



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Vigas de madera laminada Glulam reforzadas con pletinas metálicas dentadas

Hernán Darío Cañola

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Arquitectura, Escuela de Construcción
Medellín, Colombia

2015

Vigas de madera laminada Glulam reforzadas con pletinas metálicas dentadas

Hernán Darío Cañola

Tesis de Maestría

Director

Ph.D. César Echavarría

Línea de investigación:

Construcción

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Arquitectura, Escuela de Construcción
Medellín, Colombia
2015

Agradecimientos

Esta investigación se realizó gracias al apoyo del “Programa nacional de proyectos para el fortalecimiento de la investigación, la creación y la innovación en posgrados de la Universidad Nacional de Colombia” y del grupo de investigación “Rehabilitación de estructuras de madera, acero, hormigón y compuestas”.

Agradezco inmensamente a mi director de tesis, el profesor César Augusto Echavarría López, por sus consejos, asesorías y tiempo invertido para el desarrollo de mi proyecto de investigación.

Dedico de todo corazón este trabajo a mi familia, compañeros y amigos. En especial a mi madre, a mi abuela y a mi novia, por su apoyo constante: siempre han sido fuente de inspiración.

Por último, pero no menos importante, doy las gracias a todos mis profesores y colegas por sus sugerencias y ayuda para resolver dificultades e inquietudes.

Resumen

En esta tesis se estudian las propiedades mecánicas de vigas de madera maciza y de madera laminada Glulam reforzadas con pletinas metálicas dentadas.

Se fabricaron y analizaron experimentalmente cuatro grupos diferentes de vigas: 30 vigas de madera maciza no reforzadas, 30 vigas de madera maciza reforzadas con pletinas metálicas dentadas, 30 vigas de madera laminada Glulam no reforzadas y 30 vigas de madera laminada Glulam reforzadas con pletinas metálicas dentadas.

Las vigas de madera laminada Glulam se fabricaron con planchas de Carbonero (Licania Campestre) y un adhesivo epoxi de alta resistencia y durabilidad. En cada plancha usada se determinó el contenido de humedad y se efectuaron diversos ensayos para determinar sus propiedades mecánicas. Posteriormente, se reforzaron las vigas de madera maciza y de madera laminada Glulam con pletinas metálicas dentadas.

Se ejecutaron ensayos de flexión de cuatro puntos en las 120 vigas a escala natural. Para determinar las tensiones, se usó un modelo teórico linealmente elástico y se verificaron los resultados experimentales. A partir de los resultados obtenidos, se determinó que las vigas de madera laminada Glulam no reforzadas presentan un mejor comportamiento que las vigas de madera maciza. También se encontró que las vigas de madera laminada Glulam reforzadas con pletinas metálicas dentadas presentan las más altas propiedades mecánicas de los cuatro grupos de vigas estudiadas. Se estableció además que el uso de las pletinas metálicas dentadas aumenta la homogeneidad y la capacidad resistente de las vigas de madera maciza y de las vigas de madera laminada Glulam.

Palabras clave: Madera, Glulam, pletinas metálicas dentadas, flexión.

Tabla de contenido

Lista de figuras	1
Lista de tablas	3
Capítulo 1 Vigas de madera maciza y de madera laminada Glulam	4
Capítulo 2 Fabricación de las vigas de madera laminada Glulam	10
Capítulo 3 Fabricación de las vigas de madera laminada Glulam reforzadas	16
Capítulo 4 Estudio experimental y modelo teórico	20
4.1 Vigas de madera maciza no reforzadas	27
4.2 Vigas de madera maciza reforzadas con pletinas metálicas dentadas	29
4.3 Vigas de madera laminada Glulam no reforzadas	30
4.4 Vigas de madera laminada Glulam reforzadas con pletinas metálicas dentadas	32
Capítulo 5 Estudio comparativo y conclusiones	34
Bibliografía	42
Anexo 1: Bamboo reinforced Glulam beams: an alternative to CFRP reinforced Glulam beams	
Anexo 2: Bamboo reinforced Glulam beams: an alternative to punched metal plate, GFRP and CFRP reinforced Glulam beams	
Anexo 3: Formulación del proyecto de investigación	

