

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**TESIS DE GRADUACIÓN**

**COMPORTAMIENTO, ANTE CARGAS LATERALES DE  
DIAFRAGMAS VERTICALES DE MADERA DE *Hieronyma*  
*alchorneoides* (ALLEMÃO) Y *Gmelina arborea* (ROXB. EX SM.)  
EN COSTA RICA.**

**TONNY LEIVA LEIVA**

**CARTAGO, COSTA RICA**

**2015**



**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**TESIS DE GRADUACIÓN**

**COMPORTAMIENTO, ANTE CARGAS LATERALES, DE  
DIAFRAGMAS VERTICALES DE MADERA DE *Hieronyma  
alchorneoides* (ALLEMÃO) Y *Gmelina arborea* (ROXB. EX SM.)  
EN COSTA RICA.**

**TONNY LEIVA LEIVA**

**CARTAGO, COSTA RICA**

**2015**

# COMPORTAMIENTO, ANTE CARGAS LATERALES, DE DIAFRAGMAS VERTICALES DE MADERA DE *Hieronyma alchorneoides* (ALLEMÃO) Y *Gmelina arborea* (ROXB. EX SM.) EN COSTA RICA.

**Tonny Leiva Leiva.**

## RESÚMEN

Para implementar el uso estructural de la madera es necesario conocer los esfuerzos de este material ante cargas en uso civil. El presente trabajo tiene como objetivo determinar los desplazamientos verticales y horizontales para dos tipos de diafragmas de madera de *Hieronyma alchorneoides* y *Gmelina arborea* en dos tipos de uniones, clavos y tornillos. Se determinaron las características físico-mecánicas y los esfuerzos admisibles de diseño de la madera utilizada, así como la carga lateral máxima de estos diafragmas. Se registraron los desplazamientos en sentido vertical y horizontal para realizar la comparación estadística y la calibración del modelo. Se obtuvo que la especie *H. alchorneoides* presentó las propiedades físico-mecánicas y esfuerzos admisibles de diseño superiores a la madera de *G. arborea*. Además, los diafragmas verticales de pared de *H. alchorneoides* ensamblados con tornillos presentaron los valores significativamente mayores de carga en el límite proporcional y carga máxima, así como la mayor relación carga-desplazamiento, en sentido horizontal y vertical, debido a las mejores características de la madera de esta especie comparada con *G. arborea* y del elemento de unión tornillo. Este tipo de diafragma presentó el menor porcentaje de calibración. Se concluye que en el comportamiento mecánico de una pared, el elemento que más influye es el tipo de unión (clavo o tornillo) y no tanto el tipo de madera. Así mismo es importante realizar más estudios utilizando uniones rígidas para determinar diferencias más marcadas entre las especies.

**Palabras clave:** Madera estructural, Diafragmas verticales, Cargas laterales.

## ABSTRACT

To deploy structural use of the wood it's necessary to know the efforts of this material in the face of loads in civilian use. The objective of this work is to determinate the vertical and horizontal displacement for two types of diaphragm of wood of *Hieronyma alchorneoides* and *Gmelina arborea* in two types of connection, nails and screws. Characteristics were determined

ii

Leiva, T. (2015). Comportamiento, ante cargas laterales, de marcos de madera de *Hieronyma alchorneoides* (Allemão) y *Gmelina arborea* (Roxb. Ex. Sm.) en Costa Rica. (Tesis de graduación). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago.

physico-mechanical and the allowable design efforts from the wood used, as well as the lateral load maximum of these diaphragm. Displacement occurred in vertically and horizontally to make the statistical comparison and calibration of the model. It was found that the species *H. alchorneoides* presented the physical-mechanical properties and efforts allowable design above the wood of *G. arborea*. In addition, the diaphragm of wall assemblies *H. alchorneoides* with screws presented the significantly higher values of load in the limit proportional and maximum load, as well as the highest relationship load-displacement, horizontally and vertically, due to the best characteristics of the wood of this species compared with *G. arborea* and the screw element of union. This type of diaphragm had the lowest percentage of calibration. It's concluded that on the mechanical behavior of a wall, the one factor that most influences is the type of connection (nails or screws) and not so much the type of wood. It's also important to carry out further studies using stiff joints to determine most marked differences between the species.

**Key words:** Structural Wood, Vertical diaphragms, Lateral loads.

## ACREDITACIÓN

Esta tesis de graduación ha sido aceptada por el Tribunal Evaluador de la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica y aprobada por el mismo como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura.

## COMPORTAMIENTO, ANTE CARGAS LATERALES, DE DIAFRAGMAS VERTICALES DE MADERA DE *Hieronyma alchorneoides* (ALLEMÃO) Y *Gmelina arborea* (ROXB. EX SM.) EN COSTA RICA.

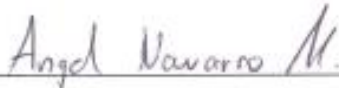
### Miembros del Tribunal Evaluador



Roger Alonso Moya Roque, Ph.D

Director de tesis.

Escuela de Ingeniería Forestal



Ángel Humberto Navarro Mora, Lic.

Lector

Escuela de Ingeniería en Construcción.



Carolina Tenorio Monge, M.Sc.

Lector

Escuela de Ingeniería Forestal.

## **DEDICATORIA**

A mi familia, a mis padres en especial, por el apoyo brindado durante los años de preparación profesional, por la educación personal que me han dado y por el esfuerzo que han puesto para sacarme adelante. A mi abuelo que se fue de este mundo y me acompaña siempre.

T. Leiva

## **AGRADECIMIENTOS**

Expreso mi agradecimiento a las empresas Maderas S&Q 2005 y ECOCAJAS S.A. por la colaboración con materia prima, al ingeniero Ángel Humberto Navarro Mora por su apoyo con el conocimiento técnico, a la estudiante Daynelins Estrada Rodríguez por su colaboración durante el trabajo y a todas las personas que de una u otra forma participaron para llevar a cabo este proyecto final.

# ÍNDICE GENERAL

RESÚMEN.....	ii
ABSTRACT.....	ii
ACREDITACIÓN.....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTOS .....	v
ÍNDICE GENERAL .....	vi
ÍNDICE DE CUADROS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	ix
ÍNDICE DE ANEXOS .....	x
INTRODUCCIÓN .....	1
Objetivos .....	2
MATERIALES Y MÉTODOS .....	2
Especies utilizadas: .....	2
Material utilizado: .....	3
Diseño y construcción de los diafragmas verticales: .....	3
Tipo de uniones:.....	4
Tipos de elemento en las uniones:.....	5
Ensayo de los diafragmas verticales: .....	5
Densidad, contenido de humedad y propiedades mecánicas de la madera: .....	7
Esfuerzos admisibles de diseño:.....	8
Valores de resistencia de los diafragmas verticales: .....	8
Calibración: .....	9

vi

Leiva, T. (2015). Comportamiento, ante cargas laterales, de marcos de madera de *Hieronyma alchorneoides* (Allemão) y *Gmelina arborea* (Roxb. Ex. Sm.) en Costa Rica. (Tesis de graduación). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago.

Diseño experimental y análisis estadístico:.....	10
RESULTADOS.....	10
Características de madera utilizada .....	10
Esfuerzos admisibles de la madera.....	11
Ensayo de carga lateral.....	11
Calibración .....	16
DISCUSIÓN .....	17
Características de la madera utilizada .....	17
Esfuerzos admisibles de diseño .....	18
Ensayo de carga lateral.....	19
Calibración .....	21
CONCLUSIONES .....	22
RECOMENDACIONES .....	23
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	24
ANEXOS .....	29

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Propiedades físicas y mecánicas de la madera utilizada para construir las paredes. .....	11
<b>Cuadro 2.</b> Esfuerzos admisibles de diseño para las especies utilizadas en la construcción de los diafragmas de madera al contenido de humedad respectivo.....	11
<b>Cuadro 3.</b> Valores de resistencia en deformación horizontal y vertical obtenidos de los diafragmas ensayados sometidos a carga lateral, Cartago 2015. ....	15
<b>Cuadro 4.</b> Valores de desplazamiento vertical y horizontal (mm), rigidez (kN/mm) y porcentaje de calibración de los diafragmas modelados.....	17

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> a) Diseño del diafragma vertical de madera de <i>H. alchorneoides</i> y <i>G. arborea</i> (todas las medidas en cm). b) Plantilla para ensamblaje de las paredes. c) Tipo y dimensión de clavos y tornillos utilizados en las paredes de madera. ....	4
<b>Figura 2.</b> Ilustración de la carga horizontal aplicada al diafragma de madera y el desplazamiento horizontal y vertical. ....	6
<b>Figura 3.</b> Ensayos del diafragma de madera. a) Configuración del marco y ubicación del diafragma para ser ensayado. b) Anclaje del diafragma al piso de laboratorio. c) Sensor de cuerda vibrante tipo crackmeter que registró el desplazamiento vertical. d) Ubicación del pistón que aplica la carga lateral y el sensor de cuerda vibrante tipo crackmeter para desplazamiento horizontal. ....	6
<b>Figura 4.</b> Ensayos para determinar las propiedades mecánicas de la madera de <i>H. alchorneoides</i> y <i>G. arborea</i> . a) Flexión estática. b) Compresión paralela al grano. ....	7
<b>Figura 5.</b> Salidas del programa SAP2000 para el modelo. a) modelo en 2D, b) modelo en 3D, c) modelo deformado. ....	9
<b>Figura 6.</b> Porcentaje de fallas que se presentaron en cada tipo de unión durante el ensayo. a) diafragma de <i>G. arborea</i> , unión clavo. b) diafragma de <i>G. arborea</i> , unión tornillo. c) diafragma de <i>H. alchorneoides</i> , unión clavo. d) diafragma de <i>H. alchorneoides</i> , unión tornillo.....	13
<b>Figura 7.</b> Principales fallas presentadas en los diafragmas de madera de ambas especies ensayadas bajo carga horizontal. a) Extracción de los clavos y levantamiento de las columnas. b) Deslizamiento de la pieza. c) Extracción y falla de los tornillos. d) Unión totalmente fallada. ....	14
<b>Figura 8.</b> Gráficos para el percentil 75 del desplazamiento horizontal y vertical de los diafragmas ensayados para los cuatro tratamientos. a) Carga-desplazamiento horizontal. b) Carga-desplazamiento vertical. ....	16

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo 1.</b> Cálculo de los esfuerzos de diseño de las especies utilizadas.....	29
<b>Anexo 2.</b> Valores de carga axial y momentos utilizados para el cálculo de rigidez.....	29

## INTRODUCCIÓN

La madera fue uno de los primeros materiales que usó el hombre para sus construcciones (Piccasdo y Magliocco, 2013), además de ser uno de los más utilizados en la historia (Rathod *et al.* 2015). Sin embargo, en la actualidad el uso de la madera estructural ha disminuido. Lemus & Romero (2014) explican que esto se debe al desconocimiento del material. En tanto, Patiño (2014) y Demirkir, Colakoglu & Karacabeyli (2013) señalan que la causa de la disminución del uso de la madera es la aparición de materiales sustitutos, principalmente el hormigón o concreto. Independientemente de los motivos, en la actualidad la madera ha sido removida a un segundo plano pero aún conserva sus propiedades estructurales como una elevada resistencia en flexión, en relación a su peso, superando al concreto y acero (Cruz *et al.*, 2015).

