

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL AMORTIGUAMIENTO MATERIAL DE PIEZAS DE MADERA PARA PANELES CONTRALAMINADOS

EXPERIMENTAL STUDY OF MATERIAL DAMPING OF DIMENSIONAL LUMBER FOR CROSS LAMINATED PANELS

Alexander I. Opazo ⁽¹⁾ (P), **Franco P. Benedetti** ⁽¹⁾, **Angela P. Salinas** ⁽¹⁾, **Sergio C. Alarcon** ⁽²⁾

(1) Mg. Ing. Civil, Profesor Asistente, Universidad del Bío-Bío, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Concepción, Chile

(2) Ing. Civil, Investigador asociado, Universidad del Bío-Bío, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Concepción, Chile

Dirección de contacto: aopazove@ubiobio.cl; (P) Presentador

Código de identificación: T3-24

Resumen

El sistema constructivo de madera contralaminada (CLT) ha recibido mucha atención en los últimos dos años en Chile. La madera cepillada es su principal insumo, por lo que es deseable conocer sus propiedades dinámicas, especialmente para evaluaciones del desempeño vibratorio. El presente estudio se enfoca en la evaluación del amortiguamiento material de piezas de madera que poseen dimensiones típicas para paneles CLT. Sesenta piezas de Pino Radiata D.Don (33x145x4900mm), con diferentes grados estructurales visuales, fueron ensayados en vibración transversal, de acuerdo a la normativa ASTM D6874-12. Un total de 240 evaluaciones de amortiguamiento material fueron hechas, a través de los métodos de decremento logarítmico (dominio del tiempo) y ajuste de círculo (dominio de la frecuencia), con las piezas apoyadas en su lado transversal menor y mayor. Los hallazgos de este estudio sugieren que las piezas de madera para paneles de CLT tienen bajas razones de amortiguamiento, con valores medios de 0.72%. Las piezas de madera con peores grados estructurales visuales poseen las mayores razones de amortiguamiento, al apoyarse en su lado transversal mayor. En general, tanto el método del decremento logarítmico como el método del ajuste de círculo son útiles para determinar razones de amortiguamiento material, con buena precisión. Con la base de datos presentada en este trabajo se espera aportar al conocimiento relacionado con los mecanismos de amortiguamiento y el desempeño vibratorio de paneles CLT que utilizan este tipo de madera.

Palabras clave: razón de amortiguamiento; vibración transversal; madera contralaminada

Abstract

Cross laminated timber (CLT) is a multi-layer wooden panel that has received much attention in the last two years in Chile. Dimensional lumber is the main input material and it is desirable to know its material damping, specially for vibration performance assessment. The present study focuses on the evaluation of material damping in lumber board specimens with dimensions that are typical for CLT panels. Using the impact test method, 60 lumber boards made out of Radiata Pine were subjected to flexural vibrations. The tests involved different visual grades and orientations. A total of 240 material damping evaluations were performed, through logarithmic decrement and circle fit methods. The mean value for material damping ratio was 0.72%, and significant difference was found between visual grading classes.

Keywords: damping ratio; transversal vibration; cross laminated timber

1. INTRODUCCIÓN

Chile es uno de los mayores productores de madera a nivel mundial. Junto con Nueva Zelanda son los países con mayores plantaciones forestales de Pino Radiata, sin embargo, la mayoría de esta madera se exporta y en el ámbito de la construcción es uno de los materiales menos utilizados, por debajo del hormigón y el acero. No obstante, en países como Austria, Alemania y en Europa mayormente el uso de la madera en la construcción ha tenido un gran crecimiento e incluso se han desarrollado nuevos sistemas constructivos. Uno de los sistemas que se está utilizando bastante son los paneles de madera contralaminada o también llamados paneles CLT por sus siglas en inglés Cross Laminated Timber. La gran ventaja de este sistema, además de todos los beneficios de la madera, es que no necesita de otros elementos estructurales como vigas o pilares, ya que los paneles se pueden usar como muros y losas. También es un sistema constructivo prefabricado y de rápido montaje. [1]

En Chile se están dando los primeros pasos con el uso de paneles CLT por lo tanto es fundamental conocer las propiedades estáticas y dinámicas de todos sus componentes. Una de las propiedades dinámicas importantes a conocer es la razón de amortiguamiento. Este parámetro influye directamente en la respuesta de las estructuras ante cargas dinámicas como el viento o sismos, y se hace más importante aún, sabiendo que Chile es uno de los países más sísmicos del mundo. Además, como la madera es un material liviano y flexible, las estructuras en las que se le utiliza son más propensas a vibraciones y el amortiguamiento justamente lo que hace es disminuir la amplitud y duración de estas vibraciones, mejorando la serviciabilidad de la estructura y la comodidad de los usuarios. Así, conociendo el valor de esta razón se pueden alimentar modelos computacionales, para mejorar el análisis y dimensionamiento de estos sistemas innovativos.