Lista de figuras

Figura 1	:	Presencia de nudos en la madera	4
Figura 2	:	Alteración del direccionamiento de las fibras en la madera por la presencia de nudos	5
Figura 3	:	Efecto de los nudos en las secciones de madera maciza	5
Figura 4	:	Relación entre la resistencia de la madera a flexión y el tamaño de nudo	6
Figura 5	:	Viga de madera laminada Glulam	10
Figura 6	:	Cerchas con cuerdas de madera laminada Glulam (Universidad de Trento, Italia)	11
Figura 7	:	Análisis de humedad de las planchas de madera	11
Figura 8	:	Dimensiones de las vigas de madera laminada Glulam	12
Figura 9	:	Componentes del Sikadur 301™	14
Figura 10	:	Aplicación de Sikadur 301™	15
Figura 11	:	Fibra de carbono (CFRP)	16
Figura 12	:	Fibra de vidrio (GFRP)	16
Figura 13	:	Bambú (<i>Guadua angustifolia</i>)	17
Figura 14	:	Pletinas metálicas dentadas	17
Figura 15	:	Viga de madera laminada Glulam reforzada con pletinas metálicas dentadas	18
Figura 16	:	Instalación de pletinas metálicas dentadas en las caras laterales de las vigas de madera laminada Glulam	19
Figura 17	:	Viga de madera laminada Glulam reforzada con pletinas metálicas dentadas	20
Figura 18	:	Análisis de ultrasonido	21
Figura 19	:	Ensayo de flexión de cuatro puntos	22
Figura 20	:	Mecanismo para ensayo de flexión de cuatro puntos	23
Figura 21	:	Diagrama de carga, cortante y momento para ensayo de flexión de cuatro puntos	24

Figura 22	:	Tensiones de flexión en la viga	25
Figura 23	:	Tensiones de cortante en la viga	26
Figura 24	:	Curva carga - desplazamiento vigas de madera maciza no reforzadas, ensayos 1 a 10	27
Figura 25	:	Curva carga - desplazamiento vigas de madera maciza no reforzadas, ensayos 11 a 20	28
Figura 26	:	Curva carga - desplazamiento vigas de madera maciza no reforzadas, ensayos 21 a 30	28
Figura 27	:	Curva carga - desplazamiento vigas de madera maciza reforzadas con pletinas metálicas dentadas, ensayos 1 a 10	29
Figura 28	:	Curva carga - desplazamiento vigas de madera maciza reforzadas con pletinas dentadas, ensayos 11 a 20	29
Figura 29	:	Curva carga-desplazamiento vigas de madera maciza reforzadas con pletinas dentadas, ensayos 21 a 30	30
Figura 30	:	Curva carga - desplazamiento vigas de madera laminada Glulam no reforzadas, ensayos 1 a 10	30
Figura 31	:	Curva carga - desplazamiento vigas de madera laminada Glulam no reforzadas, ensayos 11 a 20	31
Figura 32	:	Figura 32: Curva carga - desplazamiento vigas de madera laminada Glulam no reforzadas, ensayos 21 a 30	31
Figura 33	:	Curva carga - desplazamiento vigas de madera laminada Glulam reforzadas con pletinas metálicas dentadas, ensayos 1 a 10	32
Figura 34	:	Curva carga - desplazamiento vigas de madera laminada Glulam reforzadas con pletinas metálicas dentadas, ensayos 11 a 20	32
Figura 35	:	Curva carga - desplazamiento vigas de madera laminada Glulam reforzadas con pletinas metálicas dentadas, ensayos 21 a 30	33
Figura 36	:	Ruptura de viga de madera maciza en zona con alteraciones físicas	35
Figura 37	:	Ruptura de viga de madera maciza en zona con presencia de nudos	35

Lista de tablas

Tabla 1	:	Propiedades mecánicas del pegante epoxi Sikadur 301™	13
Tabla 2	:	Propiedades mecánicas de las planchas de Licania Campestre	14
Tabla 3	:	Propiedades mecánicas de las pletinas metálicas dentadas	19
Tabla 4	:	Módulos de elasticidad de las vigas macizas y de las vigas de madera laminada Glulam	21
Tabla 5	:	Adherencia en vigas de madera laminada Glulam	21
Tabla 6	:	Resumen de propiedades de vigas de madera maciza no reforzadas y vigas de madera maciza reforzadas con pletinas metálicas dentadas	36
Tabla 7	:	Resumen de propiedades de vigas de madera laminada Glulam no reforzadas y vigas de madera laminada Glulam reforzadas con pletinas metálicas dentadas	37
Tabla 8	:	Clasificación de propiedades mecánicas de vigas de madera maciza según Eurocódigo 5	39
Tabla 9	:	Clasificación de propiedades mecánicas de vigas de madera laminada Glulam según Eurocódigo 5	39