Las propiedades estructurales están en función de la forma en que está compuesta la madera, con fibras más largas o conductos más estrechos dependiendo de su naturaleza, esto permite que tenga un buen comportamiento ante los diferentes esfuerzos mecánicos a los que es sometida (Urbán, 2012).

La resistencia de la madera en uso estructural depende de muchos factores, entre los que se destaca la especie, contenido de humedad, el peso específico y tipo de unión entre piezas (Lemus & Romero, 2014; Moya, Leandro & Murillo, 2009; Tuk, 2010). En Colombia se han realizado algunos ensayos estructurales con madera en general y se encontró que la resistencia varía según el contenido de humedad y la especie (Lemus & Romero, 2014). Para *G. arborea* la resistencia mecánica presenta un comportamiento directamente proporcional a la densidad de la madera (Tenorio, Moya & Camacho, 2012). Con respecto a *H. alchorneoides*, Moya *et al.* (2009) concluyen que esta especie puede tener potencial para ser utilizada estructuralmente por sus propiedades mecánicas. Sin embargo se debe estudiar su comportamiento en edificaciones sometidas a cargas que alteren su estado normal.

Bajo regulaciones constructivas, las estructuras de madera permiten una habitabilidad apropiada (Barragán & Ochoa, 2014; Garay & Henríquez, 2010), por ejemplo las paredes y estructuras en general, construidas con madera en los Estados Unidos, han demostrado buena estabilidad lateral, en algunos países o regiones como Alaska, California, Japón, Nueva Zelanda y Quebec

1  
Leiva, T. (2015). Comportamiento, ante cargas laterales, de marcos de madera de *Hieronyma alchorneoides* (Allemão) y *Gmelina arborea* (Roxb. Ex. Sm.) en Costa Rica. (Tesis de graduación). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago.

las edificaciones han soportado terremotos (Demirkir *et al*, 2013). Con base en este hecho y tomando en cuenta el bajo peso que en consecuencia reduce su inercia (Patiño, 2011), se podría considerar que la madera es una buena opción para la construcción en los países que con frecuencia presentan sismos y terremotos (Dinehart & Shenton, 1998).

Sin embargo, para garantizar el comportamiento óptimo de una estructura ante eventos sísmicos se deben estudiar las diferentes propiedades de la madera, así como también las uniones entre los elementos que la componen, ya que éstas constituyen el punto débil de las estructuras en madera (Gálvez, 2011). Esto abre paso al desarrollo de un mercado estable y ayuda a determinar los usos de los productos construidos con madera (Moya & Gonzáles, 2014).

### **Objetivos**

Caracterizar un diseño de marco de diafragma vertical de madera de *Hieronyma alchorneoides* y *Gmelina arborea*.

Determinar la carga en el límite proporcional, el desplazamiento en el límite proporcional, las cargas máximas y sus desplazamientos horizontales y verticales según tipo de unión y especie.

Determinar las diferencias estadísticas entre los diafragmas de madera de *G. arborea* ensamblados con clavos, *G. arborea* ensamblados con tornillo, *H. alchorneoides* ensamblados con clavos y *H. alchorneoides* ensamblados con tornillo.

Calibrar un modelo de cada diafragma vertical de madera mediante el programa de modelación SAP2000.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

**Especies utilizadas:** Se utilizó madera de *Hieronyma alchorneoides* (Allemão) y *Gmelina arborea* (Roxb. ex Sm.) de aproximadamente 15 años de edad. La primera especie fue seleccionada por que la madera procedente de bosque natural fue tradicionalmente utilizada para la fabricación de estructuras en general (Tuk, 2010) y dentro de ellas en la construcción de casas de habitación. En tanto que la segunda especie fue seleccionada por su alta tasa de reforestación en Costa Rica (Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), 2014) y debido a que la madera de esta especie es utilizada para muchos usos, como por ejemplo en la construcción de

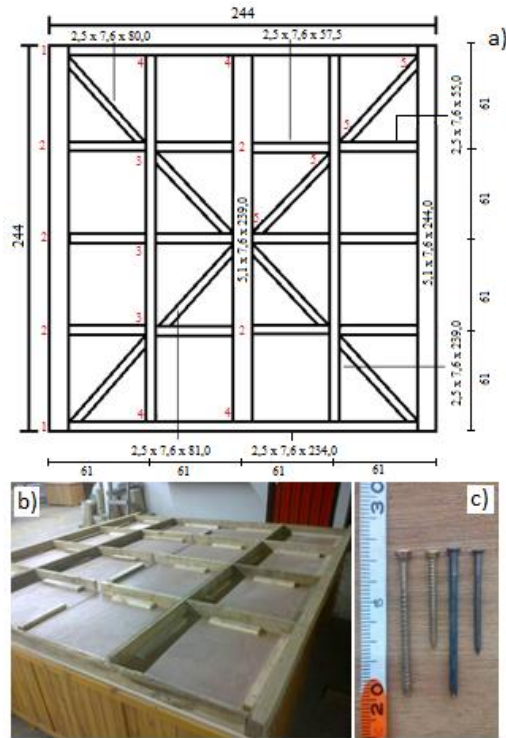
cerchas para casas de habitación (Vallejos *et al.*, 2015). Así mismo las empresas interesadas en estas especies construyen casas con este tipo de madera y desean tecnificar este material.

**Material utilizado:** La madera de *G. arborea* y *H. alchorneoides* fue obtenida de los aserraderos Maderas S&Q 2005 situado en el cantón de Pérez Zeledón, San José, Costa Rica y ECOCAJAS S.A ubicado en el cantón de Guápiles, Limón, Costa Rica, respectivamente. Dichos aserraderos se dedican a procesar madera de plantación para la construcción de casas de habitación. Las trozas presentaban un diámetro entre 22 cm y 33 cm, cosechadas cercanas a los aserraderos antes mencionados. En las trozas fue utilizado un patrón de corte típico para la obtención de madera para la construcción, concentrado en obtener piezas de 2,5 cm de espesor (Serrano y Moya, 2011). Luego estas tablas se re aserraron para obtener reglas de 2,5 cm de espesor por 7,5 cm de ancho.

Luego del aserrío ambos tipos de madera fueron secadas en un horno experimental siguiendo el programa de secado detallado por Muñoz & Moya (2008) en *G. arborea* y Tenorio *et al.* (2015) para *H. alchorneoides*. En ambos casos la madera fue secada a un contenido de humedad final del 16%.

**Diseño y construcción de los diafragmas verticales:** Se diseñaron diafragmas de paredes con una medida de 244 cm de ancho por 244 cm de altura (Figura 1.a). Se construyeron 12 diafragmas de madera de *G. arborea* y 12 diafragmas de *H. alchorneoides*, de estos 12 diafragmas de cada especie se ensamblaron 6 con clavo y 6 con tornillo. Los diafragmas están formados por cinco columnas: en cada lado de la estructura se colocaron columnas de 5,1 cm x 7,6 cm x 244,0 cm, en la parte central se colocó una columna de 5,1 cm x 7,6 cm x 239,0 cm. Además dos columnas internas con dimensiones 2,5 cm x 7,6 cm x 239,0 cm ubicadas a la mitad de la distancia entre la columna lateral y la columna central (61 cm). Estas cinco columnas son unidas por dos piezas horizontales de 2,5 cm x 7,6 cm x 234,0 cm. Para lograr una mayor estabilidad se colocaron entre las columnas piezas horizontales internas cada 61 cm, con dimensión de 2,5 cm x 7,6 cm y largo entre 55 cm y 57,5 cm según su posición. Finalmente para darle al diseño una mayor rigidez ante la aplicación de las cargas laterales se colocaron ocho piezas diagonales con medidas de 2,5 cm x 7,6 cm y aproximadamente 80 cm de largo (Figura

1.a). Luego de diseñar la propuesta del diafragma se procedió a dimensionar las piezas con forme las mediadas descritas anteriormente y se fabricó una plantilla o patrón para fabricar todas las paredes con las mismas dimensiones (Figura 1.b).



**Figura 1.** a) Diseño del diafragma vertical de madera de *H. alchorneoides* y *G. arborea* (todas las medidas en cm). b) Plantilla para ensamblaje de las paredes. c) Tipo y dimensión de clavos y tornillos utilizados en las paredes de madera.

**Tipo de uniones:** en el esqueleto las uniones que se presentaron fueron de cinco tipos diferentes, en donde se une el extremo (testa) con la cara de una pieza (Figura 1.a):

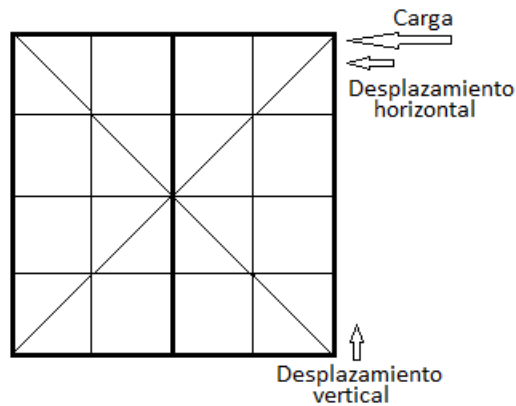
- i. unión 1: esta es la que se presentó en las esquinas del esqueleto, donde se unió la cara de las columnas exteriores con la testa de las piezas horizontales,
- ii. unión 2: es donde se dio la unión de la cara de las columnas exteriores y central con la testa de las piezas horizontales cada 61 cm,
- iii. unión 3: corresponde a la unión de las columnas internas por cara con las piezas horizontales por testa,

- iv. unión 4: es la unión de las piezas horizontales exteriores por cara con las columnas internas por testa
- v. unión 5: son las uniones de las piezas diagonales en ángulo de  $42^\circ$  con las demás piezas por cara.