Dado que la razón de amortiguamiento es un parámetro que se puede obtener sólo a partir de datos experimentales, la estimación de su valor se hace una tarea difícil, ya que los distintos métodos de cálculo que existen trabajan con enfoques diferentes, y son generalmente influenciados por la presencia de nudos en la madera. Es por ello que para determinar su valor con mayor certeza es necesario utilizar métodos que trabajen tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia, frente a maderas de distintos grados estructurales visuales. [2] [3]

El objetivo general de este trabajo es proponer valores de razón de amortiguamiento de vigas de madera de Pino Radiata, para uso en paneles CLT. En una primera etapa se realizan ensayos de vibración transversal a una serie de vigas según la norma ASTM D6874-12 [4]. Posteriormente, se procesan los datos y se aplican los métodos de decremento logarítmico y ajuste de círculo para determinar la razón de amortiguamiento. Con la base de datos generada se espera aportar al conocimiento relacionado con los mecanismos de amortiguamiento y el desempeño vibratorio de paneles CLT que utilizan este tipo de madera.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se describirá en una primera etapa el tipo de viga de madera evaluada, junto con el método de ensayo de vibración transversal implementado. Posteriormente, se explicarán los métodos de cálculo utilizados para la estimación de la razón de amortiguamiento del material.

2.1 Descripción del tipo de madera evaluada

Las vigas que fueron sometidas a ensayos corresponden a piezas de madera de Pino Radiata con las siguientes dimensiones: 4.9 m. de largo, 33 mm de espesor y 145 mm de altura. Estas vigas poseen las dimensiones típicas para ser utilizadas como lamelas de paneles CLT y fueron acondicionadas a una temperatura de 20°C y humedad relativa ambiental de 65%.

Las piezas de madera fueron clasificadas visualmente según la norma NCh 1207 of.2005 [5]. Se seleccionaron 60 vigas en total para ser ensayadas, 20 piezas de grado GS, 20 de grado G1 y 20 de grado G2. De esta manera se puede realizar un análisis de los resultados para cada grado estructural de la madera.

Para el Pino Radiata se ha comprobado que la característica que afecta en mayor proporción las propiedades mecánicas, es la presencia de nudosidades. Es por ello que, para medir el efecto de los nudos en la pieza de madera, se utiliza el método de Razón de Área Nudosa (RAN). El método consiste básicamente en seleccionar el sector más débil de la pieza en base a la cantidad y tamaño de nudos presentes. Luego se debe visualizar la geometría de proyección del nudo o grupo de nudos presentes en dicho sector, para posteriormente estimar las Razones de Área Nudosa, que corresponde a la razón entre la suma de todas las áreas nudosas sobre la sección transversal y el área total de la sección transversal. En la Figura 1 se muestra un esquema asociado a este concepto.

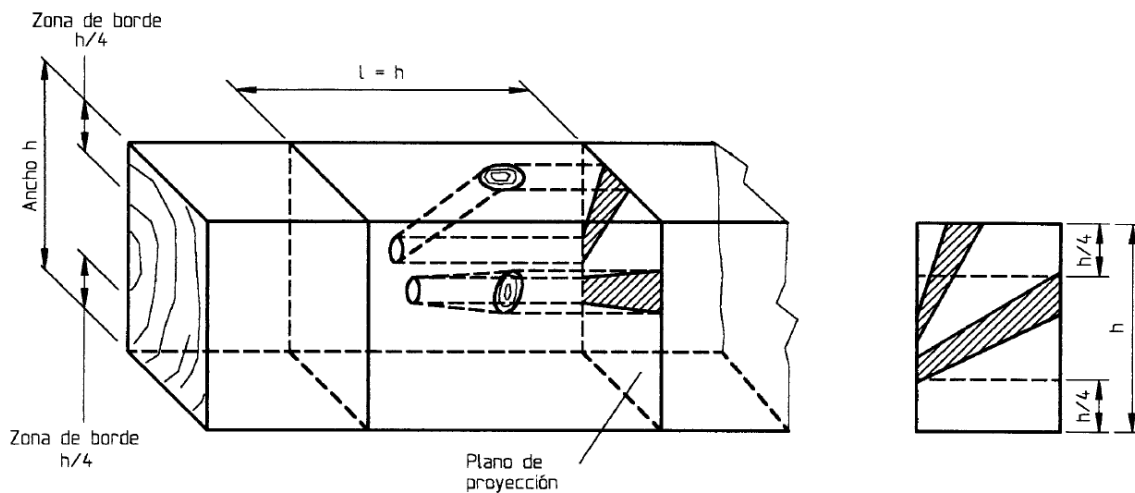


Figura 1: Proyección de nudos en la sección transversal de la pieza (Nch 1207 of.2005)

El grado GS o selecto es aquel en que la RAN fluctúa entre 20% y 33.3%. En el grado G1 fluctúa entre 33.3% y 50%, mientras que en el grado G2, varía entre 50% y 66.7%. Si la pieza presenta en su sección de área nudosa más desfavorable una RAN mayor a 66.7%, simplemente se rechaza.

2.2 Implementación de ensayo de vibración transversal

Este ensayo está diseñado para determinar la rigidez a la flexión y módulos de elasticidad de elementos a base de madera, mediante vibraciones en la dirección vertical establecida en la normativa ASTM D6874 (2012) [6]. Sin embargo, los datos obtenidos de este ensayo se pueden utilizar también para determinar valores de otras propiedades dinámicas como la razón de amortiguamiento.

