

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Losas en madera como propuesta de solución al diseño y construcción de pavimentos

Wood slabs as a proposed solution to the design and construction of pavement

Carlos Alfonso Devia Castillo¹, Fredy Reyes², Ivónn Morales³, Michel Morris⁴ & Juan Pareja⁵.Devia C, C., Reyes, F., Morales, I., Morris, M. & Pareja, J. (2016). Losas en madera como propuesta de solución al diseño y construcción de pavimentos. *Colombia Forestal*, 19(1), 95-109.**Recepción:** 9 de marzo de 2015**Aprobación:** 24 de agosto de 2015

RESUMEN

El presente artículo propone sustituir losas en concreto utilizadas para el sistema de transporte masivo Transmilenio por prefabricados de madera, como son las vigas laminadas, como estructura de pavimento con capa de rodadura.

Se evaluó el comportamiento mecánico de la madera de dos especies (*Pinus caribaea* y *Eucalyptus tereticornis*) a partir de simulaciones por el método de elementos finitos, posteriormente se determinó la configuración óptima para el diseño en madera y finalmente se verificó en laboratorio la configuración óptima determinada con la simulación para un diseño de 440 000 ejes. Con el uso de la máquina Universal de Ensayos y una carga de 6.50 toneladas equivalente a la de un semieje simple con dos ruedas, se encontró que el espesor de la losa de madera varía entre 0.125 y 0.24 metros para resistir esta carga. Se encontró que técnicamente los sistemas constructivos prefabricados con madera son una alternativa válida dentro del mercado de la construcción de pavimentos en la parte estructural. Adicionalmente corresponden a una innovación al ser una modificación en el sistema estructural de las losas, además de reducir el impacto ambiental.

Palabras clave: elementos finitos, losas en concreto, uniones dentadas y simples, vigas laminadas.

ABSTRACT

Alternatives to replace concrete slabs for prefabricated wood as structure of pavement with wearing course was evaluated, ensuring that these prefabrications work as a single element using finger joints. The mechanical behavior of two types of wood identified through simulations implementing a method of finite elements was evaluated, to subsequently determined optimal configuration for the alternative design with wood pavements and finally verified in the laboratory with the optimal configuration determined with simulation for a design of 440 000 vehicles shafts, with the use of the MTS machine and a load of 6.50 tons equivalent to a load of a single axle shaft with two wheels, found that for different traffic design the thickness of the slab of wood to resist this load varies between 0.125 and 0.24 meters.

This research shows that prefabricated wood building systems are a viable alternative in the market for pavement construction in the structural sense; additionally, they are an innovation since they modify

1 Pontificia Universidad Javeriana. Calle 40 No. 5-50 Edificio No. 11, Bogotá, Colombia. cdevia@javeriana.edu.co. Autor para correspondencia.

2 Pontificia Universidad Javeriana. Calle 40 No. 5-50 Edificio No. 11 Bogotá, Colombia. fredy.reyes@javeriana.edu.co.

3 Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia. ivonn.morales@hotmail.com.

4 Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia. michel_morris@hotmail.com.

5 Pontificia Universidad Javeriana. Calle 40 No. 5-50 Edificio No. 11. Bogotá, Colombia. jpareja@gmail.com.

the structural system of slabs, conventionally built on concrete slabs and reduce environmental impact.

Keywords: finite elements, namely slabs , jagged and simple unions, glulam.

INTRODUCCIÓN

Debido a los grandes problemas de movilidad de Bogotá, por la construcción de nuevos trayectos y reparación de tramos existentes de losas de concreto, se requiere un procedimiento que agilice estas obras y que a la vez favorezca al medio ambiente, que permita la conservación y preservación de los recursos existentes, como los agregados, disminuya la contaminación —principalmente por emisiones de gases efecto invernadero y la afectación ambiental que produce tanto la extracción de material pétreo como la fabricación del cemento— promoviendo el uso de materiales renovables como lo es la madera que, a partir del conocimiento en el desarrollo de aspectos tecnológicos como secado y transformación entre otros, es señalada a nivel internacional como la materia prima del futuro para la construcción (Fournier, 2008).

Ante la necesidad de realizar y ejecutar obras en vías en uso intensivo como las de Transmilenio, se propone reemplazar losas de concreto reforzado por losas prefabricadas de madera con una capa de rodadura. La manera de garantizar que las estructuras de madera trabajen como un solo elemento es mediante el uso de uniones simples y dentadas como lo son las vigas laminadas; en este sentido, se realizaron ensayos utilizando simulaciones numéricas por el método de elementos finitos, para representar el comportamiento de estas losas en condiciones de diseño y tráfico real.

De acuerdo con Guzmán (2008) y Reyes (2003), uno de los principales problemas de los pavimentos rígidos es el inadecuado comportamiento estructural del conjunto losa, sub-base y sub-rasante, en lo que la losa de concreto es un elemento rígido en comparación con sus capas de fundación, caso específico, las losas del sistema Transmilenio en Bogotá. Al incorporar un material como la madera,

que se reconoce por su elasticidad, flexibilidad y resistencia, es posible construir estructuras más ligeras: la relación resistencia/peso es 1.3 veces superior a la del acero y 10 veces a la del hormigón (Olabe *et al.*, 2010).

Partiendo del elemento estructural que se quiere estudiar y realizar, como son los bloques de losas en madera para pavimentos, existen investigaciones e invenciones que aportan información ya que utilizan la madera como elemento estructural para elaboración de pavimentos. Tiempo atrás, la patente de McCauley (1871) constó de bases de pavimentos formados a partir de bloques de madera que consistieron en una serie de largueros laterales y longitudinales unidos entre sí, donde los intersticios se llenaban y apisonaban con arena. Así mismo, Kalinin (1994) en su patente realizó una mejora en la construcción de pavimento de madera con dispositivos para la conexión de bloques de madera.

Por otro lado, en la patente de Flanigan & Winsler (1871) se describe una implementación de pavimento en calles y carreteras compuesto por madera y concreto, utilizando bloques de madera de diámetro pequeño.