Capítulo 1

Vigas de madera maciza y de madera laminada Glulam

La madera es un material compuesto fibroso de origen natural formado por la combinación de fibras largas de celulosa unidas entre sí por la lignina. Las fibras de celulosa garantizan la resistencia de la madera y la lignina estabiliza las fibras en la estructura del material (Daud y Shanks [9], Zhu et al. [24], Ghaffar y Fan [16]). Es además un material homogéneo a nivel macroscópico y heterogéneo a nivel microscópico.

Actualmente, este recurso natural es considerado como uno de los materiales renovables de mayor uso en el sector de la construcción porque su utilización intensiva en estructuras trae beneficios en la reducción del CO₂. Durante las diferentes etapas de uso en la edificación (extracción, producción, comercialización, utilización, mantenimiento y reciclado), la madera muestra evidentes economías en el gasto energético y una huella de carbono baja. La producción, el transporte y la elaboración de un elemento constructivo de madera de una tonelada consume 200 KWh de energía, mientras que el hormigón requiere por tonelada 360 KWh, el acero 13200 KWh y el aluminio requiere un consumo energético de 27000 KWh por tonelada de material producido (Fournier [14]). Sin embargo, la madera es a menudo inapropiada para aplicaciones de cargas pesadas por su baja durabilidad y alta variabilidad como consecuencia de la presencia de nudos y otros defectos que reducen su resistencia (ver figura 1).



Figura 1: *Presencia de nudos en la madera*

Estas alteraciones físicas se generan durante los procesos de crecimiento de las ramas del árbol y en las estructuras de madera originan puntos frágiles que modifican el direccionamiento de las fibras (ver figura 2).



Figura 2: Alteración del direccionamiento de las fibras en la madera por la presencia de nudos

Entre mayor es el tamaño del nudo, mayor será la pérdida de capacidad resistente de las vigas de madera maciza (ver figura 3).

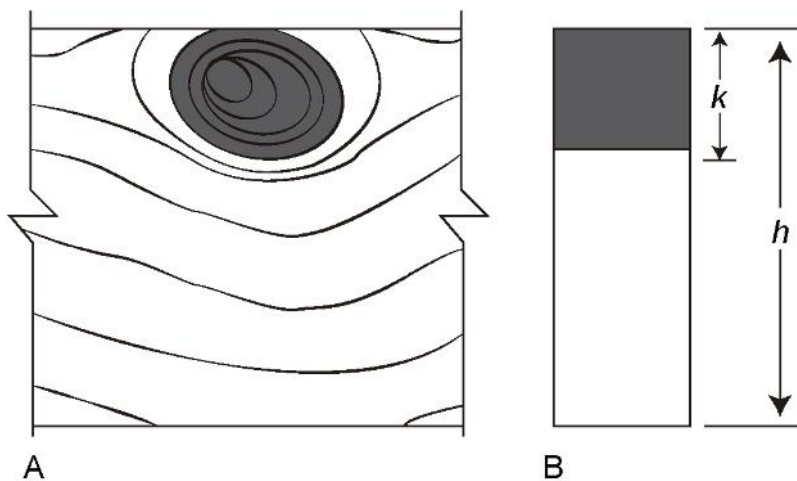


Figura 3: Efecto de los nudos en las secciones de madera maciza

La figura 4 muestra la relación entre el tamaño del nudo y la altura de la viga respecto a la disminución de resistencia a flexión de la viga. Es evidente que cuando no hay nudos, la resistencia a flexión del elemento de madera es ideal (Wood Handbook [23]).