A grandes rasgos el ensayo consiste en medir las vibraciones de una viga simplemente apoyada cuando esta se encuentra en vibración libre. Para ello la viga se golpea en el centro de la luz con un martillo de impacto modal, el cual además tiene la característica de medir la fuerza del impacto. El objetivo es captar la señal del modo fundamental de vibración de la viga, es por ello que se instalan acelerómetros los cuales miden las aceleraciones que experimenta la viga luego del impacto. En la Figura 2 se muestra el martillo de impacto modal y los acelerómetros instalados.



Figura 2: (a) Martillo de impacto modal. (b) Acelerómetros instalados.

El ensayo de vibraciones transversales se realizó con las vigas apoyadas en su cara (vibración vertical en lado b) y en su canto (vibración vertical en lado h), tal como se muestra en la Figura 3. Además, para disminuir el porcentaje de error asociado al experimento, se repitió el ensayo 15 veces para cada sentido de la viga.

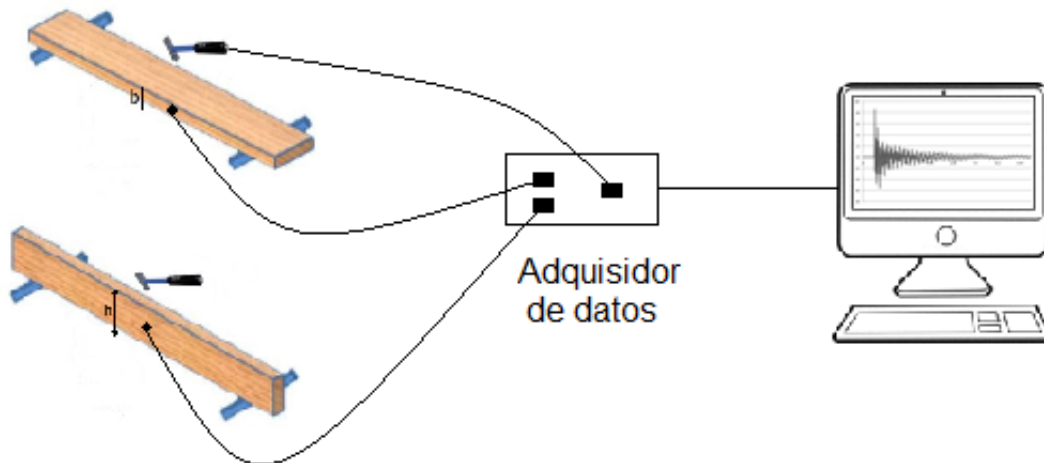


Figura 3: Ensayos de vibraciones transversales con vigas apoyadas en su cara (vibración en lado b) y vigas apoyadas en su canto (vibración en lado h).

Luego de realizar los ensayos para cada viga, la señal captada por los acelerómetros pasa a un sistema de adquisición de datos dinámicos el cual permite llevar esta información a un software computacional. Para procesar todos los datos obtenidos se trabajó con el software Labview [7], permitiendo obtener, entre otras cosas, la señal filtrada de vibraciones en el modo de vibrar de interés y eliminando todo ruido externo que pudiera afectar al ensayo. En la Figura 4 se muestra un acelerograma construido en el software Matlab [8] a partir de la señal filtrada. Este gráfico representa las aceleraciones experimentadas por la viga en un ensayo.

El acelerograma muestra las aceleraciones que experimenta la viga durante un tiempo de vibración libre. Con esta información como base se pueden aplicar ciertos métodos de cálculo que permiten determinar la razón de amortiguamiento de las vigas ensayadas

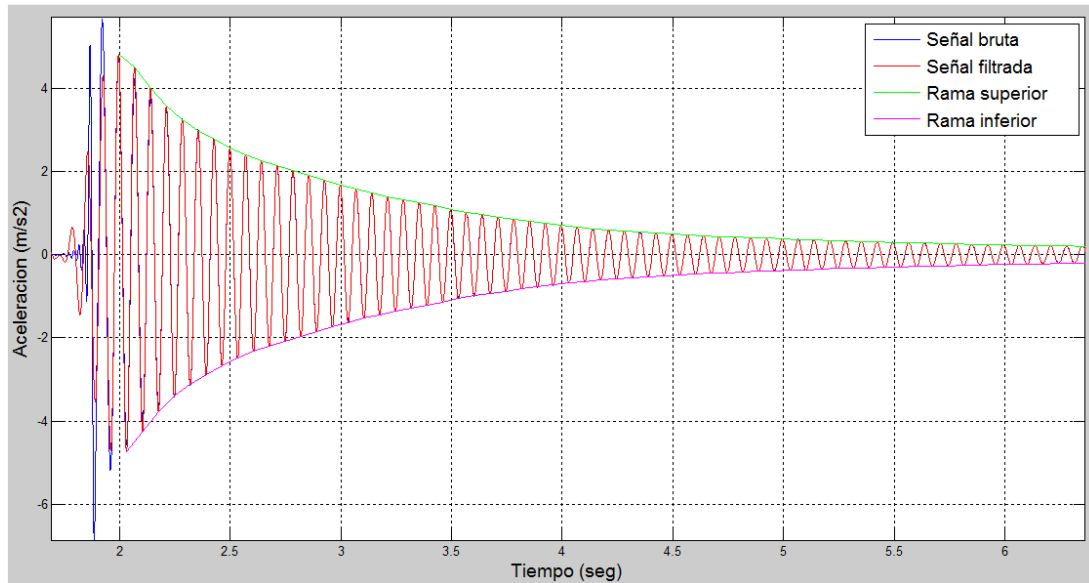


Figura 4: Acelerograma típico obtenido de un ensayo.