La técnica de unión mecánica de vigas por medio de clavos, pernos, tarugos o cualquier tipo de unión se conoce desde hace siglos. El reemplazo de esas uniones comunes por una unión química efectiva se debe a Otto Hetzer, quien en 1905 hace conocer en Europa el sistema denominado *estructura Hetzer*, consistente de elementos rectos o curvos fabricados con vigas pegadas con adhesivo a base de caseína y cal pulverizada. Las primeras construcciones importantes se realizaron entre 1909 y 1919 en Suiza, Dinamarca y Suecia, bajo el procedimiento denominado *estructuras Töreboda*. La rápida evolución del sistema ideado por Hetzer se debe en gran medida a la evolución de

las técnicas de industrialización de la madera, la aparición de adhesivos sintéticos no degradables biológicamente, la ampliación de la capacidad de los sistemas de transporte y la mayor versatilidad de los programas de construcción civil, industrial y rural (Demkoff, 2003). Se señala que si bien las vigas laminadas ofrecen características de alta resistencia físico mecánica, son fundamentales las labores de selección de la madera y la ejecución propia de las vigas en la medida que estas pautas son determinantes en las resistencias físicas del objeto finalmente elaborado (Contreras & Owen, 1997). En este sentido, es fundamental contar con directrices claves sobre aspectos tecnológicos en la construcción de las vigas laminadas, por lo cual es sumamente importante seguir lineamientos claros en sus procesos constructivos (Araujo *et al.*, 2005), entre los que se cuentan principalmente las pruebas de control de calidad por medio de las normas (ASTM, 1995) —American Standard Testing Material— y para su utilización por medio del AITC —American Institute of Timber Construction—. Ambas entidades se encargan de establecer los requerimientos para la construcción civil con vigas laminadas estructurales, así como los parámetros de control de calidad de estos productos en las empresas dedicadas a su elaboración y utilización (Moya-Roque & Gonzalez-Trejos, 2012).

Un aspecto importante a señalar, para el caso de las vigas laminadas en madera en el sistema de Transmilenio, es la necesidad de contar con la compatibilidad —viga laminada en madera y su conexión con concreto—. En este sentido, estudios como el realizado por Cárdenas *et al.*, (2010) permiten identificar mecanismos muy eficaces para este tipo de secciones mixtas.

Actualmente se utiliza una tecnología que usa la madera estructuralmente para construir puentes con tableros tensados en madera. Esta idea comenzó en Ontario, Canadá en 1976 con la rehabilitación de tableros de puentes de madera clavada; posteriormente en Estados Unidos en 1980 como innovación tecnológica de tableros en madera y en la actualidad en Chile se están utilizando

un conjunto de vigas de madera tensadas en la dirección transversal por medio de barras de acero conformando placas para puentes. Estas placas son diseñadas a flexión, deflexión y compresión en dos apoyos, basándose en la carga que produce una rueda del camión de diseño HS20-44 —carga total 36 Ton— (AASHTO, 2005).

Las propiedades de la madera varían según la dirección que se considere y la acción del agua, tanto en forma líquida como en forma de vapor influye en su comportamiento, lo cual contribuye en algunos casos a la fatiga higroscópica y dimensional (Gindeo & García, 1991).

La madera, como material estructural, debe tener mecanismos de seguridad contra diferentes factores pero principalmente para el contenido de humedad. Las técnicas más utilizadas actualmente son: construir a relativa elevación del suelo, de manera que las bases permanezcan aisladas de plantas y zonas pastosas; y utilizar barreras como telas asfálticas y polietileno, entre la madera y los cimientos, para garantizar impermeabilidad. La variación de la humedad conduce generalmente a problemas de hongos e insectos; frente a este inconveniente los sistemas de inmunización ofrecen amplias garantías ya que las sustancias utilizadas son realmente efectivas. La diferencia entre la durabilidad de unas maderas y otras, se debe al mayor o menor contenido de resinas, taninos, o aceites que impregnan sus tejidos internos y principalmente la edad de la madera. La protección contra los organismos destructores, como son los hongos e insectos, se puede lograr desde un principio usando maderas de especies que posean gran durabilidad natural, esta se debe a que, por razones poco conocidas, el duramen o centro de los árboles queda impregnado con sustancias químicas que son preservadores eficaces. Según el uso estructural de la madera, se exige un adecuado control de calidad. Para la conformación de elementos estructurales deberá cumplir los requisitos de calidad para madera estructural establecidos en la Norma NSR-2010 numeral G.1.3.2 (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica -AIS-, 2010), y ajustarse a la

clasificación visual por defectos o por el numeral 3.1.9 de la NTC-2500 (ICONTEC, 1997).

La madera laminada estructural tiene una velocidad de degradación baja, requiere poco mantenimiento y es altamente resistente a agentes agresores que son nocivos para otros materiales. Gracias a esta propiedad, la madera laminada es empleada como protección para elementos estructurales metálicos o de concreto reforzado en construcciones industriales y portuarias (Demkoff, 2003). Las estructuras de madera laminada tienen un comportamiento frente al fuego que es favorable desde distintos puntos de vista (Demkoff, 2003), entre los que se señalan: I) tienen un comportamiento bastante regular ante incendios, lo cual las hace previsible y confiables, con la ventaja de poder modelar y calcular los efectos que el fuego tiene en ellas; II) dado que los elementos de madera se van consumiendo poco a poco ante la presencia de fuego, el colapso de una estructura puede predecirse con cierta exactitud; III) una estructura de madera que ha sido expuesta al fuego por periodos superiores a una hora, puede ser rehabilitada y puesta en funcionamiento con costos inferiores a las estructuras de otros materiales; IV) la rigidez de la madera presenta variaciones mínimas cuando es sometida a temperaturas elevadas, esto la hace mucho más competente que los elementos metálicos que presentan grandes deflexiones con incrementos relativamente bajos de temperatura, o los elementos de concreto reforzado, cuya resistencia al fuego es directamente proporcional al recubrimiento de concreto que tienen las barras de acero.

Respecto a la protección de la madera, como materia de origen orgánico, está compuesta principalmente de celulosa y lignina, es especialmente estable, no obstante por su propia naturaleza constituye la base de alimentación de organismos vivos del reino fungi (hongos) y reino animal; así mismo puede ser atacada por muchos compuestos químicos; y la existencia del carbono en la celulosa la vuelve un material combustible. La intemperie es uno de los agentes físicos que deterioran la madera y es causada por las condiciones climáticas del

medio ambiente como lluvia, viento y luz solar. Es un fenómeno que ataca solo a las capas superficiales (aproximadamente se desgasta 0.1 mm del grosor de la madera por año), cambiando la apariencia natural de la madera. Por otro lado, puede ser una de las causas para que otro tipo de agentes biológicos (microorganismos, hongos, bacterias) dañen profundamente la madera. Los factores que provocan este fenómeno son: las radiaciones ultravioleta, el calor, humedad y la contaminación atmosférica (USFPL, 1966). Además, la humedad produce cambios en la anatomía de la superficie de las células e induce la formación de grietas causadas por la contracción e hinchamiento periódico o cíclico de la madera, mientras que el calor acelera la velocidad de las reacciones químicas que se llevan a cabo (Cassens & Feist, 1986, como se cita en Castillo & Erdoiza, 1995). Para disminuir todos los problemas que afectan el material a nivel estructural, es necesario proteger a la madera con sustancias adecuadas, clasificadas en dos tipos: I) Las que penetran a través de la superficie de la maderas y II) las que forman una película recubriendo la superficie de la madera.