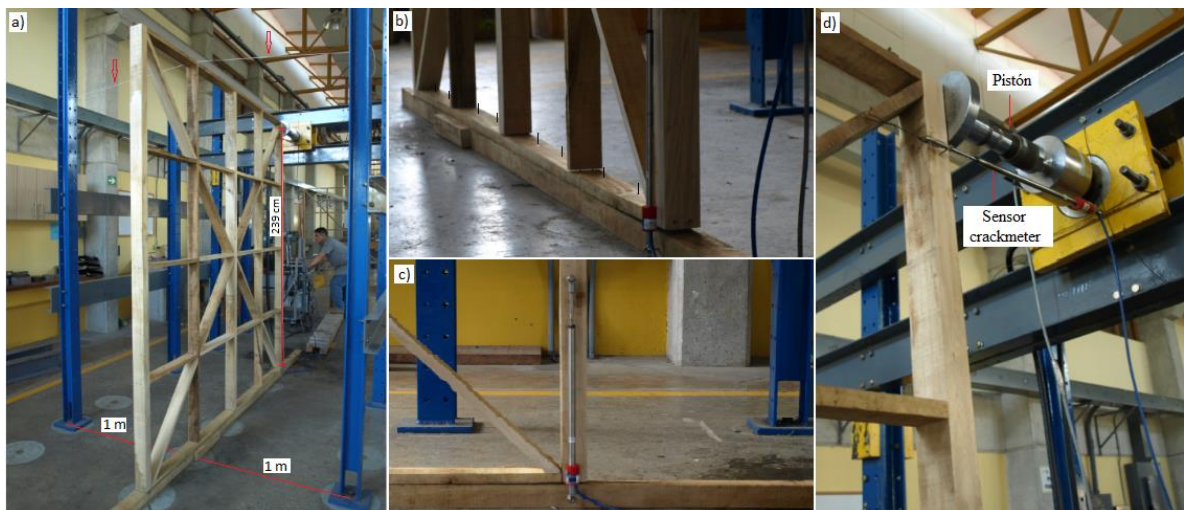
**Tipos de elemento en las uniones:** las anteriores uniones en el diafragma fueron hechas mediante dos elementos de unión, los cuales permiten una conexión semirrígida y además son los elementos más usados en Costa Rica para construcciones livianas. Los dos elementos de unión fueron: tornillo y clavo (Figura 1.c). Los tornillos usados fueron de cabeza plana tipo phillips en dos tamaños. En las uniones 1 y 2 fue usada una medida de 75 mm x 4,93 mm (tornillo #10) y en las uniones 3, 4 y 5 se usó tornillo de 50 mm x 4,27 mm (tornillo #8). Los clavos usados también fueron de dos medidas, de 75 mm x 3,5 mm (clavo #10) para las uniones 1 y 2 y clavo de 51 mm x 2,8 mm (clavo #12,5) para las uniones 3, 4 y 5. Finalmente los clavos o tornillos se colocaron aproximadamente a 2,5 cm del extremo de cada pieza para lograr un distanciamiento aproximado de 2,5 cm entre cada elemento de unión.

**Ensayo de los diafragmas verticales:** Los diafragmas fueron ensayados con una carga lateral (Figura 2). El diafragma fue colocado en un marco de acero, formado por columnas y vigas (Figura 3.a). El diafragma se ubicó en el centro del marco, a un metro de distancia de cada columna y para mantener la verticalidad se sujetó con una cuerda de cada lado (Figura 3.a). Por otra parte, fue colocada una pieza de madera de 5,0 cm x 7,6 cm x 350 cm anclada al piso de concreto con pernos para simular un piso de madera. La base inferior del diafragma (pieza de 2,5 cm x 7,6 cm) fue clavada a la pieza de madera anclada al piso con clavos de 75 mm x 3,5 mm (#10) o tornillos de 75 mm x 4,93 mm (#10) según el tipo de unión del diafragma, con un distanciamiento aproximado de 25 cm entre ellos (Figura 3.b) A los 239 cm de altura se colocó el punto centro del pistón, a 10 cm aproximadamente del borde superior del diafragma para aplicar la carga lateral (Figura 3.d). A esa misma altura se colocó el sensor de cuerda vibrante tipo crackmeter que registró el desplazamiento horizontal (Figura 3.d) y en la esquina inferior se colocó otro sensor de cuerda vibrante tipo crackmeter que registró el desplazamiento vertical (Figura 3.c). Durante el ensayo fue registrada la carga lateral y las dos deformaciones, horizontal

y vertical, que corresponden al desplazamiento de la estructura en sentido horizontal y vertical (Figura 2).



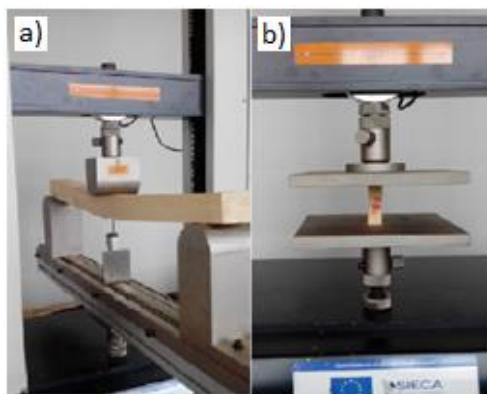
**Figura 2.** Ilustración de la carga horizontal aplicada al diafragma de madera y el desplazamiento horizontal y vertical.



**Figura 3.** Ensayos del diafragma de madera. a) Configuración del marco y ubicación del diafragma para ser ensayado. b) Anclaje del diafragma al piso de laboratorio. c) Sensor de cuerda vibrante tipo crackmeter que registró el desplazamiento vertical. d) Ubicación del pistón que aplica la carga lateral y el sensor de cuerda vibrante tipo crackmeter para desplazamiento horizontal.

**Densidad, contenido de humedad y propiedades mecánicas de la madera:** Se determinó la densidad de la madera (masa volumen<sup>-1</sup>) y contenido de humedad al momento del ensayo. Así mismo se determinaron dos propiedades mecánicas (flexión estática y compresión paralela al grano) en madera libre de defectos. Cada una de estas pruebas se realizaron en 30 muestras diferentes. Todas las muestras fueron extraídas de los esqueletos de las paredes una vez ensayadas y en las secciones que no sufrieron daños o reventaduras, específicamente de las columnas de 5,1 cm x 7,6 cm x 244,0 cm.

Primeramente se extrajeron las muestras de 5 cm x 5 cm x 78 cm para el ensayo de flexión estática acorde con la norma ASTM D143-14 (ASTM, 2007) (Figura 4.a). Luego que se realizó el ensayo fue extraído de la muestra de flexión una muestra de 2 cm x 2 cm x 6 cm para realizar la prueba de compresión acorde con la norma ASTM D143-14 (ASTM, 2007) (Figura 4.b), solo que se modificó la velocidad a 0,635 mm/min. Sin embargo, estas dimensiones fueron modificadas para poder llevar a cabo el ensayo, ya que la máquina de ensayos no tuvo la capacidad de fallar las probetas, de forma que las dimensiones finales fueron; para melina 1,8 cm x 1,8 cm x 6 cm y para pilón 1,4 cm x 1,4 cm x 6 cm.



**Figura 4.** Ensayos para determinar las propiedades mecánicas de la madera de *H. alchorneoides* y *G. arborea*. a) Flexión estática. b) Compresión paralela al grano.

Para el cálculo de la densidad y el contenido de humedad de la madera, nuevamente fueron extraídas muestras de las columnas de la pared de aproximadamente 5 cm x 5 cm x 5 cm, la misma muestra fue utilizada para ambas pruebas. Las probetas fueron primeramente medidas y pesadas (peso inicial), luego fueron secadas en estufa 24 horas a 105°C y pesadas nuevamente

para obtener el peso seco. El contenido de humedad se calculó con la ecuación 1, la densidad y el peso específico se determinó mediante la relación peso seco entre volumen.

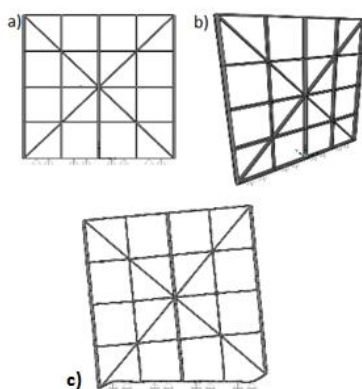
$$C.H (\%) = \frac{\text{peso inicial} - \text{peso seco}}{\text{peso seco}} * 100 \quad (1)$$

**Esfuerzos admisibles de diseño:** los esfuerzos admisibles fueron calculados para las dos especies utilizadas en este estudio (*G. arborea* y *H. alchorneoides*) para el grado estructural 3, ya que es el más restrictivo y conservador y representa la madera de menor resistencia, además Solís y Moya (2003) indican que las especies con un peso específico entre 0,40 y 0,55 se clasifican en grupo C para madera estructural en donde se ubican las especies utilizadas en este estudio.

La determinación de los esfuerzos se realizó con base en la norma ASTM D 245 (ASTM, 2003), además se tomó la razón de resistencia por grado estructural de la norma Madera estructural-Clasificación en grados estructurales para la madera aserrada mediante una evaluación visual (INTECO, 2011) y el factor por duración de carga de Tuk (2010).