2.3 Métodos para el cálculo de la razón de amortiguamiento material

Existen diversos métodos para calcular la razón de amortiguamiento, sin embargo, no todos ellos utilizan los mismos datos de entrada. Algunos trabajan con la aceleración de las vibraciones, otros con la velocidad. Además, hay métodos que utilizan un análisis en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia. Por lo tanto, la estimación de este parámetro dependerá del método empleado y de la confiabilidad de los datos de entrada, es decir, que estos correspondan al modo de vibrar de interés y que no estén afectados por ruido externo.

A continuación, se explican los dos métodos utilizados en esta investigación (decremento logarítmico y ajuste de círculo). Estos se seleccionaron en base a su compatibilidad con los datos obtenidos del ensayo y además porque son métodos que trabajan con enfoques distintos, permitiendo hacer una comparación de sus valores entregados. Ambos métodos fueron programados en el software Matlab para la obtención de sus resultados.

2.3.1 Método de Decremento Logarítmico

Este método utiliza un análisis en el dominio del tiempo y es uno de los más usados debido a su simplicidad de trabajo. Consiste en medir la razón de decaimiento de la señal vibratoria amortiguada. Una forma de lograr esto es realizar una regresión exponencial de los peaks sucesivos de la señal, tanto en la rama superior como en la inferior. Luego la razón de amortiguamiento se puede calcular utilizando las Ecuaciones 1 y 2 [9]:

$$A_{i(t)} = \alpha \cdot e^{-\beta \cdot t} \quad (1)$$

$$\beta = 2 \cdot \pi \cdot \xi \cdot f_n \quad (2)$$

Donde: $A_{i(t)}$: función que reúne los peaks sucesivos de la señal, α y β : constantes de la regresión exponencial, ξ : razón de amortiguamiento, f_n : frecuencia natural de vibración expresada en (ciclos/seg.), t : tiempo de la señal de vibración.

Una vez realizada la regresión, se pueden conocer los valores de los coeficientes α y β . Si se conoce además la frecuencia de vibración f_n de la señal vibratoria, la razón de amortiguamiento ξ se puede despejar de la Ecuación 2.

2.3.2 Método de ajuste de círculo (Circle Fit)

Este método se diferencia del anterior ya que no sólo trabaja con la respuesta del sistema, sino que también con la fuerza de excitación que provocó la vibración. Para relacionar estas dos variables se utiliza la función de respuesta en frecuencia (FRF) que expresa la razón entre la señal de salida y de entrada en el dominio de la frecuencia. La FRF es una función compleja, es decir con una parte real y una imaginaria.

El método se basa en graficar una porción de la FRF, cercana a la frecuencia f_n , en un plano con la parte real de la función en el eje de las abscisas y la parte imaginaria en las ordenadas (también llamado gráfico de Nyquist). Este gráfico genera con los puntos de la FRF un círculo aproximado, del cual se pueden extraer parámetros modales como la frecuencia natural y la razón de amortiguamiento. La Figura 5a esquematiza estos conceptos.

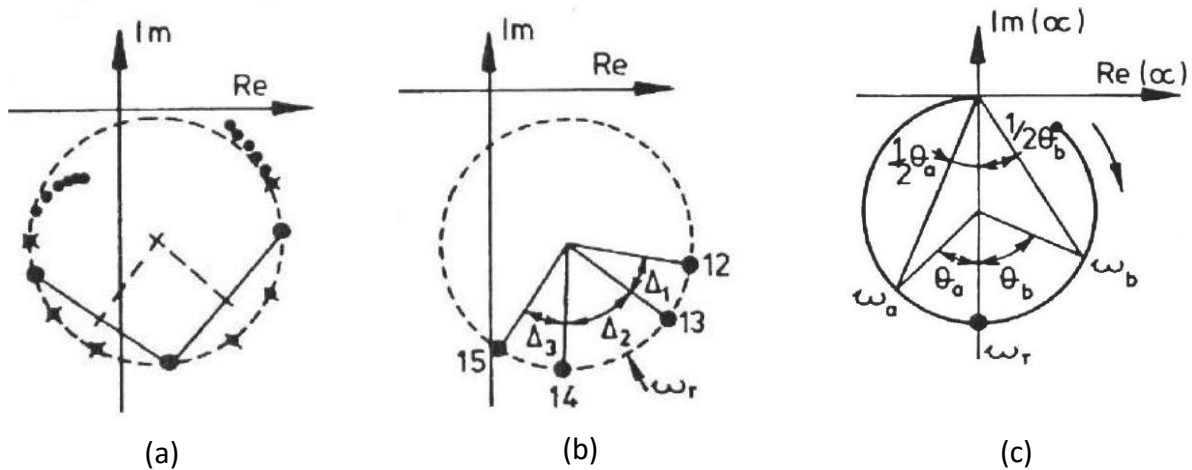


Figura 5: a) Ajuste del círculo a los puntos, b) Determinación de la frecuencia natural, c) Esquema para determinar la razón de amortiguamiento

Para un buen análisis se recomienda usar al menos seis puntos para graficar [10]. Luego de haber ajustado el círculo a los puntos graficados, se procede a determinar la frecuencia natural (ω_n) o también llamada frecuencia de resonancia (ω_r). Para ello se trazan líneas desde el centro del círculo hasta cada punto, de manera de detectar la región donde exista la mayor distancia angular entre puntos (Figura 5b). De esta forma, ω_r se puede ubicar de manera aproximada en la intersección de una línea que se traza desde el origen, pasa por el centro del círculo y toca su borde en la zona de mayor distancia angular.