Con respecto a las vigas laminadas, de acuerdo con la configuración que se tiene para analizar bloques de madera como losas, se conoce como elementos de madera laminada a las piezas de sección transversal rectangular de ancho fijo y altura constante o variable, las cuales están compuestas por laminas o tablas unidas con un adhesivo. El espesor de estas láminas se encuentra entre 20 y 45 mm mientras que su largo se encuentra limitado por posibilidades de transporte. La efectividad del encolado en la mayoría de casos incrementa la resistencia nominal de las secciones, convirtiéndolo en un procedimiento de unión muy efectivo (Demkoff, 2003).

Según la norma NSR-2010, título G:

La madera laminada (Glulam en inglés) es una técnica que consiste en producir elementos macizos de gran resistencia, por ensamble de tablas pequeñas de excelente calidad, libres de defectos, encoladas

con adhesivos estructurales unas a otras en sus extremos (unión “finger joint”) y caras, de forma tal que se comporten como una sola unidad estructural.

Los elementos así formados pueden tener diferentes aplicaciones estructurales y su longitud estará determinada por las limitaciones del transporte y de los equipos de montaje. La técnica de laminación requiere especiales condiciones de temperatura y humedad relativa, así como madera seca con un contenido de humedad del 12%. Los adhesivos utilizados deben ser resistentes a la humedad, de tal manera que la madera laminada puede ser empleada en estructuras a la intemperie (la norma ICONTEC NTC 2500 regula la calidad de los adhesivos). Finalmente la organización de las vigas se puede realizar de acuerdo con su resistencia y rigidez a fin de obtener componentes eficientes.

En cuanto a las uniones, las secciones de madera se empalman mediante un procedimiento que según la Norma ASTM D 5572 (ASTM, 1995) se define como unión dentada o *finger joint* a “La unión formada al pegar dos miembros pre-cortados en forma de dedos o listones”. De acuerdo con Pruzzo & Ramos (1992), la unión dentada es una técnica que tiene como propósito obtener elementos de mayor longitud mediante el ensamblaje longitudinal en los extremos, los cuales están constituidos por una serie de dientes equidistantes de forma trapezoidal o triangular de manera que se adquiera una buena estabilidad dimensional y obteniendo en el producto final una presentación sin defectos (Karsulovic & León, 1998 como se cita en Pruzzo & Ramos 1992).

El adhesivo es uno de los materiales más importantes al momento de fabricar vigas laminadas ya que es el material que mantiene unidas dos piezas de madera, de forma que las piezas unidas resistan los esfuerzos físicos y mecánicos. Las uniones se realizan de una forma muy compleja que incluye aspectos mecánicos y aspectos físico y químicos. Así mismo, la resistencia entre la interface del adhesivo con la madera, depende la resistencia total de las vigas laminadas. Varios estudios en la

mecánica del daño de las uniones madera-adhesivo sugieren que existe una zona de afectación producida por la interface adhesivo-madera y que el daño se produce únicamente en la madera y no en la interface ni línea del adhesivo. El mecanismo tiene en cuenta la dilatación conjunta y la fricción posterior por agrietamiento (Demkoff, 2003).

Marra (1992) utiliza una definición en la que participan nueve enlaces diferentes de los materiales para crear la unión adhesivo-madera. Estos enlaces de la madera y los adhesivos crean dos zonas adherentes en las superficies del material, generando un espesor finito que representa la adhesión intermolecular con propiedades diferentes debido a la proximidad de la madera y del adhesivo. Al momento de relacionar los materiales, se incorporan los enlaces en las regiones de interface quedando cinco regiones o materiales, dos adherentes mayor adhesivo y dos interfaces de las regiones para tener un espesor finito, pero muy pequeño en relación con otras dimensiones aproximadamente iguales a la penetración del adhesivo en las uniones con la madera. La penetración del adhesivo parece ser limitada y moderada a la primera celda en cada lado de la línea de unión. Los tipos de adhesivos se clasifican en función del material utilizado para realizar la unión: adhesivos inorgánicos (de silicato sódico); adhesivos orgánicos; adhesivos naturales, sean animales (pieles, huesos, pescado, albumina, caseína) o vegetales (almidón, semilla de soja); y adhesivos sintéticos. Los adhesivos sintéticos son las que más se utilizan actualmente (Contreras et al., 2007).

De acuerdo con la forma escogida para la modelación de losas en madera se tiene que el método de elementos finitos es un procedimiento de aproximación de problemas continuos, de forma que el continuo se divide en un número finito de partes, los cuales tienen un comportamiento que se define por un número finito de parámetros y en la solución del sistema (ensamblaje de elementos) se aplican las mismas reglas de los problemas discretos (Zienkiewicz, 1982). Según Patanker (1980), referenciado por Guerrero et al. (1999), el

concepto del método de elementos finitos es dividir o discretizar el continuo en un número finito de elementos y resolver para cada uno de estos las ecuaciones del sistema para luego ensamblar la solución total. De acuerdo con este procedimiento, es necesario conocer los parámetros del material o datos de entrada, que permitan el análisis de la madera en un software para este tipo de método, siendo estos el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson. El coeficiente de Poisson es la relación entre la deformación unitaria en la dirección en la que se aplica la fuerza y la deformación unitaria en la dirección perpendicular a la que se aplica la fuerza (García, 2006). De acuerdo con Serrano & Gustafsson (1999), para la simulación numérica por métodos de elementos finitos de uniones madera-adhesivo, específicamente uniones dentadas, estos proponen un análisis de esfuerzo plano lo que conlleva a tener elementos de menos grados de libertad, con una malla muy discretizada alrededor de la línea de adhesivo. Este análisis de esfuerzo plano aplica para la simulación que se tiene de la losa de madera, ya que las dimensiones de las uniones son muy pequeñas en comparación con la longitud que se desarrolla en el plano perpendicular al plano estudiado.

Para la realización del estudio se ensayaron dos tipos de maderas: *Pinus caribaea* (Sénécl.), W.H.G. Barrett & Golfari, y *Eucalyptus tereticornis* var. *dealbata* (Schauer), H. Deane & Maiden, de alta oferta en el mercado de las plantaciones forestales en Colombia y sobre las cuales existe un conocimiento básico sobre su comportamiento estructural.