**Valores de resistencia de los diafragmas verticales:** Para el cálculo de los valores de resistencia de los diafragmas de *G. arborea* y *H. alchorneoides* ensambladas con clavos y tornillos se generaron curvas de carga (kN)- desplazamiento (mm) para cada uno de los 24 diafragmas en donde se trazaron líneas de tendencia desde las coordenadas (0,0) hasta el punto en donde las curvas presentaron un cambio notable de pendiente procurando un R<sup>2</sup> igual o superior a 0,70, luego se determinaron los valores promedio de carga y los valores de desplazamiento del percentil 75 en el límite proporcional. Los valores de carga máxima y desplazamiento en la carga máxima se tomaron justo antes de presentarse la primera caída repentina de la carga, luego se procedió a promediar las cargas y determinar el valor de desplazamiento en el percentil 75 para cada tratamiento (diafragma de *G. arborea* ensamblado con clavos y tornillos y *H. alchorneoides* ensamblado con clavos y tornillos). Luego, para generar un análisis comparativo entre los tratamientos se realizó una relación carga-desplazamiento dividiendo la carga (kN) entre el desplazamiento (mm) correspondiente, tanto en el punto de fluencia como en la carga máxima de los diafragmas, esta relación corresponde a la carga que se debe aplicar para que los diafragmas se desplacen 1 mm.

**Calibración:** La calibración del modelo del diafragma consistió en ajustar los datos de desplazamiento vertical y horizontal en un modelo digital mediante el programa de modelación SAP2000, en la figura 5 se muestra el modelo y el mismo con una carga aplicada. En este se observa que el diafragma antes de la aplicación de carga lateral no presenta deformación (Figura 5a), luego aplicada la carga el modelo presenta una deformación en sentido horizontal y vertical (Figura 5c) e internamente experimenta distintas fuerzas y reacciones para lograr estabilidad y no colapsar. Además el programa permite visualizar el modelo en 3D (Figura 5b) para lograr observarlo desde distintos planos.



**Figura 5.** Salidas del programa SAP2000 para el modelo. a) modelo en 2D, b) modelo en 3D, c) modelo deformado.

Para el caso de la calibración del modelo en ambos sentidos (horizontal y vertical) se siguieron los pasos que se describen a continuación:

1. Se tomó una carga de 0,98 kN y se introdujo en el modelo. Esta carga es arbitraria, se pudo haber trabajado con cualquier carga dentro del rango elástico de los diafragmas, ya que en esta zona el esfuerzo (carga) es proporcional a la deformación según la Ley de Hooke (Díaz, 2005).
2. Para el caso del desplazamiento vertical se determinó la carga axial en las columnas, para el desplazamiento horizontal se promedió los momentos en cada una de las piezas horizontales que unen las columnas.
3. Mediante la ecuación 2 se determinó la rigidez (k) inicial correspondiente a los tipos de unión 2, 3 y 4.

4. Luego, para ambos sentidos, se multiplicó la rigidez inicial por el desplazamiento correspondiente obtenido del modelo y se dividió entre el desplazamiento experimental (obtenido en los ensayos) para obtener una nueva rigidez, la cual se le aplicó la misma operación hasta lograr un desplazamiento constante y así determinar la rigidez final que permite un desplazamiento similar al real, este proceso es conocido como iteración.

$$k = \frac{F}{\Delta} \quad (2)$$

**Diseño experimental y análisis estadístico:** Fue establecido un diseño experimental para los esqueletos de las paredes factorial  $2^2$ : dos especies (*H. alchorneoides* y *G. arborea*) y dos tipos de elementos en las uniones (clavos y tornillos). De cada tratamiento fueron construidos seis esqueletos de paredes (seis repeticiones), lo que significa que se construyeron 24 unidades en total, 12 por especie. Luego, para las variables medidas del ensayo de las paredes (carga en el límite proporcional, desplazamiento en el límite proporcional, carga máxima y desplazamiento en carga máxima) fue verificada la normalidad de los datos con la prueba de Shapiro-Wilks. Cuando no se comportaron de manera normal se realizó transformación para cumplir con la normalidad. Seguidamente se procedió a realizar el análisis de varianza (ANDEVA) considerando dos factores, especies (*H. alchorneoides* y *G. arborea*) y tipos de elementos en las uniones (clavos y tornillos). Finalmente para determinar si existían diferencias significativas entre los tratamientos correspondientes a los diafragmas construidos con *G. arborea* ensamblados con clavos, *G. arborea* ensamblados con tornillos, *H. alchorneoides* ensamblados con clavos y *H. alchorneoides* ensamblados con tornillos, se realizó una comparación de los tratamientos por medio de la prueba de Tukey.

## RESULTADOS

### Características de madera utilizada

En el cuadro 1 se presentan las características físicas y mecánicas promedio medidas para la madera de *H. alchorneoides* y *G. arborea* que se utilizó para construir los diafragmas verticales. Se observa que la especie *H. alchorneoides* presentó propiedades mecánicas (flexión estática y compresión paralela al grano) mayores que la madera de *G. arborea*. En cuanto al contenido de humedad la *G. arborea* presentó un porcentaje ligeramente mayor que la madera de *H.*

*alchorneoides*. Así mismo se observó que la madera de *H. alchorneoides* cuenta con un peso específico y densidad superiores a la madera de *G. arborea*.

**Cuadro 1.** Propiedades físicas y mecánicas de la madera utilizada para construir las paredes.

Especie	Flexión estática		Compresión		CH (%)	Peso específico	Densidad al % CH reportado (g/cm <sup>3</sup> )
	MOE (GPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)			
<i>G. arborea</i>	6,4 b (21,7)	44.9 b (25,3)	590.2 b (15,2)	24.4 b (14,9)	20,5 a (21,9)	0,42 b (12,11)	0,52 b (11,82)
<i>H. alchorneoides</i>	7,9 a (13,9)	66.8 a (15,9)	1079.1 a (9,9)	36.4 a (10,1)	18,4 a (6,0)	0,50 a (8,87)	0,59 a (9,20)

MOE: Módulo de elasticidad, MOR: Módulo de ruptura, CH: Contenido de humedad. Los números entre paréntesis corresponden al coeficiente de variación de los datos. Letra diferente indica diferencias significativas a  $p=0,05$ .

### Esfuerzos admisibles de la madera

Los esfuerzos admisibles determinados para la madera utilizada en este estudio se presentan en el cuadro 2. Se observa que la melina presentó nuevamente esfuerzos inferiores a los de la especie pilón, tanto en esfuerzo en flexión, en módulo de elasticidad como en el esfuerzo en compresión paralela.

**Cuadro 2.** Esfuerzos admisibles de diseño para las especies utilizadas en la construcción de los diafragmas de madera al contenido de humedad respectivo.

Especie	PE	F <sub>b</sub> (MPa)	E (MPa)	E <sub>min.</sub> (MPa)	F <sub>c</sub> (MPa)
<i>G. arborea.</i>	0,42	6,3	5314,1	4516,9	3,1
<i>H. alchorneoides.</i>	0,50	9,3	6580,4	5593,3	4,6

PE: peso específico, F<sub>b</sub>: esfuerzo en flexión, E: módulo de elasticidad, E<sub>min</sub>: módulo de elasticidad mínimo, F<sub>c</sub>: esfuerzo en compresión paralela.

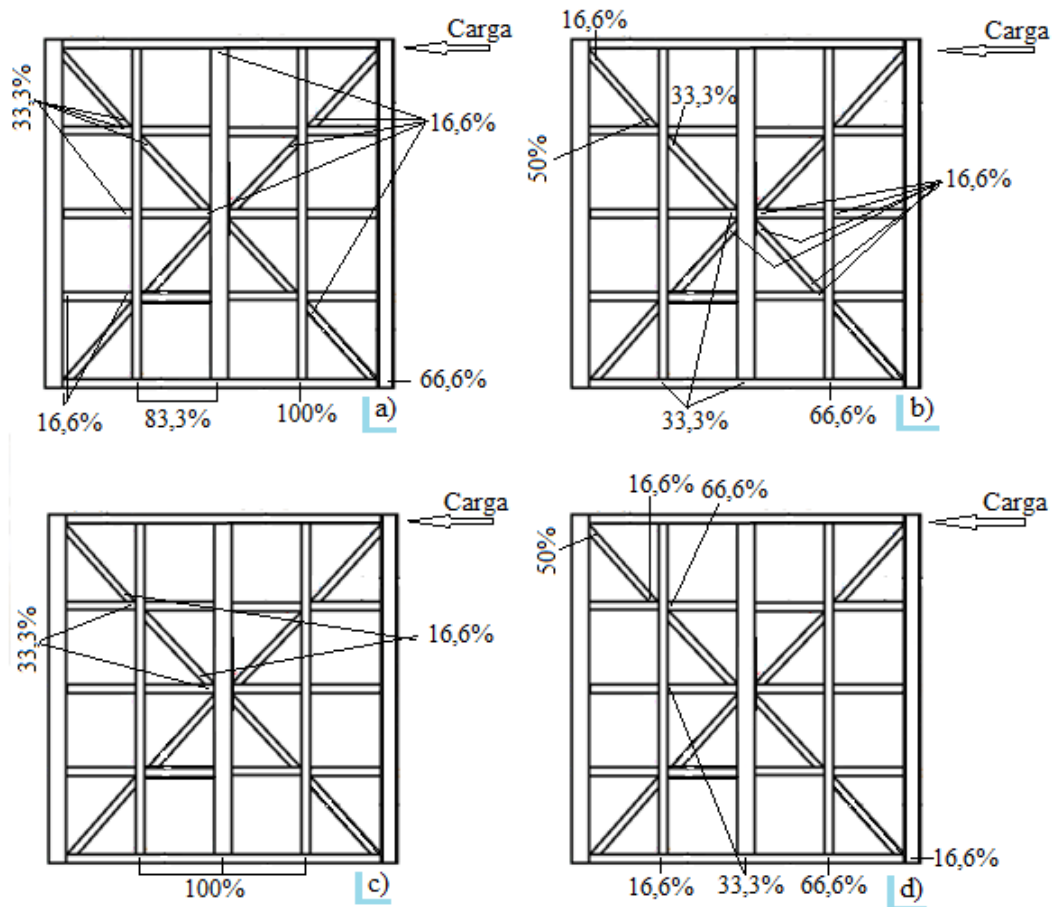
### Ensayo de carga lateral

Durante los ensayos de carga lateral (Figura 2), los diafragmas de madera presentaron diferentes fallas en la estructura, las cuales se presentan en la figura 6. La unión tipo 4 (unión de las piezas horizontales exteriores por cara con las columnas internas por testa) fue la que presentó un porcentaje mayor de fallas en las dos especies y en los dos tipos de herrajes utilizados en las