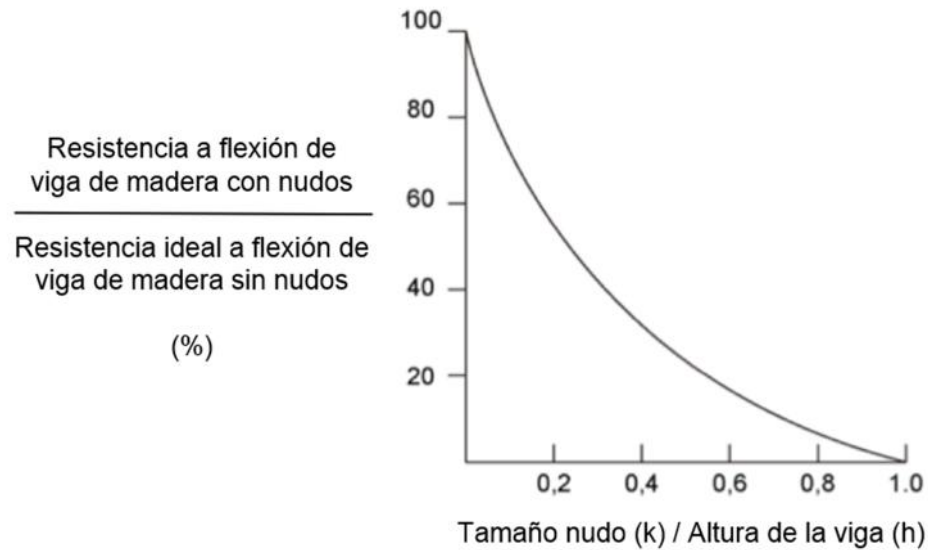


Figura 4: *Relación entre la resistencia de la madera a flexión y el tamaño de nudo*

Para reducir el efecto de las alteraciones físicas y para mejorar las propiedades de las vigas de madera maciza, se han desarrollado diferentes técnicas que apuntan al incremento de resistencia de estos elementos. Para aumentar la capacidad resistente de las vigas a flexión tenemos entonces la madera laminada Glulam y los refuerzos naturales y sintéticos.

La madera laminada Glulam es una técnica que permite minimizar los efectos de los nudos, del ángulo de micro fibrillas y de la heterogeneidad natural existente en las vigas de madera maciza. De este modo, la madera laminada Glulam ha logrado satisfacer muchas de las necesidades que surgen en el campo de la construcción: eficiencia, economía y alta resistencia. La madera laminada es un material renovable, poco necesitado de energía de transformación, productor de pocos agentes contaminantes y completamente reciclable. A nivel estético, la calidez de la madera se hace presente en las estructuras de madera laminada Glulam.

Es por ello que la madera laminada Glulam se ha convertido en uno de los principales elementos de uso estructural y arquitectónico en edificaciones de mediana altura. Cabe destacar que a nivel internacional existe una gran cantidad de empresas dedicadas al diseño, instalación y estudio de este material, normas que rigen su uso y diversas investigaciones tendientes a mejorar su calidad. Infortunadamente, el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) [18] no

considera, por desconocimiento y falta de investigaciones locales, este tipo de elementos estructurales.

Las vigas de madera laminada Glulam son por lo tanto uno de los elementos más utilizados en las estructuras de madera de varios pisos. Por esta razón, resulta de vital importancia comprender su comportamiento frente a las cargas actuantes para posteriormente generar nuevos métodos de diseño y de construcción seguros y económicos.

A continuación, se presenta un breve resumen del estado actual del conocimiento en el área de las estructuras de madera maciza y de las estructuras de madera laminada Glulam reforzadas.

Humphrey et al. [17] reforzaron los durmientes de un puente vehicular deteriorado mediante el uso de láminas de fibra de carbono CFRP adheridas con un pegante epoxi logrando con esto una mayor capacidad de carga de los elementos. Sin embargo, el modo de falla predominante fue frágil debido a la deslaminación del refuerzo de fibra de carbono CFRP.

Schober [17] presentó un estudio de las técnicas de restauración y reforzamiento de pisos de madera sometidos a cargas de flexión, mediante el uso de fibras de carbono.

Reza [21] utilizó fibra de vidrio GFRP para rehabilitar las pilas de un puente ferroviario realizando pruebas estáticas y dinámicas con pruebas a flexión en una configuración de cuatro puntos. A partir de los ensayos efectuados logró mejores propiedades mecánicas de los elementos analizados.

Triantafillou [22] analizó el reforzamiento de vigas en concreto y madera a través del uso de refuerzos de fibras poliméricas FRP.