El *E. tereticornis* es una especie de albura permeable, con duramen resistente que proporciona material aserrado muy bueno y es uno de los mejores para la producción de elementos estructurales según estudios referenciados de Berni et al. (1979). De acuerdo a las normas ASTM adoptadas por el ICONTEC, la madera maciza de esta especie posee buenas propiedades físicas y mecánicas (Refocosta, 2005) a partir de los resultados de Ensayo Propiedades físico mecánicas —Laboratorio Tecnología de Maderas. Universidad Distrital,

2005— (Refocosta, 2005). Touza & Infante (2008) y Pedras et al. (2009) plantean que las características del Eucalipto permiten la exploración de nuevas aplicaciones de su madera.

El *P. caribaea*, se considera una madera moderadamente pesada, con grano generalmente recto, duramen color marrón rojizo, el cual varía con la cantidad de resinas, la albura es de color pálido y anillos de crecimiento claramente definidos por bandas de tejido denso y con muy buenas características para usos estructurales, (Escobar, 1985) y es obtenida de árboles jóvenes, los cuales, crecen muy rápidamente y sus propiedades varían con el lugar de origen. Esta especie es obtenida con un promedio de 11 años de plantación (Berni et al., 1979). El Pino caribe se califica como moderadamente resistente al fuego. Los mejores resultados de esta madera son producidos en los sitios similares a su área de distribución natural en Centroamérica y los Estados Unidos (Berni, 1979). De acuerdo a las normas ASTM adoptadas por el ICONTEC, la madera maciza de nombre común Pino, posee buenas propiedades físicas y mecánicas (Refocosta, 2005) a partir de los resultados de Ensayo Propiedades físico mecánicas —Laboratorio Tecnología de Maderas. Universidad Distrital, 2005— (Refocosta, 2005). De manera específica, Contreras et al. (1997) realizó estructuras laminadas con pino y otros materiales, así mismo, en el cálculo de los esfuerzos de diseño de vigas laminadas de Pino caribe (*P. caribaea*) encoladas con adhesivo de isocianato (MDI) con muy buenos resultados.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología se desarrolló a partir de revisión de fuentes secundarias, modelación matemáticas y ensayos en laboratorio. La revisión de literatura abordó aspectos asociados a las maderas de las especies a estudiar, vigas laminadas y esfuerzos de estructuras para rodadura de vías; en laboratorio se corroboró la resistencia física y mecánica de las especies analizadas. La modelación matemática

permitió determinar los esfuerzos máximos para las vigas laminadas sometidas a carga por tráfico, a partir de elementos finitos. Finalmente se realizó a escala 1:1 la determinación de esfuerzos para un prototipo de viga laminada, a partir de un ensayo en la máquina de fuerza. A continuación se señala de manera específica los materiales utilizados y los procedimientos desarrollados.

Materiales

Para la investigación se utilizó madera y materiales pétreos.

Se trabajaron dos tipos de maderas provenientes de plantación en Colombia: (*P. caribaea* y *E. Tere-ticornis*). Las maderas de estos árboles, además de su alta capacidad forestal, cuentan con propiedades mecánicas que les permite ser utilizadas como elementos estructurales en el área de pavimentos.

Para el ensayo se consideró una capa de base y sub base granular, como parte integral de la estructura de pavimento, mejorando la subrasante con estos materiales obteniendo un módulo resiliente y CBR equivalente, dando un módulo de reacción de la subrasante de 77 MPa/m.

Dadas las condiciones del tránsito que se quiere diseñar y debido a las condiciones de la madera, se utilizó sobre la capa de base granular una mezcla asfáltica tipo MDC-3 de 0.03 m de espesor y otra sobre la madera, estas capas no presentan aporte estructural.

Métodos

Evaluación módulo de elasticidad en laboratorio

Se realizaron ensayos a probetas para obtener módulos de elasticidad en dirección longitudinal y transversal a las fibras de la madera en condición estática y dinámica.

Se elaboró un montaje en la máquina MTS para ensayar 10 probetas rectangulares de los dos tipos de madera de sección transversal de 0.05 por 0.05 metros y altura de 0.10 metros, aplicando una

carga a 1, 2, 4 y 10 Hz de frecuencia, como se muestra en la [figura 1](#). A los resultados de módulo de elasticidad se les aplicó un coeficiente de modificación por humedad de 0.95.

Determinación del tipo de madera a partir de sus esfuerzos máximos

Se realizó una revisión de esfuerzos máximos horizontales en la dirección perpendicular y paralela a las fibras para las dos especies estudiadas.

Comportamiento mecánico en laboratorio de interacción con el adhesivo

Se realizaron ensayos a probetas de la madera escogida en vigas macizas y con uniones dentadas con el fin de determinar: el módulo de rotura, como parámetro fundamental al momento de realizar el diseño de pavimento por la metodología PCA (PCA, 1984) y para comparar los esfuerzos máximos obtenidos. La metodología PCA (Portland



Figura 1. Foto de ensayo para obtención de módulos de elasticidad.

Cement Association) diseñada para pavimento rígido, fue escogida ya que en sus requerimientos para diseño uno de los parámetros fundamentales es el módulo de rotura del concreto, que en este caso se consideró para madera. Debido a que el material estaría sometido a cargas repetitivas por el tránsito en su periodo de diseño, los módulos obtenidos serán afectados por un factor de fatiga en maderas que según Okuyama *et al.* (1984) es de 0.70 en la condición más crítica de 10 Hz en tensión.

Módulo de elasticidad de la unión adhesivo-madera, el cual se utilizó como valor del adhesivo en los modelos

Se realizaron ensayos para determinar la resistencia de la madera a la flexión, con probetas sin defectos para vigas de madera maciza y con uniones dentadas. La resistencia a la flexión se calculó mediante la ecuación 1:

$$\sigma_{\max} = \frac{3PL}{2ae^2} \quad \text{ecuación 1}$$

Donde: P es la carga, L la longitud entre apoyos, a el ancho y e el espesor de la probeta.

Se tuvo en cuenta como resultado el menor valor obtenido, un módulo de rotura de 18.10 MPa presentado en una viga con unión dentada.

Determinación del módulo de elasticidad de la unión adhesivo-madera

Para determinar el módulo de elasticidad del adhesivo se usó el ensayo a flexión de vigas con unión dentada de manera que a partir de los datos fuerza-deflexión se pudiera obtener el módulo de elasticidad de acuerdo con la ecuación 2:

$$\sigma_{\max} = \frac{PL^3}{248EI} \quad \text{ecuación 2}$$

Donde: la deflexión δ para cada carga P, la longitud L entre apoyos y la inercia I de las vigas ensayadas y E el espesor de la probeta.