Finalmente, una vez ajustado el círculo y determinada la frecuencia natural se puede calcular la razón de amortiguamiento. El procedimiento implica tomar un par de puntos alrededor de la frecuencia natural (uno antes y uno después) y calcular el ángulo entre ellos y la frecuencia natural, θ_a y θ_b (Figura 5c). La razón de amortiguamiento para valores bajos de ξ , se puede estimar entonces según la Ecuación 3[10].

$$\xi \cong \frac{\omega_a - \omega_b}{\omega_r (\tan(\theta_a/2) + \tan(\theta_b/2))} \quad (3)$$

Donde: ω_a y ω_b son las frecuencias de dos puntos alrededor de la resonancia. Θ_a y Θ_b son los ángulos entre los puntos y la frecuencia natural o de resonancia.

Esta estimación se hace para cada par de puntos alrededor de la resonancia, por lo que se pueden obtener varios valores aproximados de razones de amortiguamiento, los cuales se pueden promediar.

3. RESULTADOS

En el siguiente capítulo se analizan los resultados obtenidos al aplicar los dos métodos descritos anteriormente. El proceso de obtención de resultados se logró utilizando el software Matlab, en el cual se programaron los dos métodos, decremento logarítmico y circle fit. En lo sucesivo, las vigas apoyadas en su cara mayor y vibrando transversalmente en su canto menor se denominan “ensayos en lado b”. Por su parte, las vigas apoyadas en su canto menor y vibrando transversalmente en su cara mayor se denominan “ensayos en lado h”. El análisis de resultados se realizó con gráficos de cajas e intervalos, los cuales resumen de forma clara los resultados y permiten una rápida interpretación. Para la construcción de estos gráficos se utilizó el software estadístico Minitab 16 [11].

3.1 Comparación de resultados entre métodos de cálculo para vigas apoyadas en su cara mayor (ensayo con vibración vertical en lado menor “b”)

En la Figura 6 se muestra un gráfico de cajas con los resultados obtenidos por los dos métodos, cuando las vigas vibran en su lado b.

Se observa que para cada grado de la madera los resultados entregados por ambos métodos son relativamente similares, con valores promedio para el circle fit de 0.57%, 0.79% y 0.77% en los respectivos grados GS, G1 y G2. El método de decremento logarítmico para los grados GS, G1 y G2 entregó valores promedio de 0.53%, 0.71% y 0.69% respectivamente. El método del circle fit muestra valores promedio levemente mayores al decremento logarítmico en un 10% aproximadamente.

En términos generales, se puede notar que los valores promedio obtenidos en los grados G1 y G2 son similares y mayores a los obtenidos en el grado GS, sin embargo, este último presentó una menor dispersión en los datos, que se puede apreciar por el tamaño de la caja.

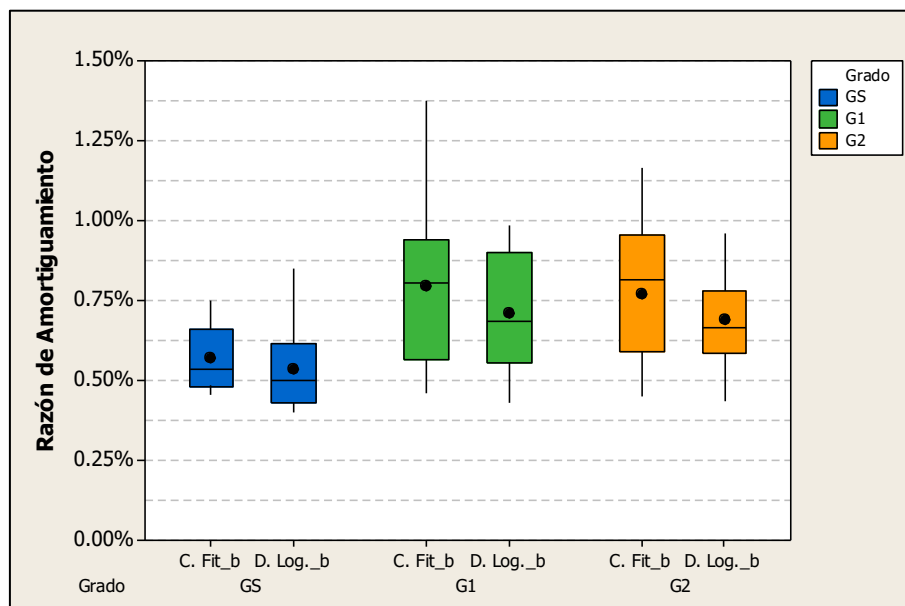


Figura 6: Razones de amortiguamiento obtenidas por ambos métodos para vibración en lado b.