Fiorelli y Días [13] realizaron un análisis experimental de vigas de madera reforzadas con fibras de vidrio GFRP y carbono CFRP. El modelo teórico empleado para calcular la resistencia a flexión de las vigas tuvo en cuenta la resistencia a tracción y la falla por compresión de los elementos reforzados. Además, consideró un modelo de tracción elástico y de compresión elasto - plástico. La validez del modelo se comprobó mediante la comparación con resultados experimentales.

Raftery y Whelan [20] efectuaron análisis comparativos experimentales para determinar el comportamiento mecánico de las vigas de madera laminada Glulam no reforzadas y reforzadas con fibras recicladas. Los resultados obtenidos indicaron que

la adición de porcentajes razonables de refuerzo, ubicados estratégicamente en la zona de tracción, dio lugar a aumentos en la rigidez y en la capacidad portante del elemento.

Echavarría et al. [10] hicieron un análisis de las conexiones de madera pernadas con el uso de pletinas metálicas dentadas. En esta investigación, el refuerzo funcionó como mecanismo para atender el exceso de tracción perpendicular y mejorar el comportamiento de la conexión. En este estudio se concluyó que una de las ventajas de esta técnica de refuerzo es que no se requiere el uso de pegantes y el elemento estará listo para usarse inmediatamente después de que hayan sido instaladas las pletinas sobre la superficie de madera. El refuerzo con las pletinas dentadas aumenta la resistencia de la conexión. Las pletinas dentadas de acero representan una solución efectiva porque son elementos de bajo costo y de fácil instalación.

Fueyo et al. [15] realizaron un análisis del comportamiento mecánico de las tensiones de adherencia en las piezas de madera y de las tensiones normales y tangenciales en las placas metálicas que constituían los nudos de una cercha.

Se ha demostrado también que cuantías de refuerzo de fibra de vidrio GFRP del orden del 3% pueden incrementar la resistencia a flexión de vigas de madera laminada Glulam en más del 100% y su rigidez entre un 10% y un 15% (Bragdon [7]).

Borri et al. [6] desarrollaron un estudio experimental de reforzamiento de vigas de madera en su zona traccionada mediante el uso de fibras de bambú y fique. El uso de estas fibras logró incrementos en las propiedades mecánicas, pero estos dependen directamente del espesor del refuerzo.

Asimismo, Echavarría et al. [11] estudiaron experimentalmente el comportamiento mecánico de vigas de madera laminada Glulam reforzadas con fibra de vidrio GFRP y bambú. El refuerzo se propone con el fin de aumentar la resistencia a flexión y la ductilidad de las vigas de madera laminada Glulam. La viga se refuerza en la zona traccionada y en las caras laterales con los refuerzos de fibra de vidrio GFRP o de bambú. Estos refuerzos generan un aumento considerable de resistencia.

Mascia y Mayer [19] hicieron análisis experimentales en vigas de madera laminada Glulam reforzadas con fibras naturales dispuestas en su zona traccionada. El estudio demostró que mediante el uso de estas fibras se pueden generar mejoras en el comportamiento mecánico de las vigas y que el uso de este tipo de refuerzos naturales contribuye al cuidado del medio ambiente.

Es claro que el reforzamiento de las vigas de madera laminada Glulam con fibras sintéticas (fibra de vidrio GFRP, fibra de carbono CFRP) y con fibras naturales (bambú, fique) puede presentar ciertas ventajas: económicas, mecánicas y ecológicas.

Teniendo también en cuenta investigaciones previas (Echavarría et al. [10]), es probable que el reforzamiento con pletinas metálicas dentadas mejore el comportamiento mecánico de las vigas de madera y de madera laminada Glulam.

La finalidad de este proyecto es entonces profundizar en el estudio de las vigas de madera laminada Glulam reforzadas con pletinas metálicas dentadas.

El uso de las pletinas metálicas dentadas podría convertirse en una nueva técnica de reforzamiento en el campo de los elementos estructurales de madera a flexión.

Capítulo 2

Fabricación de las vigas de madera laminada Glulam

Las vigas de madera laminada Glulam (ver figura 5) además de reducir la influencia de las alteraciones físicas en la madera permiten gran flexibilidad en lo relacionado con la forma y el tamaño de la estructura.



Figura 5: *Viga de madera laminada Glulam*

En este proyecto, se fabricaron, en el Laboratorio de Construcción de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, 60 vigas de madera laminada Glulam.