Hallando el módulo de elasticidad para cada viga, con un promedio para cada nivel de deflexión y uno entre vigas, obteniendo un valor de 15 837 MPa.

Simulación numérica de la configuración óptima para obtención de espesores

Se realizó la simulación para la losa de dimensiones convencionales (3.65 por 4.10 m). Se consideró la carga del semieje del camión de diseño en tres condiciones realizando una envolvente. En las zonas donde se aplicaron las cargas se tuvo una discretización de la malla más fina con respecto al resto del modelo. Los resortes mantienen su valor de 77 MPa/m.

Para determinar los esfuerzos en la losa de madera, en dirección perpendicular y paralela a las fibras, se realizó un modelo para cada uno de los espesores definidos 0.12, 0.16, 0.20, 0.24 y 0.28 metros.

Simulación numérica del ensayo a realizar

Se simuló el comportamiento del ensayo de laboratorio para obtener valores de esfuerzos en el sentido perpendicular a las fibras, donde se pudo comparar con los cálculos realizados a partir de las mediciones de los *strain gages* en laboratorio.

Verificación en laboratorio de la configuración óptima de la losa de madera

A partir de conocer la configuración óptima de la losa y los resultados obtenidos de las simulaciones numéricas, se verificó en laboratorio el comportamiento real de la estructura bajo un diseño de pavimento. El montaje del ensayo en el laboratorio consistió en una estructura de pavimento que soportó la losa a ensayar dentro de un foso circular de acuerdo con la figura 2.

Para medir deformaciones horizontales en la losa, se instrumentó con *strain gages* en la superficie de la madera en las zonas más desfavorables en cuanto a la dirección de las fibras y la aplicación de carga.

Diseño de pavimento

La metodología empleada para la obtención de espesores de las estructuras obedece a los criterios de la PCA (Portland Cement Association) para pavimento rígido. Esta fue escogida ya que en sus requerimientos para diseño uno de los parámetros

fundamentales es el módulo de rotura del concreto, que en este caso se consideró para madera.

Debido a que el material estaría sometido a cargas repetitivas por el tránsito en su periodo de diseño, los módulos obtenidos fueron afectados por

un factor de fatiga en maderas que según [Okuyama et al. \(1984\)](#) es de 0.70 de acuerdo con la [figura 3](#), en la condición más crítica de 10 Hz en tensión. Para un módulo de rotura de 18.10 MPa afectado por el factor de fatiga se tiene como resultado 12.70 MPa.

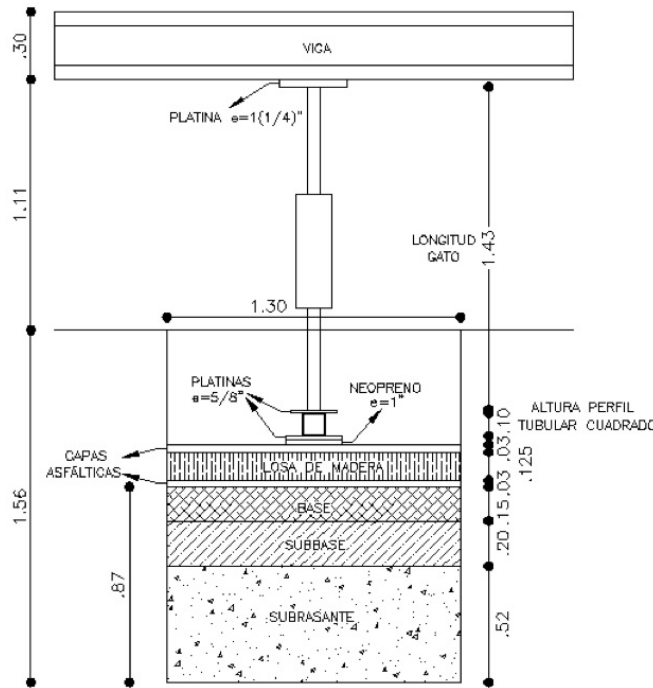


Figura 2. Esquema del montaje del ensayo con la Máquina MTS (m).

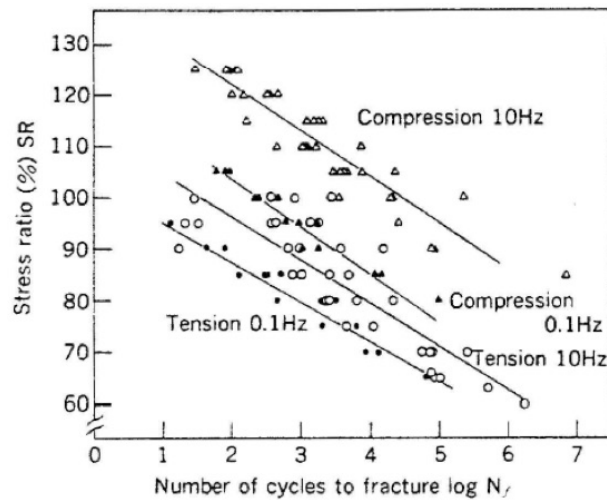


Figura 3. Diagrama S-N de compresión y tensión para fatiga (Okuyama et al. 1984).

Espesores de estructuras de diseño

Se utiliza el software BS-PCA (García, 2003) para diseño de pavimentos rígidos en donde se evidencia el cumplimiento y validación del dimensionamiento de las estructuras de pavimento. La aceptación de los espesores de las estructuras de diseño se valida con el análisis de fatiga y de erosión, que es permisible hasta el 150% siempre y cuando el análisis de fatiga permanezca en 0% de acuerdo con lo indicado por las Especificaciones IDU (2005).

Instrumentación del ensayo mediante strain gages

Se implementaron 2 sensores compuestos por 2 *strain gages* acoplados a unas platinas metálicas y separados 0,075 metros, unidos por cables a una tarjeta de adquisición y transformación de datos para analizarlos por medio de dos canales correspondientes a cada sensor, como se muestra en la figura 4. En la figura 5 se observa la localización de los sensores que corresponden al Canal 0 y 1.