Para detectar eventuales diferencias significativas entre los valores de amortiguamiento para los grados GS, G1 y G2, se ajustó una distribución normal de probabilidades a los datos, y se estimaron los intervalos de confianza de la población. El nivel de confianza utilizado es de un 95%, es decir la probabilidad de que la razón de amortiguamiento no se encuentre en ese rango es de sólo un 5%.

Los intervalos de confianza de la razón de amortiguamiento utilizando el método del circle fit son (0.51%, 0.63%), (0.67%, 0.92%) y (0.66%, 0.87%) para los grados GS, G1 y G2 respectivamente. Por su parte, para el método de decremento logarítmico fueron (0.46%, 0.61%), (0.62%, 0.80%) y (0.62%, 0.76%) respectivamente. Es importante destacar que, para ambos métodos, los intervalos de confianza asociados a la razón de amortiguamiento del grado GS, no se intersectan con los intervalos de los grados G1 y G2. Esto indica que podrían existir diferencias estadísticamente significativas entre las razones de amortiguamiento de las maderas de grado GS con respecto a los de grado G1 y G2. Por lo anterior, se observa que la presencia de nudosidades tiene incidencia directa en los valores de amortiguamiento del material (a menor presencia de nudosidad, menor razón de amortiguamiento).

3.2 Comparación de resultados entre métodos de cálculo para vigas apoyadas en su cara menor (ensayo con vibración vertical en lado h)

La Figura 7 muestra un gráfico de cajas con los valores de razón de amortiguamiento obtenidos por ambos métodos de cálculo, cuando las vigas vibran verticalmente en su lado mayor h.

Al igual que para la vibración en el lado b, la Figura 7 muestra que para cada grado de la madera los valores obtenidos por ambos métodos son relativamente similares, con valores promedio para el circle fit de 0.74%, 0.70% y 0.86% para los grados GS, G1 y G2 respectivamente. Por su parte, el método de decremento logarítmico en los grados GS, G1 y G2 entregó valores promedio de 0.72%, 0.67% y 0.83% respectivamente. El método del circle fit nuevamente entrega valores promedio levemente mayores al decremento logarítmico en un 4% aproximadamente. Además, se aprecia que los valores promedio de GS y G1 son similares pero menores a los obtenidos en el grado G2, aunque este último presenta una mayor dispersión en los datos.

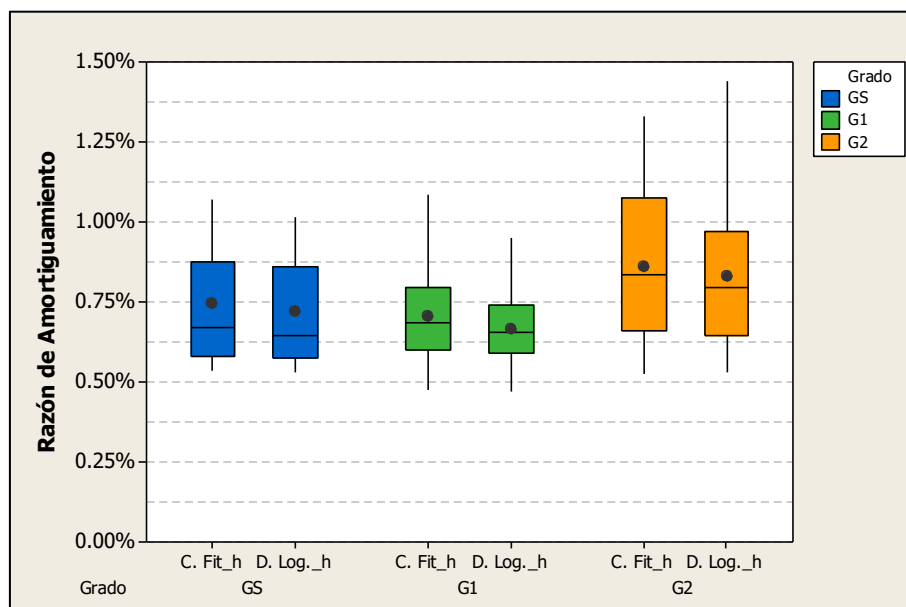


Figura 7: Razones de amortiguamiento obtenidas por ambos métodos para vibración en lado h.

Para detectar eventuales diferencias significativas entre los valores de amortiguamiento para los grados GS, G1 y G2, se ajustó una distribución normal de probabilidades a los datos, y se estimaron los intervalos de confianza de la población. El nivel de confianza utilizado es de un 95%, es decir la

probabilidad de que la razón de amortiguamiento no se encuentre en ese rango es de sólo un 5%. Los intervalos de confianza utilizando el método del circle fit son (0.64%, 0.85%), (0.62%, 0.78%) y (0.73%, 0.99%) para los grados GS, G1 y G2 respectivamente. El método de decremento logarítmico para los grados GS, G1 y G2 mostró intervalos de (0.62%, 0.81%), (0.61, 0.73%) y (0.70%, 0.95%) respectivamente. Como los intervalos de confianza para los distintos grados estructurales se intersectan entre sí para los dos métodos de cálculo, se concluye que con esta disposición de ensayo no se pueden detectar diferencias significativas en las razones de amortiguamiento.

3.3 Comparación de resultados para un mismo método de cálculo y distintas disposiciones de vigas (vibración en lado b versus vibración en lado h)

La Figura 8 muestra un gráfico de intervalos de confianza con los valores de razón de amortiguamiento obtenidos por el método del circle fit para las vigas vibrando en los lados b y h.