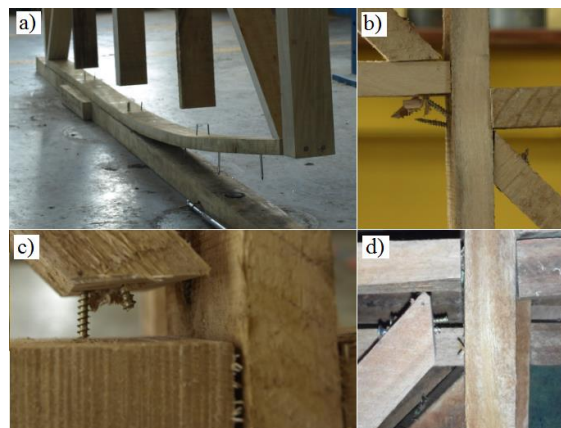
uniones. Los diafragmas de *G. arborea* y *H. alchorneoides* ensamblados con clavos alcanzaron altos porcentajes de fallas, hasta de 100% de los diafragmas, específicamente en la parte inferior de la estructura (Figura 6.a y c, Figura 7.a), pero los diafragmas de estas especies ensambladas con tornillo, aunque también presentaron ese tipo de falla, el porcentaje fue menor, entre 16,6 y 66,6%. Otra unión que presentó un alto porcentaje de falla fue la unión tipo 1, esta estuvo presente en el 66,6 % en los diafragmas de *G. arborea* ensambladas con clavos (Figura 6.a), en los diafragmas de *G. arborea* ensambladas con tornillo y los diafragmas de *H. alchorneoides* ensambladas con tornillo y clavo prácticamente no se dio.

Las fallas en las uniones tipo 2 se presentaron en todos los diafragmas en bajos porcentajes, entre 16,6 y 33,3%, excepto en los diafragmas de *H. alchorneoides* ensambladas con tornillo en donde no se presentaron fallas en este tipo de unión.

Las fallas en las uniones tipo 3 y 5 (Figura 1.a) se presentaron en todos los diafragmas y en las diferentes uniones (Figura 6) pero en bajos porcentajes, entre 16,6 y 33,3%, es decir sólo en 1 o 2 paredes por tratamiento. Así mismo es importante destacar que los diafragmas verticales construidos con madera de *G. arborea* presentaron mayor cantidad de fallas (Figura 6a-b) en relación a los diafragmas de *H. alchorneoides* (Figura 6c-d).



**Figura 6.** Porcentaje de fallas que se presentaron en cada tipo de unión durante el ensayo. a) diafragma de *G. arborea*, unión clavo. b) diafragma de *G. arborea*, unión tornillo. c) diafragma de *H. alchorneoides*, unión clavo. d) diafragma de *H. alchorneoides*, unión tornillo.



**Figura 7.** Principales fallas presentadas en las diafragmas de madera de ambas especies ensayadas bajo carga horizontal. a) Extracción de los clavos y levantamiento de las columnas. b) Deslizamiento de la pieza. c) Extracción y falla de los tornillos. d) Unión totalmente fallada.

Los valores de resistencia (carga promedio y desplazamiento en el límite proporcional en el percentil 75, carga máxima promedio y desplazamiento en carga máxima en el percentil 75) en sentido horizontal y vertical a la carga aplicada a los diafragmas son presentados en el cuadro 4. En él se puede observar que en sentido horizontal la carga que soportan los diafragmas en el límite de proporcionalidad varía de 1,6 a 2,9 kN y la carga máxima varía de 1,9 a 3,7 kN, en tanto que la deformación en estos puntos varía de 23,2 a 38,4 mm y de 30,2 a 55,6 mm respectivamente. Mientras que en sentido vertical la carga en el límite de proporcionalidad varía de 1,7 a 2,9 kN y la carga máxima varía de 1,9 a 3,8 kN, en tanto que la deformación respectiva varía de 4,8 a 10,8 mm y 8,2 a 27,3 mm.

Por otra parte se observa que en sentido vertical y horizontal los diafragmas construidos con madera de *G. arborea* y ensambladas con clavos presentaron el valor estadísticamente menor de carga en el límite proporcional y carga máxima. La carga promedio en el límite proporcional en los dos sentidos (horizontal y vertical) fue estadísticamente similar en los diafragmas de madera de *G. arborea* ensambladas con tornillos y en los diafragmas de madera de *H. alchorneoides* ensambladas con clavos, y estadísticamente superior en los diafragmas de *H. alchorneoides* ensambladas con tornillos. En tanto que en el punto de ruptura del diafragma, la mayor carga máxima fue encontrada en los diafragmas de *G. arborea* y *H. alchorneoides* ensambladas con tornillos, mientras que el diafragma de madera de *G. arborea* ensamblada con clavos presentó una carga máxima significativamente menor comparada con los diafragmas de *G. arborea* ensambladas con tornillo y los diafragmas de *H. alchorneoides* ensambladas con clavos y tornillos.

En el límite proporcional del desplazamiento horizontal y vertical se encontró que los diafragmas de *H. alchorneoides* presentaron mayor relación carga-desplazamiento y los diafragmas de *G. arborea* una menor relación (Cuadro 3), a excepción del desplazamiento vertical en los diafragmas de *H. alchorneoides* ensambladas con clavos que presentaron menor

relación respecto a los diafragmas de *G. arborea* ensambladas con tornillo. En el momento de la falla, en ambos sentidos, la mayor relación carga-desplazamiento se registró en los diafragmas de *H. alchorneoides* ensambladas con tornillo y la menor relación carga-desplazamiento en sentido horizontal se presentó en los diafragmas de *G. arborea*. En sentido vertical la menor relación carga-desplazamiento se dio en los diafragmas de *H. alchorneoides* ensambladas con clavos.

Otro aspecto importante de destacar es que los valores promedio de carga en el límite proporcional y carga máxima son similares tanto en sentido horizontal como en sentido vertical en ambas especies y ambos tipos de unión, pero en desplazamiento los valores son mayores en sentido horizontal que en sentido vertical (Cuadro 3).

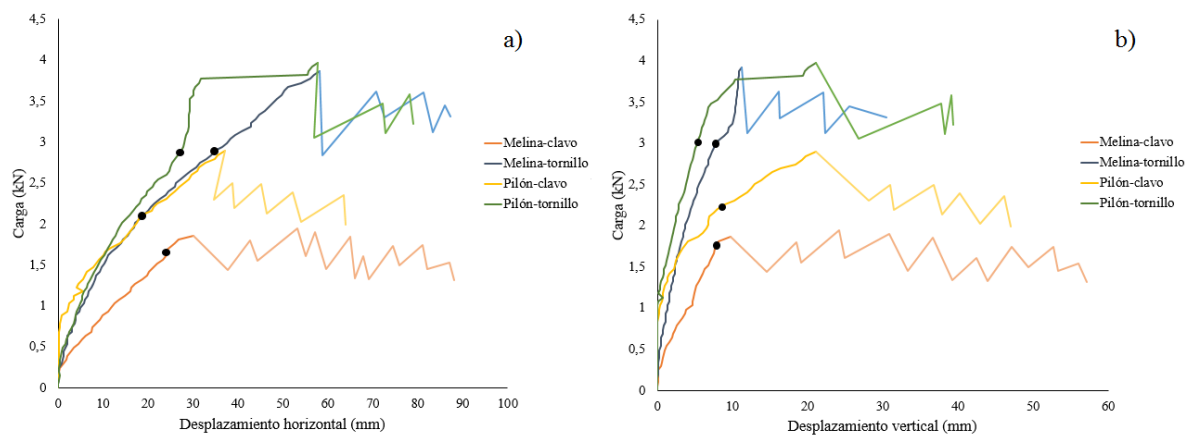
**Cuadro 3.** Valores de resistencia en deformación horizontal y vertical obtenidos de los diafragmas ensayados sometidos a carga lateral, Cartago 2015.

Especie	Tipo de unión	P <sub>lp</sub> (kN)	Δ <sub>lp</sub> (mm)	Deformación horizontal			
				RCD <sub>lp</sub> (kN/mm)	P <sub>m</sub> (kN)	Δ <sub>m</sub> (mm)	RCD <sub>m</sub> (kN/mm)
<i>G. arborea</i>	Clavo	1,6 a (13,2)	24,9 (21,6)	0,06 a	1,9 a (12,8)	33,8 (17,4)	0,06 a
	Tornillo	2,8 bc (10,3)	38,4 (23,0)	0,07 ab	3,6 bc(11,9)	55,6 (20,3)	0,06 ab
<i>H. alchorneoides</i>	Clavo	2,2 b (22,0)	18,1 (15,1)	0,12 bc	2,6 ab (16,3)	30,2 (15,3)	0,09 ab
	Tornillo	2,9 c (16,5)	23,2 (12,9)	0,13 c	3,7 c (12,2)	30,6 (14,3)	0,12 b
				Deformación vertical			
<i>G. arborea</i>	Clavo	1,7 a (7,7)	9,4 (7,2)	0,18 a	1,9 a (12,8)	13,0 (21,6)	0,15 ab
	Tornillo	2,8 bc (11,5)	7,0 (32,7)	0,40 ab	3,5 bc (14,5)	8,2 (6,3)	0,43 bc
<i>H. alchorneoides</i>	Clavo	2,2 b (22,1)	10,8 (37,0)	0,20 ab	2,6 ab (12,1)	27,3 (18,6)	0,1 a
	Tornillo	2,9 c (14,0)	4,8 (17,9)	0,60 b	3,8 c (3,9)	8,2 (35,0)	0,46 c

P<sub>lp</sub>: Carga en el límite proporcional, Δ<sub>lp</sub>: desplazamiento en el límite proporcional, RCD<sub>lp</sub>: relación carga-desplazamiento en el límite proporcional, P<sub>m</sub>: carga máxima, Δ<sub>m</sub>: desplazamiento en carga máxima, RCD<sub>m</sub>: relación carga-desplazamiento en la carga máxima. Letra diferente indica diferencias significativas entre los valores (p=0,05). Los números entre paréntesis corresponden al coeficiente de variación de los datos.