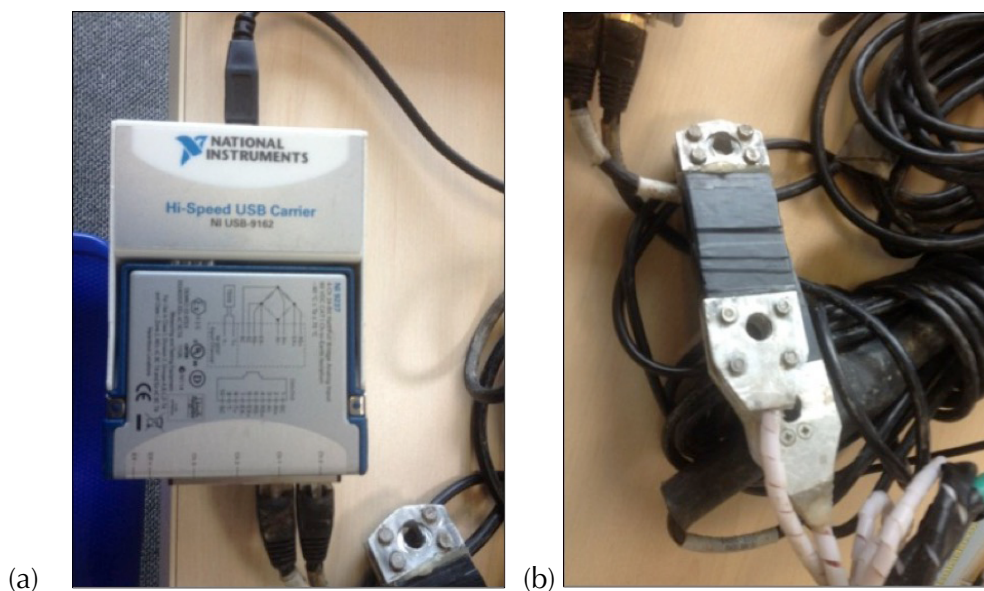


Figura 4. Sensores tarjeta de datos (a) y Strain gages (b).



Figura 5. Ubicación de los sensores canal 0 y 1.

RESULTADOS

Módulo de elasticidad en laboratorio

Para el pino, en corte longitudinal, se encontraron módulos de elasticidad entre 14 500 y 14 452 MPa, y módulos de elasticidad por cm² entre 13 775 y 13 728 en frecuencias comprendidas entre 1 y 10 Hz en corte transversal. Así mismo, se encontraron módulos de elasticidad entre 1532.2 y 1557.6 MPa, y módulos de elasticidad por cm² entre 1456 y 1480 en frecuencias comprendidas respectivamente entre 1 y 10 Hz (Tabla 1).

Para el eucalipto, en corte longitudinal, se encontraron módulos de elasticidad entre 9893 y 10 047 MPa y módulos de elasticidad por cm² entre 9399 y 9545 en frecuencias comprendidas entre 1 y 10 Hz, en corte transversal. Así mismo, se encontraron módulos de elasticidad entre 657 y 738 MPa, y módulos de elasticidad por cm² entre 624 y 702 en frecuencias comprendidas respectivamente entre 1 y 10 Hz (Tabla 1).

Esfuerzos máximos obtenidos para las maderas y determinación del tipo de madera

Se realizó una revisión de esfuerzos máximos horizontales en la dirección perpendicular y paralela a las fibras para las dos especies (Tabla 2).

De acuerdo con las simulaciones y resultados anteriores se puede concluir que los esfuerzos en el sentido perpendicular y paralelo a las fibras son menores para el *P. caribaea* que para el *E. tereticornis*, por lo tanto se escoge la especie de madera Pino caribe para la determinación de espesores según el tráfico.

Simulación numérica de la configuración óptima del Pino caribe para obtención de espesores

Los resultados de los modelos mostraron una reducción de esfuerzos en ambos sentidos de las fibras a medida que se incrementan los espesores y estos no superan los valores de módulo de rotura hallados en los ensayos a flexión.

Simulación numérica del ensayo realizado

Los esfuerzos obtenidos fueron de 1.85 y 5.83 MPa para el canal 0 y 1 respectivamente.

Espesores de estructuras de diseño

Para diferentes tráfico de diseño de un semieje de 6.5 Ton, el espesor de la losa de madera varía entre 0.125 y 0.24 metros teniendo como parámetro limitante el consumo de erosión.

Tabla 1. Módulos de elasticidad de los dos tipos de madera.

Material	Módulo de Elasticidad PMA	Fuente
<i>Pinus caribaea</i>	10 084	Amorim et al., 2007
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	12 322	Cifuentes & Medina, 2005

Tabla 2. Esfuerzos máximos para cada tipo de madera.

Tipo de madera	Esfuerzo máximo perpendicular a las fibras (MPa)	Esfuerzo máximo paralelo a las fibras (MPa)
<i>Pinus caribaea</i>	5.63	2.05
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	8.38	3.04

Esfuerzos y deformaciones de la instrumentación del ensayo mediante *strain gages*

En el ensayo de laboratorio se tomaron mediciones de deflexiones horizontales en el sentido perpendicular a las fibras. A partir de estas deflexiones, se hallaron las deformaciones unitarias dividiendo cada valor de deflexión entre la longitud a ejes del dispositivo de medición. Los valores máximos fueron 0.0011 para el canal 0 y 0.0032 para el canal 1. Conocidas estas deformaciones de los sensores se hallaron los esfuerzos multiplicando las deformaciones por el módulo de elasticidad en el sentido perpendicular a las fibras. Los esfuerzos máximos son 1.42 MPa para el canal 0 y 3.96 MPa para el canal 1.

Ensayo con la máquina MTS

La máquina MTS garantizó la aplicación de la carga de 6.50 toneladas durante todo el ensayo a la misma frecuencia, llegando finalmente a 440 000 ciclos de carga. Este ensayo duró 80 220 segundos.

Verificación del K de reacción del ensayo

Se comprobó mediante un modelo en el programa de elementos finitos PLAXIS, el montaje del ensayo bajo las condiciones reales de soporte y carga de la losa, con el fin de verificar cuál fue el K de reacción. Se realizó un modelo axisimétrico ingresando las dimensiones de la estructura de pavimento sobre la placa de concreto. Las fases de simulación que se aplicaron fueron a partir de la carga desde 0 hasta 6.50 toneladas, obteniendo como resultados esfuerzos y desplazamientos en la interfase de la base granular-madera.

Variación de esfuerzos del modelo en PLAXIS.

Con los datos de las lecturas en cada fase de la simulación, se construyó la gráfica esfuerzo vs desplazamiento para determinar el K de reacción de

la estructura, obteniendo un valor de 364 MPa/m. La aproximación del K de reacción obtenido con la simulación numérica en PLAXIS es 4.72 veces mayor que el K obtenido con el diseño de pavimentos. Esta diferencia es elevada debido a la hipótesis planteada.