En el gráfico de la Figura 8 se observa que los valores promedio de razón de amortiguamiento calculados por el método del circle fit son mayores en el lado h para los grados GS y G2. Mientras que el grado G1 entregó un valor promedio mayor en el lado b. Además, se puede apreciar una clara diferencia entre los intervalos de los grados GS y G2 calculados con el circle fit en lado b. Estos intervalos no se intersectan, lo que permite definir un cierto grupo de valores pertenecientes sólo al grado GS. Por lo tanto, para razones de amortiguamiento menores a 0.63% y que son calculadas por el método del circle fit en el lado b de las vigas, se puede decir a priori que pertenecen al grado GS. En el lado h los intervalos de los tres grados estructurales se intersectan, por lo que no se puede definir un grupo de valores único para cada grado.

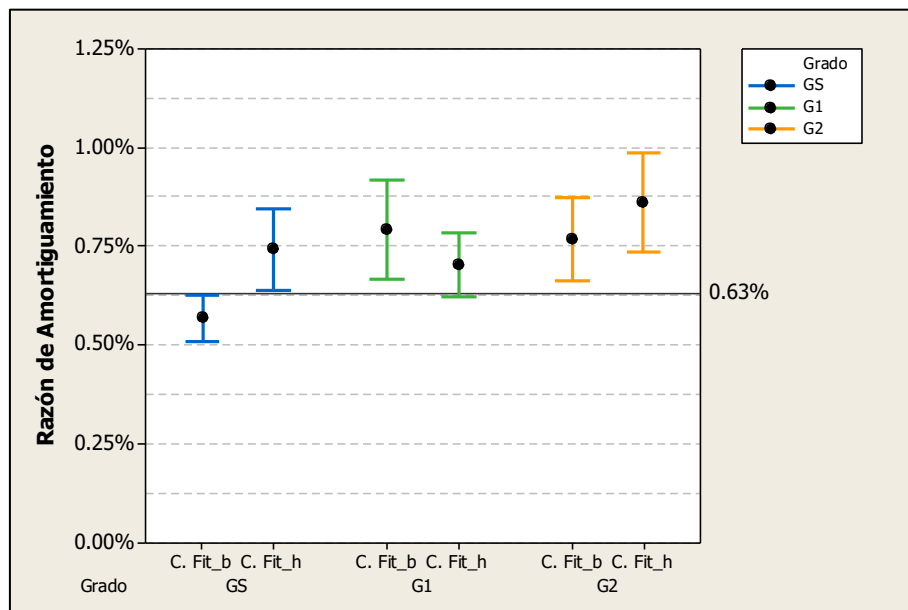


Figura 8: Intervalos de confianza para razones de amortiguamiento obtenidas por el método del circle fit en los lados b y h de las vigas.

Un análisis similar al antes mostrado se puede realizar para el método de decremento logarítmico. En la Figura 9 se muestra un gráfico de intervalos con los valores de razón de amortiguamiento calculados ahora por el método del decremento logarítmico para las vigas vibrando en los lados b y h.

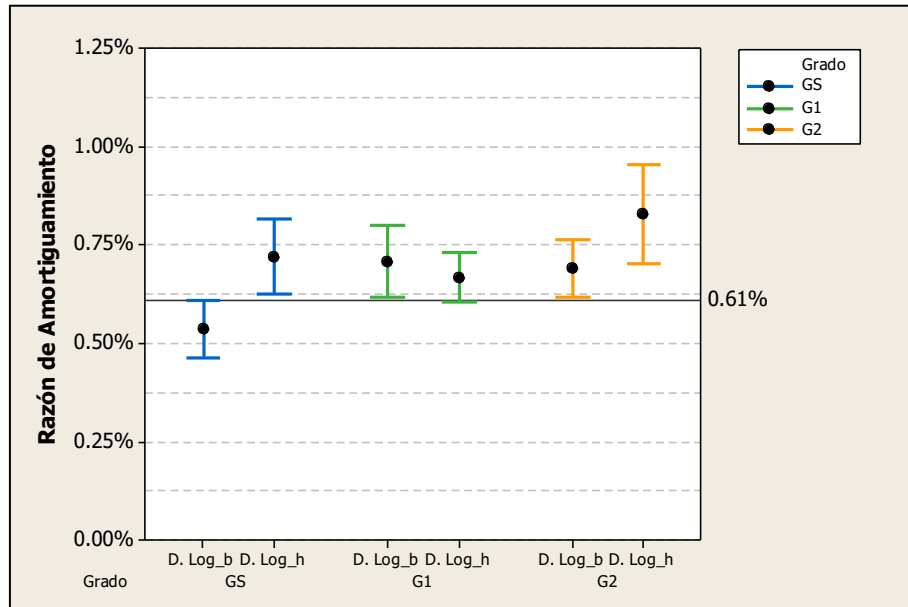


Figura 9: Intervalos de confianza para razones de amortiguamiento obtenidas por el método del decremento logarítmico en los lados b y h de las vigas

En el gráfico de la Figura 9 se observa que los valores promedio de razón de amortiguamiento calculados por el método del decremento logarítmico son mayores en el lado h para los grados GS y G2. Mientras que el grado G1 entregó un valor promedio levemente mayor en lado b. Además, nuevamente se puede apreciar una diferencia entre los intervalos de los grados GS y G2 calculados con el decremento logarítmico en el lado b. Estos intervalos no se intersectan, por lo que los valores de razón de amortiguamiento menores a 0.61% y que son calculados por el método del decremento logarítmico en el lado b de las vigas, se puede decir a priori que pertenecen al grado GS. Nuevamente en el lado h los intervalos de los tres grados estructurales se intersectan y por lo tanto no se puede asociar a cada grado un grupo de valores único.