Con el fin de visualizar el comportamiento de la carga con el desplazamiento en los diferentes diafragmas con los dos tipos de madera y los tipos de uniones en sentido horizontal y vertical se presenta la figura 8. En los gráficos se observa que en los diafragmas ensamblados con tornillos de ambas especies de madera los valores de carga en un mismo desplazamiento son

superiores a los valores de los diafragmas ensamblados con clavos. Así mismo se observa que las curvas de los diafragmas construidos con madera de *H. alchorneoides* son ligeramente mayores que las curvas de los diafragmas construidos con *G. arborea*. Por otra parte, es importante destacar el comportamiento de la carga luego de que los diafragmas alcanzaran el punto de ruptura, en este punto se presentan irregularidades en los valores de carga, específicamente fluctuaciones en estos valores con forme la estructura continua desplazándose.



**Figura 8.** Gráficos para el percentil 75 del desplazamiento horizontal y vertical de los diafragmas ensayados para los cuatro tratamientos. a) Carga-desplazamiento horizontal. b) Carga-desplazamiento vertical.

### Calibración

Para el modelaje de los diafragmas se determinó la rigidez para las uniones en sentido vertical y en sentido horizontal, así como el desplazamiento obtenido mediante el programa SAP2000 para cada rigidez según el tipo de pared (Cuadro 4). Se obtuvo una rigidez para los diafragmas de *G. arborea* ensamblados con clavo de 0,035 kN/mm y para los diafragmas de *H. alchorneoides* ensamblados con clavo se obtuvo una rigidez de 0,053 kN/mm, mientras que los diafragmas de *G. arborea* y *H. alchorneoides* ensamblados con tornillo presentaron una rigidez superior, 255,3 y 485,2 kN/mm respectivamente, se observa en los datos que nuevamente se obtiene valores mayores donde se utilizó madera de *H. alchorneoides*. Por otra parte, los porcentajes de calibración en sentido vertical más altos se obtuvieron en los diafragmas de *G.*

*arborea* y *H. alchorneoides* ensamblados con clavos, 79,9 y 77,5 % respectivamente, mientras que los diafragmas de *G. arborea* y *H. alchorneoides* ensamblados con tornillos presentaron un porcentaje de 58,0 y 43,5. En sentido horizontal no se presentó un patrón, los diafragmas de *G. arborea* ensamblados con clavo se calibraron en un 100%, mientras que los diafragmas de *H. alchorneoides* ensamblados con clavo presentaron el porcentaje menor de 62,9. El promedio de porcentaje de calibración mayor se obtuvo en los diafragmas de *G. arborea* ensamblados con clavos, mientras que el promedio menor de porcentaje de calibración fue el de los diafragmas de *H. alchorneoides* ensamblados con tornillo.

**Cuadro 4.** Valores de desplazamiento vertical y horizontal (mm), rigidez (kN/mm) y porcentaje de calibración de los diafragmas modelados.

Tipo de pared	$k_v$	$\Delta_{vr}$	$\Delta_{vm}$	% <sub>c</sub>	$k_h$	$\Delta_{hr}$	$\Delta_{hm}$	% <sub>c</sub>	Promedio (% <sub>c</sub> )
<i>G. arborea</i> -clavo	0,035	5	6,3	80	756,1	13	13	100	89,9
<i>G. arborea</i> -tornillo	255,3	2	3,1	58	666,8	9,7	8,6	88	73,2
<i>H. alchorneoides</i> -clavo	0,053	5	3,8	78	4103,7	5,1	8,1	63	70,2
<i>H. alchorneoides</i> -tornillo	485,2	1	3,1	44	4836,5	6,2	6,5	95	69,4

$k_v$ : Rigidez para calibración vertical,  $\Delta_{vr}$ : desplazamiento vertical real,  $\Delta_{vm}$ : desplazamiento vertical del modelo, %<sub>c</sub>: porcentaje de calibración,  $k_h$ : rigidez para calibración horizontal,  $\Delta_{hr}$ : desplazamiento horizontal real y  $\Delta_{hm}$ : desplazamiento horizontal del modelo.

## DISCUSIÓN

### Características de la madera utilizada

En la evaluación de las propiedades generales de la madera libre de nudos (Cuadro 1) se refleja el efecto del peso específico de las especies utilizadas sobre las propiedades mecánicas. El *H. alchorneoides* es una especie maderable de alto peso específico por lo que presenta valores de esfuerzos mecánicos mayores a los que presenta la madera de *G. arborea* que tiene un peso específico menor (Cuadro 1) (Lascurain *et al.*, 2007; Arévalo y Hernández, 2008; Peña y Rojas, 2006).

Una característica importante de destacar de la madera de *G. arborea* es su mayor contenido de humedad (Cuadro 1). Este comportamiento se presenta porque esta madera es de difícil secado

(Moya, Muñoz y Escalante, 2006) debido a múltiples factores como bolsas de agua, diferencias entre tipos de corte, entre otros que generan una gran variación de contenido de humedad final y en ocasiones no se llega a secar completamente (Moya y Muñoz, 2006). Por otra parte, aunque el contenido de humedad influye en gran manera en las propiedades mecánicas de las especies (Gálvez, 2011; Zhou *et al.* 2015), las diferencias en la humedad en este caso no son un factor tan relevante. Las diferencias en cuanto a las propiedades mecánicas de las especies evaluadas es determinada mayormente por el peso específico, el cual presentó una diferencia significativa entre ambas especies, de esta forma será superior en sus propiedades mecánicas la especie que presente mayor peso específico (Moya y Gonzales, 2013).

### **Esfuerzos admisibles de diseño**

Si se comparan los resultados obtenidos con los esfuerzos admisibles presentados por otros autores (Tuk, 2010 y Moya y Gonzales, 2013) en madera de grado 3, se observa una similitud en algunos valores. Moya y Gonzales (2013) determinaron un esfuerzo en flexión para *G. arborea* grado 3 de 6,3 MPa lo cual concuerda con el presentado en el cuadro 3, el esfuerzo en compresión paralela al grano reportado por estos autores (2,7 MPa) es inferior al determinado en el presente estudio (3,1 MPa). Sin embargo, para el módulo de elasticidad reportan un valor de 6500 MPa, el cual es superior al determinado en este estudio, esto es consecuencia de que el peso específico de este estudio es inferior al que tiene la madera de *G. arborea* utilizada por Moya y Gonzales (Cuadro 1).

Por otra parte, para *H. alchorneoides* Tuk (2010) determinó un esfuerzo en flexión de 7,9 MPa, mientras que en este caso se determinó un esfuerzo en flexión superior de 9,3 MPa, en cuanto al módulo de elasticidad se presenta un valor considerablemente más alto de 8826,5 MPa comparado con 6580,4 MPa obtenido en este estudio, esto se da porque dicho autor presentó los valores para madera de bosque natural, la cual presenta mayor peso específico básico por contar con más edad y en consecuencia presenta mayor resistencia mecánica (Solís y Moya, 2003). Por otra parte, el esfuerzo en compresión paralelo al grano coincide con el reportado por Tuk (2010) de 4,6 MPa (Cuadro 2).

## Ensayo de carga lateral

Como era de esperar, la principal falla en los diafragmas, en los ensayos de carga lateral, fueron por las fallas de las uniones, las cuales ocurren por la flexión del metal que funge como transmisor de la carga, convirtiéndose en las regiones más críticas (Patiño, 2014). Un aspecto que debilita las uniones es que los elementos colocados con su eje paralelo a las fibras de la madera oponen baja o nula resistencia a la extracción directa o por acción de cargas laterales (Schwaner, 2008) por lo que consecuentemente las uniones donde se colocaron los clavos y tornillos en esta posición (unión 3 y 4, Figura 1a y Figura 6) fallaron con más frecuencia. Sin embargo para mejorar el desempeño estructural de estos puntos de falla es necesario mejorar la unión, por ejemplo utilizando placas dentadas, encolados, platinas de acero, entre otras (Fueyo, Domínguez y Cabezas, 2011; Aisalla, 2012) incluso utilizar algún tipo de forro. El mejoramiento de esas uniones permiten mejorar también las propiedades mecánicas de la estructura (Demirkir, Colakoglu, Karacabeyli 2013).

Los diafragmas de *G. arborea* ensamblados con clavos presentaron menor resistencia a la carga lateral (Cuadro 3) y mayor desplazamiento a una misma carga (Figura 8) en relación con los diafragmas de *H. alchorneoides*. Dicho comportamiento ocurre porque este tipo de madera es considerada como madera de mediana densidad (Moya *et al.*, 2011) y de densidad menor que la madera de *H. alchorneoides* (Cuadro 1). Por lo tanto este tipo de madera tiene mayor ductilidad (Schwaner, 2008) que le permite mayores deformaciones. Por el contrario, los diafragmas de *H. alchorneoides* presentaron una mayor resistencia y mejor comportamiento ante las cargas laterales por su peso específico superior, el cual brinda mayor dureza y mayor dificultad para la extracción de los clavos (Peña y Rojas, 2006). En general se considera que la resistencia de las uniones aumenta con el incremento de la densidad (Demirkir, Colakoglu, Karacabeyli, 2013).

Sin embargo, cabe destacar que a pesar de que el peso específico de la madera de *H. alchorneoides* es 16% mayor que el peso específico de la madera de *G. arborea*, las diferencias en los valores de resistencia y desplazamiento de los diafragmas no son de grandes proporciones. De hecho en los diafragmas de *G. arborea* ensamblados con tornillos y los de *H. alchorneoides* ensamblados con clavos en el límite proporcional no presentaron diferencias significativas, además los diafragmas ensamblados con clavos de ambas especies no presentaron diferencias

significativas en carga máxima, de la misma madera que los diafragmas ensamblados con tornillos de *G. arborea* y *H. alchorneoides*. Finalmente sólo se encontraron diferencias significativas en carga máxima entre los diafragmas contruidos con clavos y los diafragmas ensamblados con tornillos indiferentemente de la especie (Cuadro 3).

De acuerdo con el comportamiento anterior se infiere que la resistencia del diseño del diafragma es limitado mayormente por el elemento de unión (clavo o tornillo) que por el tipo de madera utilizada. Sin embargo, para determinar realmente estas diferencias entre especies, se debe controlar y diseñar uniones que resistan las fuerzas para que la estructura colapse por el tipo de madera y no por unión. No obstante, en el presente estudio se buscó contar con un diseño orientado principalmente a fallar por unión.