Para la fabricación de las vigas de madera laminada Glulam se realizó previamente:

- Una selección de planchas de madera con el fin de escoger las de mejor calidad y descartar las que presentaban una gran cantidad de alteraciones físicas.
- Un control dimensional de las planchas de madera.
- Un control de humedad de las planchas.

En Medellín, la madera debe alcanzar un contenido de humedad de equilibrio de 12%. El control del contenido de humedad de las planchas de madera permite minimizar las variaciones dimensionales que podrían presentarse en las vigas de madera laminada Glulam fabricadas (ver figura 6).



Figura 6: *Cerchas con cuerdas de madera laminada Glulam (Universidad de Trento, Italia)*

En esta investigación, todas las mediciones de humedad se realizaron con el Humidímetro (ver figura 7). Se efectuaron entonces 900 mediciones de humedad, 3 mediciones por plancha.



Figura 7: *Análisis de humedad de las planchas de madera*

Para la fabricación de las vigas de madera laminada Glulam se usaron planchas de Carbonero (Licania Campestre) y una resina epoxi termo-plástica.

Usamos el Sikadur 301™ de alta resistencia mecánica, alto módulo de elasticidad y alta resistencia a la humedad. Las dimensiones de las vigas fabricadas fueron 2400 mm de longitud, 150 mm de altura y 50 mm de anchura (ver figura 8).

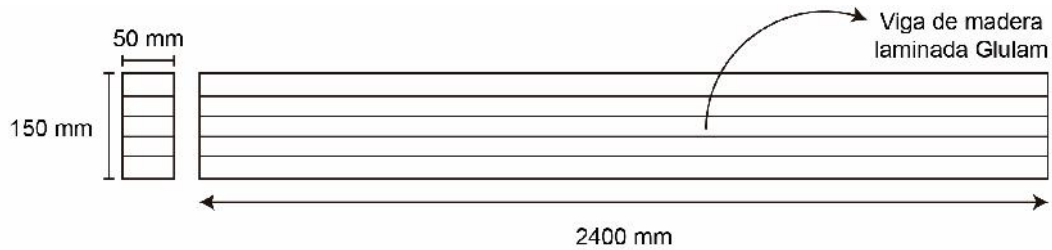


Figura 8: Dimensiones de las vigas de madera laminada Glulam

En cada viga se pegaron 5 planchas de 30 mm de espesor, 2400 mm de longitud y 50 mm de anchura. No se efectuaron entonces uniones dentadas en el sentido longitudinal. De esta forma, se elimina un factor de incertidumbre (ruptura en la unión dentada) durante la etapa experimental. El método de muestreo utilizado para determinar la población de análisis se basa en parámetros de la norma ASTM (ASTM D2915-10 [4]):

$$n = \left(\frac{t}{\bar{X}} CV \right)^2 \quad (1)$$

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} \quad (2)$$

Tenemos:

- n : Tamaño de la muestra, número de ensayos
- S : Desviación estándar
- \bar{X} : Valor promedio de la muestra
- CV : Coeficiente de variación
- : Precisión estimada
- t : Valor crítico estadístico para un nivel de confianza dado

El tamaño de muestra será grande cuando:

- El fenómeno en estudio sea muy variable (coeficiente de variación alto).
- El nivel de confianza fijado sea alto.
- El error aceptable sea bajo.

En cambio, el tamaño de la muestra será pequeño si encontramos un fenómeno poco variable, fijamos una confianza baja y se acepta un error alto.

En nuestra investigación, asumimos un coeficiente de variación de 20%, una precisión estimada de 5% y un valor crítico estadístico de 1,173 para un intervalo de confianza de 75%.

Por lo tanto:

$$n = \left(\frac{1,173 \times 0,20}{0,05} \right)^2$$

$$n = 22$$

Se requiere entonces por la norma ASTM (ASTM D2915-10 [4]) realizar al menos 22 ensayos por grupo.

Decidimos efectuar 30 ensayos por cada uno de los grupos de vigas estudiados.

Las propiedades mecánicas de las planchas fueron también verificadas en el laboratorio con la realización de 30 ensayos bajo parámetros de las normas ASTM (ASTM D143-94 [1] y ASTM D2395-02 [2]).

