in particleboard during pressing using acousto-ultrasonics. *Wood and Fiber Science* 32(4): 466-477.
- Erikson, R.G., Gorman, T.M., Green, D.W., Graham, D., 2002. Mechanical grading of lumber sawn from small-diameter lodgepole pine, ponderosa pine and grand fir trees from northern Idaho. *Forest Products Journal* 50 (7/8): 59-65.
- Espejo, H. 2002. Efecto de la densidad y contenido de humedad de la madera de pino radiata (*Pinus radiata D. Don*) sobre la atenuación y velocidad de propagación ultrasónica. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. Departamento de Ingeniería de la madera.
- Garay, R., Henríquez, M. 2010. Comportamiento al fuego de tableros y madera de pino radiata d. Don con y sin pintura retardante de llama; *Madera, Ciencia y Tecnología*; 11-24
- Garay, R.; Poblete, H.; Karsulovic, J. 2009a. Evaluation of oriented strandboard and plywood subjected to severe relative humidity and temperature conditions. *Forest Prod. J.* 59(3): 84-90.
- Garay, R. 2009b. Efectos de dos protectores superficiales en las propiedades de tableros de madera después de 1 año de exposición a la intemperie; *Información Tecnológica*;123-130.
- Garay, R. 2009c. Propiedades de tableros estructurales contrachapados y OSB intemperizados durante dos años; *Agro-Ciencia*; 25(1) 20-32
- Garay, R. 2007. Tableros Contrachapados. Editorial Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Chile. Santiago, Chile. Registro de propiedad intelectual n° 162557. Registro I.S.B.N. 978-956-19-0563-4. 172 pp.
- Kawamoto, S; Williams, R. 2002. Acoustic emission and acousto-ultrasonic techniques for wood and wood-based composites. A review. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-134. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 16 pp.
- LOUISIANA PACIFIC CHILE.2011. Descripción de tipo de tableros según condiciones de uso. Disponible en http://lpchile.cl/index.php?pag_id=14&len_id=1 [Consulta en Mayo 2011].
- Marín, C. 1999. Estudio de la anisotropía elástica de Madera de *Pinus radiata D. Don*. Mediante ultrasonido. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. Departamento de Ingeniería de la Madera. Memoria de pregrado. Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- MASISA Chile. 2011. <http://www.masisa.com/mex/esp/productos/tableros/aglomerado/caracteristicas-fisicomecanicas/3202/2040/>
- Martínez, M. E.; Calil, C. J.; Fiorelli, J. 2002. Resistencia mecánica de los tableros de densidad media Parte 1: Resistencia a la tracción paralela a la superficie. *Maderas Ciencia y Tecnología*, 4(2): 179-185.
- Morales, E.; Rocco, F.; Nascimento, M.; Gonçalves R. 2007. Evaluación de Propiedades Físicas y Mecánicas de Tableros OSB Utilizando Técnica de Ensayo No Destructiva. *Información Tecnológica*, Vol 18(3), 89-94.
- Niemz, P.; Plotnikov, S. 1988. Untersuchungen zum Einfluß ausgewählter Strukturparameter auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Ultraschallwellen in Vollholz und Spanplatten. *Holztechnologie* 29(4): 207-209.

Poblete, H. (2001). *"Tableros de partículas,"* Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile. Editorial El Kultrún, Valdivia, Chile, 177 pp.

PS1-07 STRUCTURAL PLYWOOD. 2007. Voluntary products Standard. APA The engineered Wood Association. 60 pp.

Sachse, W.; Pao, Y. H. 1979. On the determination of phase and group velocities of dispersive waves in solids, p. 59. In: Acoustic Wood. Institute National de la Recherche Agronomique. Nancy. Francia. 284 pp.

Schweitzer, F.; Niemz, P. 1990. "Grundlegende Untersuchungen zum Einfluß wichtiger Parameter auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Ultraschallwellen in einschichtigen Spanplatten", *Holzforschung und Holzverwertung* 42(5): 87-89

Silva, M. 2007. Aplicación de ondas ultrasónicas como medio de control al ataque de termitas subterráneas *Reticulitermes hesperus Banks sp.* en madera de Pino insigne (*Pinus radiata D. DON*). Memoria de pregrado. Universidad de Chile. Santiago, Chile.