Simulación numérica del ensayo realizado con el K de reacción modificado

Determinado lo anterior, se procede a hallar los valores de esfuerzos en los puntos donde se instalaron los *strain gages*. Se obtuvieron esfuerzos de 1.06 y 3.61 MPa para el canal 0 y 1 respectivamente.

DISCUSIÓN

Se corroboró que efectivamente la madera tiene alta capacidad para absorber energía, lo cual se traduce en la altísima resistencia al esfuerzo simulado de carga por tráfico, señalando de manera particular que en proporción con su peso la estructura de madera tiene muy elevada resistencia a la flexión, lo cual permite construir estructuras más ligeras, la relación resistencia/peso es 1.3 veces superior a la del acero y 10 veces a la del hormigón (Olabe *et al.*, 2010); sin embargo, es importante señalar que un papel fundamental en la resistencia de las vigas laminadas es la elaboración la cual es determinante para optimizar el desempeño de las vigas laminadas (Contreras *et al.*, 2007). Siendo, sin embargo, una tecnología aún por implementar en la medida en que lo más cercano al uso específicamente estructura corresponde a las placas de madera pos tensadas para cargas totales de 36 Ton. (Giudem, 2005). Por lo cual es sumamente importante seguir lineamientos claros en sus procesos constructivos (Moya-Roque & Gonzalez-Trejos, 2012).

Teniendo en cuenta que el uso de la madera para la construcción de losas eventualmente la someterían a factores deteriorantes de esta, como las radiaciones ultravioleta, el calor, humedad y la contaminación atmosférica (USFPL, 1966), se debe

contemplar medidas que minimicen dichas causas, para lo cual el recubrimiento con sustancias diseñadas especialmente para este fin lo lograría.

Así mismo, se debe garantizar condiciones de estanqueidad para la madera evitando cambios en su contenido de humedad pues estas producen cambios en la anatomía de la superficie de las células e induce a la formación de grietas causadas por la contracción e hinchamiento periódico o cíclico de la madera (Cassens & Feist, 1986), lo cual se logra a partir del uso de productos para terminado de esta. Se sugiere, de acuerdo con Castillo & Erdoiza (1995), el uso de sustancia protectoras que penetrarían la madera proporcionando la capacidad de repeler al agua, protegiéndola contra agentes degradadores (hongos, insectos, intemperie).

Si bien puede ser preocupante encontrar condiciones de uso de las losas de madera con losas en concreto, es importante señalar que dichas condiciones mixtas cuentan con soluciones tecnológicas que permiten fácilmente solucionar dichas situaciones (Cárdenas *et al.*, 2010).

Teniendo en cuenta que la longitud de las troncales de Transmilenio son de aproximadamente de 112 km con un ancho de 10 metros y estimando un grosor de 20 cm, lo cual corresponde a un volumen de 224 000 m³, el reemplazo total por losas en madera demandaría una cantidad aproximada de 2240 hectáreas en plantaciones forestales (estimando 100 m³ por hectárea) lo cual ofrecería un mercado interesante para usos estructurales de la madera.

Finalmente, es fundamental señalar que la madera plantea un reto muy particular como materia prima del futuro, en la medida en que ofrece condiciones de amigabilidad con el ambiente difícilmente alcanzable desde otros materiales (Fournier, 2008).

CONCLUSIONES

Con esta investigación se demuestra que los prefabricados en madera pueden ser una alternativa válida dentro del mercado de la construcción de pavimentos en la parte estructural.

Utilizando el método de elementos finitos mediante modelos se analizó el comportamiento mecánico de los tipos de madera identificados, determinando una zona de afectación del adhesivo y una zona de interfase madera-adhesivo, las cuales sirvieron para la simplificación del modelo de la losa, mostrando un proceso confiable y efectivo.

Se obtuvo que el Pino caribe tiene menores esfuerzos horizontales tanto en el sentido paralelo como perpendicular a las fibras, siendo la madera escogida para la variación de espesores y estableciendo que a medida que el espesor de la losa aumenta los esfuerzos en ambos sentidos disminuyen.

Mediante un ensayo de laboratorio a una losa de madera circular instrumentada se verificó que bajo las mismas condiciones de carga y de apoyo se obtienen resultados semejantes con respecto a la simulación numérica con un buen nivel de aproximación.

AGRADECIMIENTOS

A la empresa forestal REFOCOSTA S.A. quien amablemente suministró la madera y elaboró las vigas laminadas para los ensayos.

Al laboratorio de estructuras de la Facultad de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society for Testing and Materials** (ASTM). (1995). Standard Specification for Adhesives Used for Finger Joints in Non Structural Lumber Products. Designation ASTM D 5572, ASTM D198-67, ASTM D-905. Recuperado de <http://www.astm.org/Standards/D1995.htm>.
- Amorim, P. G. R., Gonçalves, J. C., & Camargos, J. A. A.** (2013). Propriedades da madeira de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* estimadas por colorimetria. *Cerne, Lavras*, 19(3), 461-466.