Las propiedades mecánicas de la Licania Campestre y del pegante epoxi se encuentran en las tablas 1 y 2.

Las propiedades del pegante epoxi son tomadas de las especificaciones técnicas entregadas por Sika™.

Tabla 1: *Propiedades mecánicas del pegante epoxi Sikadur 301™*

Resistencia a tracción (MPa)	52
Módulo de elasticidad promedio (MPa)	2000
Deformación de ruptura (%)	3,5

Tabla 2: *Propiedades mecánicas de las planchas de Licania Campestre*

Número de ensayos	30
Resistencia a tracción paralela a las fibras promedio (MPa)	107
Resistencia a cortante promedio (MPa)	9
Módulo de elasticidad paralelo a las fibras promedio (MPa)	14300
Módulo de elasticidad perpendicular a las fibras promedio (MPa)	930
Densidad promedio con un contenido de humedad del 12% (Kg/m ³)	500

El pegante usado se produce mezclando un catalizador incoloro y un pegante de color gris (ver figura 9).



Figura 9: *Componentes del Sikadur 301™*

Este pegante tiene como función principal servir de puente de adherencia entre las planchas de madera que constituyen las vigas de madera laminada Glulam (ver figura 10).

Durante el proceso de fabricación de las vigas de madera laminada Glulam, las planchas constitutivas de las secciones pueden ser organizadas según su resistencia y rigidez para obtener componentes más eficientes. Se debe garantizar que las planchas de menor calidad estructural se encuentren ubicadas en el centro (de la altura) de la viga donde las tensiones por flexión son menores.



Figura 10: *Aplicación de Sikadur 301™*

Capítulo 3

Fabricación de las vigas de madera laminada Glulam reforzadas

El uso de refuerzos en las vigas de madera laminada Glulam tiene como propósito incrementar la resistencia a flexión y el módulo de elasticidad de la viga. Se busca adicionalmente disminuir el tamaño de las vigas y así reducir el peso propio de la estructura.

Los elementos utilizados hasta el día de hoy para reforzar las vigas de madera laminada Glulam son elementos compuestos formados por la unión de una matriz adhesiva más fibras sintéticas (fibra de carbono CFRP y fibra de vidrio GFRP) y fibras naturales (Bambú) (ver figuras 11, 12 y 13).



Figura 11: *Fibra de carbono (CFRP)*



Figura 12: *Fibra de vidrio (GFRP)*



Figura 13: *Bambú (Guadua angustifolia)*

En este proyecto de investigación, se propone una nueva técnica de reforzamiento: vigas de madera laminada Glulam reforzadas con pletinas metálicas dentadas (ver figura 14).

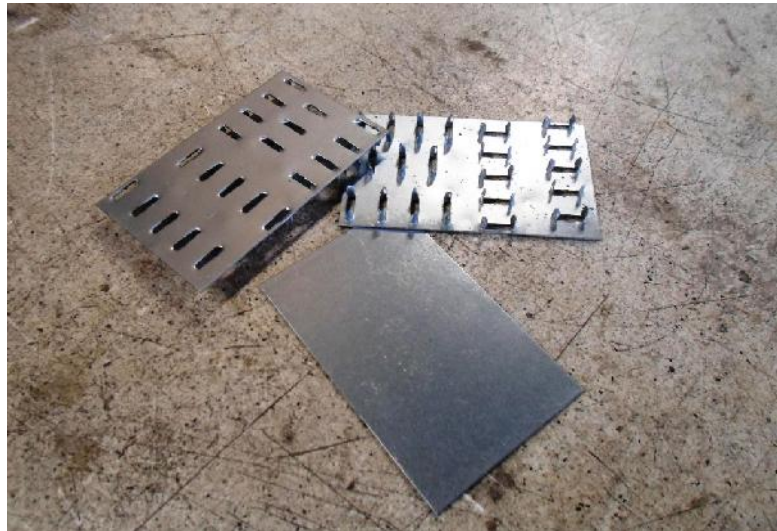


Figura 14: *Pletinas metálicas dentadas*

Las vigas de madera laminada Glulam analizadas en esta investigación son reforzadas en las caras laterales de su tercio medio (de la longitud) mediante el uso de pletinas metálicas dentadas (ver figura 15).