La mayor resistencia a cargas y menores desplazamientos presentados por los diafragmas ensamblados con tornillos, principalmente en sentido vertical, se deben a la zona roscada de estos que le permiten una mayor adherencia a las fibras de la madera, de esta forma opone una mayor resistencia a la extracción por diferentes esfuerzos (Gálvez, 2011). El clavo por no contar con esta cualidad es extraído con más facilidad a una carga menor y genera un desplazamiento mayor de la estructura. Dicho comportamiento fue comprobado por Nájera, Olivas y Méndez (2014) quienes investigaron la resistencia a la extracción de ambos elementos y encontraron resultados similares a los de este estudio, en donde los clavos presentaron una resistencia considerablemente inferior a la extracción respecto a los tornillos.

Por otra parte, se observaron caídas repentinas de la carga después de alcanzar la máxima resistencia de los diafragmas ensayados, dado por la extracción total o la falla de los elementos de unión. Gattesco y Boem (2015) explican que esto se debe a que se excede la capacidad de soportar deformación en los elementos de unión y en consecuencia pierden la capacidad de transmitir carga. Este comportamiento de caídas repentinas de la carga también se presentó en un estudio realizado por Sartori y Tomasi (2013) cuando los elementos conectores traspasaban los revestimientos de las paredes. Sin embargo esto no es un problema ya que las estructuras con uniones semirrígidas permiten que hayan caídas irregulares en la carga, donde la estructura sufre daños parciales y las uniones tienen la capacidad de disipar energía (Salas y Gonzales,

2011). Así, luego ocurre un proceso de redistribución de las cargas que hace que la pared no colapse (Branco y Descamps, 2015) y esto permite que los diafragmas soporten carga nuevamente, hasta que haya una nueva falla de las uniones, en donde se vuelve a dar la caída repentina de la carga (Figura 8).

### **Calibración**

La calibración de los diafragmas verticales de madera es fundamental para realizar un análisis sísmico de la estructura y obtener predicciones confiables del modelo (Rodríguez, Muñoz y Núñez, 2007). En el presente estudio se obtuvo un promedio de calibración para los diafragmas construidos con madera de *G. arborea* de 81,5% y para *H. alchorneoides* de 69,8%, los cuales son bajos comparado con otros tipos de materiales. Por ejemplo Rodríguez, Muñoz y Núñez (2007), para un estudio en puentes, lograron calibrar un modelo numérico en un 90,3%, Franco (2012) obtuvo una calibración de 93,7% para un templo. Este estudio logró una calibración con un porcentaje de error menor que el anterior. Esto puede deberse a la naturaleza del material utilizado para estas estructuras, acero y mampostería respectivamente, pues la madera es un material, hasta cierto punto, impredecible en su comportamiento estructural a diferencia del acero, concreto, aluminio entre otros, que pueden obtenerse las características absolutas (Tuk, 2010). Además, como ya se mencionó, los diafragmas fallaron principalmente en las uniones, a diferencia los estudios mencionados, en donde no se mencionan que haya sido este el punto débil de las estructuras, sino que más bien los puntos de unión se comportan como rígidos, esto vuelve más compleja la calibración, ya que se debe determinar la rigidez en cada unión para lograr un grado de libertad adecuado en estos puntos tal que se pueda desplazar como lo hace en la realidad.

Los diafragmas ensamblados con clavo presentaron una rigidez vertical menor que los diafragmas ensamblados con tornillo (Cuadro 4), los cuales coincidentemente fueron los que presentaron menor relación carga-desplazamiento en sentido vertical (Cuadro 3). Este comportamiento puede considerarse lógico ya que las uniones menos rígidas, por ejemplo cuando se usan clavos, permitirán mayores desplazamientos a una carga menor. Por otra lado, la rigidez horizontal presentó valores mayores en los diafragmas de *H. alchorneoides* ensamblados con tornillos y clavos, esto se da porque hay una combinación de factores, estos

diafragmas presentaron un momento o torque mayor y esto es consecuencia de una unión más rígida (Guardiola, 2007) (fuerza 13% mayor que las paredes de melina ensambladas con clavos y tornillos (Anexo 2)) que no permite mayores desplazamientos.

Por último, los diafragmas de *H. alchorneoides* ensamblados con tornillos presentaron el porcentaje más bajo de calibración en sentido vertical y los diafragmas de *H. alchorneoides* ensamblados con clavos en sentido horizontal, debido a que en los ensayos se registraron valores muy reducidos o nulos de desplazamiento en un rango de 0 a 1 kN (Figura 8) y en el programa de modelación no fue posible ajustarlo a tales desplazamientos.

## CONCLUSIONES

Los diafragmas de madera de *G. arborea* ensamblados con clavos presentaron una carga promedio en el límite proporcional significativamente menor a los demás diafragmas ensayados en este estudio, esta fue de 1,65 kN, en este punto se obtuvo un desplazamiento horizontal y vertical de 24,9 y 9,4 mm respectivamente. La carga máxima promedio soportada por estos diafragmas de *G. arborea* también fue significativamente menor comparada con los demás tratamientos, fue de 1,9 kN con un desplazamiento horizontal de 33,8 mm y un desplazamiento vertical de 13 mm. Por otra parte, los diafragmas de *G. arborea* ensamblados con tornillos y los diafragmas de *H. alchorneoides* ensamblados con clavos no presentaron diferencias significativas en carga promedio en el límite proporcional, estas fueron de 2,8 y 2,2 kN respectivamente. La relación carga-desplazamiento en el límite proporcional, en sentido horizontal, fue significativamente mayor en los diafragmas de *H. alchorneoides* ensamblados con tornillo, presentaron 0,13 kN/mm, este valor es 54% mayor que el obtenido en los diafragmas de *G. arborea* ensamblados con clavos, 46% mayor que el obtenido para los diafragmas de *G. arborea* ensamblados con tornillo y un 8% mayor que el valor de los diafragmas de *H. alchorneoides* ensamblados con clavos. En sentido vertical, la tendencia fue similar, los diafragmas de *H. alchorneoides* ensamblados con tornillo presentaron una relación carga-desplazamiento de 0,60 kN/mm, que representa un 70%, 33% y 67% más, respectivamente según el orden descrito para sentido horizontal.

Según el tipo de unión, en carga proporcional, se encontraron diferencias significativas en los diafragmas de *G. arborea* y *H. alchorneoides*, donde el elemento tipo clavo presentó el valor significativamente menor. En carga máxima, el tipo de unión que presentó los valores significativamente mayores fue el tornillo (3,5 a 3,8 kN) comparado con el tipo de unión clavo (1,9 a 2,6 kN), indiferentemente del tipo de madera utilizado.

Respecto a la especie, se visualizaron algunas diferencias entre tipo de madera, por ejemplo, es importante destacar que los diafragmas contruidos con *G. arborea* presentaron valores inferiores en la relación carga-desplazamiento en el límite proporcional en ambos sentidos, de la misma manera se presentó en la relación carga-desplazamiento en carga máxima pero solo en sentido horizontal, en sentido vertical no hay diferencias claras entre tipo de madera. En carga proporcional y carga máxima, los valores obtenidos son estadísticamente similares entre especies. En conclusión, los diafragmas de *H. alchorneoides* contruidos con tornillos fueron los que presentaron los mayores valores en las variables medidas.

Se lograron calibrar los modelos mediante el programa de modelación, donde se obtuvo el porcentaje de calibración mayor para los diafragmas de *G. arborea* ensambladas con clavo de 89,9% y el porcentaje menor de calibración se obtuvo para los diafragmas de *H. alchorneoides* ensambladas con tornillo, 69,4%.

## RECOMENDACIONES

Implementar la utilización de plywood pegado con clavos como forro, placas dentadas en las uniones más críticas u otras técnicas para disminuir los desplazamientos, aumentar la resistencia de cargas y mejorar la rigidez de las uniones y de esta forma permitir la transmisión adecuada de esfuerzos a los diferentes componentes de la estructura. Además, cambiar la posición de los clavos colocados de forma paralela a la fibra de la madera de la pieza que recibe el elemento de unión a una posición tipo lancero para mejorar el comportamiento de las uniones ante las distintas cargas.

Realizar un análisis sísmico con los modelos calibrados para determinar el comportamiento de los diafragmas verticales en estructuras de un nivel y poder determinar la viabilidad del uso de estos diseños en casas de habitación de Costa Rica.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aisalla, A. (2012). *Elaboración De Manual De Detalles Constructivos En Viviendas De Madera*. (Proyecto final, Escuela Politécnica Nacional). Recuperado de <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4488/1/CD-4102.pdf>
- Arévalo Fuentes, R. L., & Hernández, R. (2008). Efecto de los extractivos y la estructura anatómica en las propiedades mecánicas de la madera de caoba, *Swietenia macrophylla* King. *Colombia Forestal*, 11(1), 137-147.
- ASTM (American Society for Testing and Materials). (2003). Standard practice for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber.
- ASTM (American Society for Testing and Materials). (2007). Standard method of testing small clear specimens of timber.
- Barragán, A. E., & Ochoa, P. E. (2014). Estudio de caso: Diseño de viviendas ambientales de bajo costo, Cuenca (Ecuador).
- Branco, J. M., & Descamps, T. (2015). Analysis and strengthening of carpentry joints. *Construction and Building Materials*, 97, 34-47.
- Castellanos J. R. S., & Pérez, M. R. (2015). Caracterización físico-mecánica e indicadores de calidad de la madera de *Lysiloma* spp. *Investigación e Ingeniería De La Madera*, 10(3)
- Cruz, H., Yeomans, D., Tsakanika, E., Macchioni, N., Jorissen, A., Touza, M., . . . Lourenço, P. B. (2015). Guidelines for on-site assessment of historic timber structures. *International Journal of Architectural Heritage*, 9(3), 277-289.
- Demirkir, C., Colakoglu, G., & Karacabeyli, E. (2013). Effect of manufacturing factors on technological properties of plywood from northern turkey and suitability of panels for use in shear walls. *Journal of Structural Engineering*, 139(12)
- Leiva, T. (2015). Comportamiento, ante cargas laterales, de marcos de madera de *Hieronyma alchorneoides* (Allemaño) y *Gmelina arborea* (Roxb. Ex. Sm.) en Costa Rica. (Tesis de graduación). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago.