- Araujo, O., Cerón, M., Chan, M. & Azueta, M.** (2005). Resistencia A La Flexión De Vigas Laminadas Con Tres Especies De Madera Tropical Mexicana. *Ingeniería Revista Académica*, 1, 5-12.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS)** (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 Título G — Estructuras de Madera y Estructuras de Guadua R-10. . Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. Bogotá: Colombia. 130 p.
- Berni, B., Bolza E. & Christensen, F.** (1979). South American Timbers The Characteristics, Properties And Uses Of 190 Species. Commonwealth scientific and industrial research organization division of building research. Australia: National Library of Australia. 229 p.
- Cárdenas, M, Schanack, F, & Ramos, O. R.** (2010). Design, Construction And Testing Of A Composite Glulam Timber-Concrete Structure To Be Used In Bridges. *Revista de la construcción*, 9(2), 63-75.
- Cassens, D. L. & Feist, W.** (1986). Finishing Wood Exteriors, Selection, Application and Maintenance. Agriculture. Hardbook. Nº. 647. USA: USDA Forest Service, 56 p.
- Castillo M. & Erdoiza J.** (1995). Acabados Para Madera En Exteriores. *Madera y Bosques*, 1(02), 9-22.
- Cifuentes, F. & J. Medina,** (2005). Determinación de las propiedades físicas, mecánicas y durabilidad natural de Teca (*Tectona grandis*) y Eucalipto (*Eucalyptus tereticornis*) procedencia Fundación (Magdalena). Trabajo Universidad distrital Francisco José de Caldas, Facultad de Medio ambiente y recursos Naturales, Laboratorio de Tecnología de maderas “José Anatolio Lastra Rivera”. 60 h. Bogotá, Colombia.
- Contreras, W. & Owen de C., M.** (1997). Elaboración De Un Elemento Estructural Laminado, Tipo Parallam, Con Tiras De Caña Brava *Gynerium Sagittatum* Y Adhesivo Fenol –Formaldehido. *Revista Forestal Venezolana*, 41(1), 29-36.
- Contreras, W., Valero, W., Thomson, E., Owen, de C, M. & Barrios E.** (2007). Determinación De Los Esfuerzos De Diseño De Vigas Laminadas De Pino Caribe (*Pinus Caribaea Var. hondurensis*) Encoladas Con Adhesivo De Isocianato (MDI). *Maderas, Ciencia y Tecnología* 9(3), 285-298.
- Demkoff, M.** (2003). Vigas Laminadas Estructurales De Madera, Su Fabricación y Empleo. Concordia: XVI- II Jornadas Forestales de Entre Ríos. Recuperado de <http://www.inta.gov.ar/concordia/info/Forestales/contenido/pdf/2003/190%20V%20DEMCKOFF%20def.pdf>.
- Escobar, O.** (1985). Algunos Usos Potenciales del Pinus pátula. Memorias II Congreso Nacional de Investigaciones Forestales. INIF. México. 109 p.
- Flanigan, M. & Winsler** (1871). Patente nº 115,457 Improvement In Combined Concrete And Wood.
- Fournier, Z,** (2008). Construcción Sostenible Y Madera: Realidades, Mitos Y Oportunidades Tecnología En Marcha, 21(4), 92-101.
- García, M.,** (2003). BS-PSA. Herramienta de Software Para Diseño de Pavimentos Rígidos por el Método de la PCA. Popayán: Colombia. Universidad del Cauca. License Free. BS-PCA. Software.informer.com
- García, J.** (2006). Elasticidad y resistencia de materiales. Cuestiones y problemas. San Vicente: Editorial Club Universitario.
- Gindeo, G. & García, L.** (1991). Fatiga higroscópica y dimensional de la madera. *Materiales de Construcción*, 41 (221), 115-119.
- Giuem, G. D.** (2005). Tableros Tensados de Madera. Concepción: Departamento de Ingeniería Civil Universidad de Concepción.
- American Association of State Highway and Transportation Officials** (1991). AASHTO SLWD-1 – Guide Specifications for the Design of Stress-Laminated Wood Bridges. Washington, DC. 18 p.
- Guerrero, M., Valderrábano, S., Campos, R. & Isasi, M.** (1999). Aplicación Del Método De Elemento Finito Al Análisis Nodal. *Ingenierías*. 49-55pp.
- Guzmán, C.** (2008). Diseño Del Sistema De Drenaje Sanitario Del Barrio La Laguna Y Diseño Del Pavimento Rígido Del Camino Que Conduce A La Aldea San Nicolás, Municipio De Estanzuela Del Departamento De Zacapa. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. 102 p.

- ICONTEC.** (1997). NTC-2500 Norma Técnica Colombiana-Ingeniería Civil y Arquitectura. Uso de la Madera en la Construcción. 11 p.
- IDU.** (2005). Especificaciones Técnicas Generales De Materiales Y Construcción Para Proyectos De Infraestructura Vial Y De Espacio Público En Bogotá D.C. Bogotá: Resolución 1959 del 18 de mayo de 2006 expedida por la Directora General del IDU.
- Kalinin, D.** (1994). Patente nº 5497595 «Method Of Reinforcing Wood Beams And Wood Beams Made Therefrom». Gosvenor Place, Mississauga: Ontario.
- Marra, A.** (1992). Technology of Wood Bonding Principles in practice. New York, USA: Van Nostrand Reinhold. 454 p.
- McCauley, P.** (1871). Patente nº 117,212 «Improvement In Wood Pavements». Milwaukee, Wisconsin, Estados Unidos.
- Moya-Roque, R., & Gonzalez-Trejos, G.** (2012). Las Vigas Laminadas Estructurales: Aspectos A Considerar Para Su Fabricación En Costa Rica. Revista Forestal Mesoamericana Kurú, 3, 70-76.
- Okuyama, T., Itoh, A. & Marsoem, S.N.** (1984). Mechanical Response of Wood to Repeated Loading I. Tensile and compressive fatigue fractures. Mokuzai Gakkaishi, Journal of the Japan Wood Research Society 30(10), 791-798.
- Olabe, V., F., Val Hernández, Y., Varela de la Cruz, P., & Cabrero B.J.M.** (2010). "Construir con madera". Navarra: Gobierno de Navarra. Departamento de Desarrollo Rural, Industria, Empleo y Medio Ambiente. 36 p.
- Pedras, X., Castilla, M.R. & Casanova, B.** (2009). Manual de Buenas Practicas en Embalaje. Proyecto EMET MADERA. Iberia: España. Recuperado de <http://www.cismadeira.es/Galego/downloads/l.manualembalajecast.pdf>.
- PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA).** (1984). Thickness Design For Concrete Highway And Street Pavements. 50 p.
- Pruzzo. & Ramos** (1992). Estudio comparativo de uniones encoladas versus madera sólida de Pinus radiata D.Don. Chile. Silvicultura, manejo y tecnología. Concepción: Universidad del Bío-Bío. 285-291pp.
- Refocosta.** (2005). Ensayo Propiedades Físico Mecánicas. Bogotá: Laboratorio Tecnología de Maderas Universidad Distrital.
- Reyes, F.** (2003). Diseño Racional de Pavimentos. Bogotá: Centro Editorial Javeriano y Editorial Escuela colombiana de Ingeniería. 586 p.
- Ronderos, C.** (2005). Las Siete Causas De Los Problemas De La Autopista Norte. Recuperado de <http://www.cemexcolombia.com/sp/PDF/Autopista7causasJUNIO2005.pdf>.
- Serrano, E. & Gustafsson, P.** (1999). Influence Of Bondline Brittleness And Defects On The Strength Of Timber Finger-Joints. International Journal of Adhesion and Adhesives, 19(1), 9-17.
- Touza M. & Infante F.** (2008). Nuevas Aplicaciones de la Madera de Eucalipto. Revista CIS- Madera, 1, 6-22.
- US Forest Products Laboratory (USFPL).** (1966). Wood Finishing: Weathering Of Wood. USDA, Forest Service, Forest Products Lab., FPL-0135. Madison: Wisconsin. 4 p.
- Zienkiewicz, O.** (1982). El Método De Los Elementos Finitos. Barcelona: Editorial Reverté. 905 p.