4. CONCLUSIONES

En esta investigación se logró determinar y proponer valores de razón de amortiguamiento en vigas de madera de Pino Radiata que son usadas para la fabricación de paneles CLT. El análisis se realizó a un total de 60 vigas clasificadas visualmente y distribuidas de la siguiente forma: 20 vigas de grado GS, 20 de grado G1 y 20 de grado G2. Para enriquecer la propuesta se estudiaron 2 métodos de cálculo (decremento logarítmico y circle fit) y dos disposiciones de vibración vertical en las vigas (vibración en lado b y vibración en lado h). La razón de amortiguamiento obtenida como el promedio de todos los casos de vigas analizadas es 0.72%. Este valor es relativamente bajo, que implica una baja capacidad de disipación de energía, y es similar a lo informado por otros autores para otras especies madereras.

Los análisis realizados mostraron que el método del circle fit, para los tres grados estructurales de la madera, entregó valores promedio levemente mayores al método del decremento logarítmico. Las diferencias entre métodos son pequeñas (menor a 10%) por lo que se proponen promediar sus resultados. Para la vibración en el lado b de las vigas se obtienen razones de amortiguamiento de 0.55%, 0.75% y 0.73% para los grados GS, G1 y G2 respectivamente. Por su parte para vibración en el lado h, se obtienen valores promedio de 0.73%, 0.69% y 0.84% para los grados estructurales antes mencionados.

Para todas las vigas analizadas en ambos lados b y h, utilizando los dos métodos de cálculo, se observa que las pertenecientes al grado G2 presentaron valores promedio de razón de amortiguamiento mayores a las del grado GS. En el lado b son aproximadamente un 32% mayores y en el lado h un 15% mayores. Estos resultados coinciden con la teoría de amortiguamiento del material que tiene relación con los defectos del mismo. De hecho, se observa que las vigas con mayor cantidad de nudosidades (G2) tienen razones de amortiguamiento bastante mayores que las vigas con menos nudosidades (GS).

Al comparar los resultados obtenidos de las vigas vibrando respecto a su altura (h) y respecto a su base (b), se observó que para estos últimos casos se evidenciaba con más facilidad el efecto de las nudosidades en la razón de amortiguamiento. Esto se puede deber a que los nudos atravesaban generalmente a todo el lado menor de la viga (lado b) y solo parcialmente al lado mayor h.

Al analizar los gráficos de intervalos de confianza de las vigas ensayadas en el lado b, se observó una clara diferenciación de las vigas de grado GS con respecto a los otros grados. Esto permite definir un grupo de valores de razón de amortiguamiento pertenecientes únicamente al grado GS. Luego se puede afirmar con un 95% de confianza que, independiente del método de cálculo, las razones de amortiguamiento menores a 0.61% pertenecen al grado GS. De esta forma, la razón de amortiguamiento podría ser utilizada potencialmente como un predictor de grados estructurales selectos de vigas de madera.

REFERENCIAS

- [1] Karacabeyli, E. and Douglas, B. CLT Handbook Cross – Laminated Timber. US Edition. (2013).
- [2] Labonnote, N., Rønquist, A., & Malo, K. A.: Experimental evaluations of material damping in timber beams of structural dimensions. *Wood science and technology*, 47(5), 1033-1050, (2013).
- [3] Brandt, A. *Noise and Vibration Analysis: Signal Analysis and Experimental Procedures*. John Wiley & Sons, Ltd. (2011)
- [4] ASTM D6874-12, Standard Test Methods for Nondestructive Evaluation of Wood-Based Flexural Members Using Transverse Vibration, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2012)
- [5] Norma Chilena Oficial Nch1207 of.2005, “Pino Radiata – Clasificación visual para uso estructural – Especificaciones de los grados de calidad”. Instituto Nacional de Normalización (INN).(2005)
- [6] Videla, F. Determinación de Módulos de Elasticidad de Madera para Paneles CLT por Métodos Mecánicos y Dinámicos. Memoria de Título Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Universidad del Bío Bío. Concepción. (2015)
- [7] Lajara, J. y Pelegrí, J. *LabVIEW: Entorno Gráfico de Programación*. Segunda Edición. Editorial Marcombo. España. (2011)
- [8] Moore, H. *MATLAB para ingenieros*. Editorial Pearson Prentice Hall. (2007)
- [9] Maia, N. and Silva, J. *Theoretical and Experimental Modal Analysis*. Research Studies Press LTD. England. (1997)
- [10] Ewins, D. J.: *Modal testing: theory, practice and application*. Research Studies Press LTD., Baldock, Hertfordshire, England, (2000)
- [11] Minitab Inc. *Meet Minitab 16. Manual de usuario*. (2010)