- Díaz, P. (2005). Evaluación de propiedades físicas y mecánicas de madera de *Nothofagus glauca* (hualo) proveniente de la zona de cauques. *Talca: Universidad De Talca, Chile*.
- Dinehart, D. W., & Shenton, H. W. (1998). Comparison of static and dynamic response of timber shear walls. *Journal of Structural Engineering*, 124(6), 686-695.
- Franco, G. (2012). Calibración de modelo numérico existente de una edificación de valor histórico mediante mediciones de vibración ambiental. Caso de estudio: templo de san Francisco de Asís de Bucaramanga. (Tesis, Universidad Industrial de Santander).
- Fueyo, J. G., Domínguez, M., & Cabezas, J. A. (2011). Rendimiento de uniones clavija de tipo perno encolado usando elementos finitos. *Información Tecnológica*, 22(4), 117-128.
- Gálvez, B. (2011). *Madera Estructural: Tipología y Cálculo De Uniones*. (Proyecto final, Universidad Politécnica de Valencia). Recuperado de [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12473/PFC-MADERA%20ESTRUCTURAL\\_TIPOLOG%3%8DA%20Y%20C%3%81LCULO%20DE%20UNIONES.pdf?sequence=1](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12473/PFC-MADERA%20ESTRUCTURAL_TIPOLOG%3%8DA%20Y%20C%3%81LCULO%20DE%20UNIONES.pdf?sequence=1)
- Garay, R., & Henríquez, M. (2010). Comportamiento frente al fuego de tableros y madera de *Pinus radiata* con y sin pintura retardante de llama. *Maderas.Ciencia y Tecnología*, 12(1), 11-24.
- Gattesco, N., & Boem, I. (2015). Seismic performances and behavior factor of post-and-beam timber buildings braced with nailed shear walls. *Engineering Structures*, 100, 674-685.
- Gómez Ruiz, G., & García Navarro, J. (2011). Revisión sobre el estado del arte del análisis de ciclo de vida para tableros derivados de la madera.
- Guardiola, A. (2007). *Comportamiento De Los Nudos Semi-Rígidos En Estructuras Metálicas De Edificación*. (Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia). Recuperado de
- Leiva, T. (2015). Comportamiento, ante cargas laterales, de marcos de madera de *Hieronyma alchorneoides* (Allemaño) y *Gmelina arborea* (Roxb. Ex. Sm.) en Costa Rica. (Tesis de graduación). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago.

<https://docs.google.com/viewerng/viewer?url=https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/1880/tesisUPV2546.pdf?sequence%3D1&isAllowed=y>

Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO). (2011). Madera estructural Clasificación en grados estructurales para la madera aserrada mediante una evaluación visual.

Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). (2014). VI Censo Nacional Agropecuario 2014. San José: INEC.

Lascurain, M., Angeles-Álvarez, G., Escalona, F. O., Candelaria, V. R. O., Ambrosio, M., & Avendaño, S. (2007). Características anatómicas y propiedades mecánicas de la madera de *Oecopetalum mexicanum* Greenm. & CH Thomps. (Icacinaceae) de la sierra de Misantla, Veracruz, México. *Madera y Bosques*, 13(2), 83-95.

Lemus Sánchez, J. S., & Romero Ruiz, Y. S. (2014). Diseño de un prototipo de viviendas sostenibles en madera para la región de la Mojana.

Moya, R., Muñoz, F., & Escalante, I. (2006). Aplicación de la tomografía axial computarizada para la detección de bolsas de humedad en madera seca de *Gmelina arborea* (roxb.). *Revista De Ciencia y Tecnología*, 24(2).

Moya-Roque, R., & Muñoz-Acosta, F. (2006). Aspectos relevantes a considerar durante el secado convencional de la madera de melina (*Gmelina arborea* (Roxb)). *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 3(9), 72-76.

Moya, R., Leandro, L., & Murillo, O. (2009). Características de la madera de *Terminalia amazonia*, *Vochysia guatemalensis* y *Hyeronima alchorneoides* plantadas en Costa Rica. *Bosque (Valdivia)*, 30(2), 78-87.

Moya-Roque, R., & Gonzáles-Beltrán, G. (2013). Esfuerzos admisibles de diseño por grado estructural para nueve maderas de plantación de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 11(26), 1-11.

Leiva, T. (2015). Comportamiento, ante cargas laterales, de marcos de madera de *Hieronima alchorneoides* (Allemaño) y *Gmelina arborea* (Roxb. Ex. Sm.) en Costa Rica. (Tesis de graduación). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago.

- Muñoz, F., & Moya, R. (2008). Moisture content variability in kiln-dried *Gmelina arborea* wood: Effect of radial position and anatomical features. *Journal of Wood Science*, 54(4), 318-322.
- Nájera Luna, J. A., Olivas Bejarano, J. P., & Méndez González, J. (2014). Esfuerzo de extracción de clavos y tornillos para madera en cuatro especies de pino de Durango, México. *Investigación y Ciencia-Universidad Autónoma De Aguascalientes*, (61), 41-47.
- Patiño Rocha, P. S. (2014). Análisis estructural de diafragmas de madera. (Proyecto final, Universidad de Cuenca). Recuperado de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/20930/1/TESIS.pdf>
- Peña, S. V., & Rojas, I. M. (2006). *Tecnología de la madera* Mundi-Prensa Libros.
- Piccardo, C., & Magliocco, A. (2013). The environmental profile of wood in the building industry today: Comments on the results of some LCA studies. *Nature*, 1(6), 122-128.
- Ramírez, G. Di Pace, A. (2002). *Comportamiento al fuego de revestimientos de madera*. Inédito.
- Rathod, S., Sub-Engineer, Z. P., & Durg, C. (2015). SUSTAINABLE BUILDING: AN REVIEW. *Int J Adv Engg Tech/Vol.VI/Issue I/Jan.-March*, 11, 13.
- Rodríguez, W., Muñoz, E., Núñez, F. (2011). Optimización aplicada a la calibración y validación de modelos de elementos finitos de puentes. *Revista Ingeniería Engineering Research*, 17(1)
- Salas, B., Gonzáles, G. (2011). Comportamiento estructural de paredes livianas con marco de madera y forro de madera contrachapada ante carga horizontal. Congreso estructuras 2011 XI Seminario de ingeniería estructural y sísmica. San José, Costa Rica, 17-19 agosto 2011.
- Sartori, T., & Tomasi, R. (2013). Experimental investigation on sheathing-to-framing connections in wood shear walls. *Engineering Structures*, 56, 2197-2205.
- Leiva, T. (2015). Comportamiento, ante cargas laterales, de marcos de madera de *Hieronyma alchorneoides* (Allemaño) y *Gmelina arborea* (Roxb. Ex. Sm.) en Costa Rica. (Tesis de graduación). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago.

- Schwaner, P. (2008) Diseño asistido de uniones estructurales de madera, constituidos por clavos y tornillos, mediante lenguaje php. (Tesis, Universidad Austral de Chile). Recuperado de <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2008/bmfcis399d/doc/bmfcis399d.pdf>
- Serrano, R., & Roque, R. M. (2011). Procesamiento, uso y mercado de la madera en Costa Rica: Aspectos históricos y análisis crítico. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 8(21), 1-12.
- Solís, M., Moya, R. (2003). *Hieronyma alchorneoides* en Costa Rica.
- Tenorio, C., Moya, R., & Camacho, D. (2012). Propiedades físico mecánicas de tableros terciados construidos con especies tropicales de plantaciones para uso estructural. *Cerne*, 18(2), 317-325.
- Tenorio, C., Salas, C., & Moya, R. (2015). Kiln drying behavior utilizing drying rate of lumber from six fast-growth plantation species in Costa Rica. *Drying Technology*, (just-accepted).
- Tuk, J. (2010). Madera: Diseño y Construcción. *San José: Colegio De Ingenieros y Arquitectos*.
- Urbán Brotóns, P. (2012). Construcción de estructuras de madera. Ecuador: Editorial Club Universitario.
- Vallejos, J., Moya, R., & Serrano, R. (2015). Effects of thinning on diameter, heartwood, density and drying defects of *Gmelina arborea*. *Maderas.Ciencia y Tecnología*, (AHEAD), 0-0.
- Zhou, A., Tam, L., Yu, Z., & Lau, D. (2015). Effect of moisture on the mechanical properties of CFRP–wood composite: An experimental and atomistic investigation. *Composites Part B: Engineering*, 71(0), 63-73. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.10.051>

## ANEXOS

**Anexo 1.** Cálculo de los esfuerzos de diseño de las especies utilizadas.

### *G. arborea*

Propiedad	Promedio (MPa)	Desviación estándar (MPa)	5 percentil (MPa)	Razón de resistencia G3	Factor de ajuste	Ajuste por secado	Esfuerzo grado 3 (MPa)	PE
Fb	44,9	11,4	38,2	0,4	0,48	0,86	6,3	0,42
E	6400,0	1388,0	6400,0	0,8	1,07	0,97	5314,1	
E <sub>min</sub>	6400,0	1388,0	5440,0	0,8	1,07	0,97	4516,9	
Fc	25,3	3,8	21,5	0,4	0,53	0,67	3,1	

### *H. alchorneoides*

Fb	66,8	10,6	56,8	0,4	0,48	0,86	9,4	0,5
E	7925,1	1102,6	7925,1	0,8	1,07	0,97	6580,4	
E <sub>min</sub>	7925,1	1102,6	6736,3	0,8	1,07	0,97	5593,3	
Fc	37,84	3,8	32,2	0,4	0,53	0,67	4,6	

PE: peso específico, F<sub>b</sub>: esfuerzo en flexión, E: módulo de elasticidad, E<sub>min</sub>: módulo de elasticidad mínimo, F<sub>c</sub>: esfuerzo en compresión paralela.

**Anexo 2.** Valores de carga axial y momentos utilizados para el cálculo de rigidez.

Tipo de pared	Carga axial (kN)	Momento (kN mm)
<i>G. arborea</i> -clavo	0,43	0,06
<i>G. arborea</i> -tornillo	0,43	0,06
<i>H. alchorneoides</i> -clavo	0,44	0,07
<i>H. alchorneoides</i> -tornillo	0,44	0,07