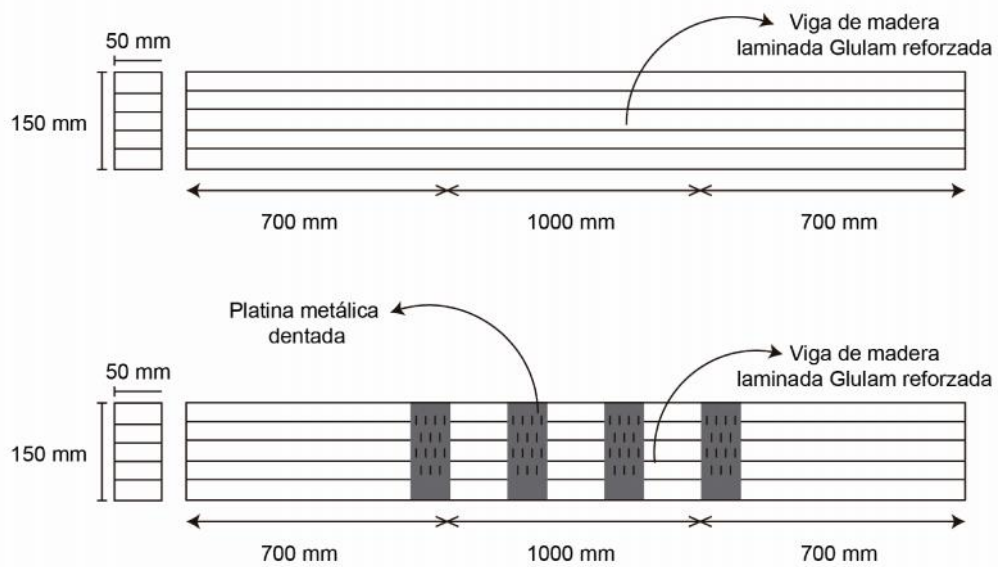


Figura 15: *Viga de madera laminada Glulam reforzada con pletinas metálicas dentadas*

La pletina metálica dentada es un conector superficial de alta rigidez que permite transferir esfuerzos por medio del anclaje entre los dientes de la pletina y la sección de madera.

El mecanismo resistente entre las pletinas metálicas dentadas y la madera se produce en dos etapas. Inicialmente, hay una transferencia de esfuerzos entre la madera y la pletina a través de los dientes (capacidad de anclaje) y posteriormente una transmisión de esfuerzos por tracción en la misma pletina metálica.

El diseño de las conexiones con pletinas metálicas dentadas se hace según la sección 8.8 del Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1:2004 [12]).

En esta tesis se usan unas pletinas que han sido evaluadas previamente por el fabricante para garantizar una buena adherencia a la madera sin producir efectos de desgarramiento en la superficie de las secciones conectadas.

Las pletinas metálicas dentadas usadas en este proyecto nos garantizan un aumento de la resistencia a tracción perpendicular a las fibras de la madera de 3 MPa a 11 MPa. Esta evaluación se hace al considerar la sección homogénea madera-pletina y la ley de las mezclas de los materiales compuestos.

Las pletinas metálicas dentadas usadas son placas perforadas de acero galvanizado con dimensiones: 50 mm de anchura, 150 mm de altura y un espesor de 1 mm.

Las propiedades mecánicas de las pletinas metálicas dentadas se encuentran en la tabla 3.

Tabla 3: *Propiedades mecánicas de las pletinas metálicas dentadas*

Espesor de la pletina (mm)	1
Resistencia a tracción (MPa)	190
Módulo de elasticidad (MPa)	210000

Para la instalación de las pletinas metálicas dentadas en las vigas de madera laminada Glulam, se ubican los refuerzos metálicos en el tercio medio de la viga mediante el uso de cintas adhesivas. Posteriormente, se ejerce presión sobre las pletinas hasta que quedan completamente adheridas en las vigas de madera laminada Glulam (ver figura 16).



Figura 16: *Instalación de pletinas metálicas dentadas en las caras laterales de las vigas de madera laminada Glulam*

Las pletinas metálicas dentadas buscan mejorar localmente el comportamiento mecánico de la viga de madera laminada Glulam al disminuir la influencia de los defectos presentes en las planchas de madera (ver figura 17).



Figura 17: *Viga de madera laminada Glulam reforzada con pletinas metálicas dentadas*

Capítulo 4

Estudio experimental y modelo teórico

Una vez fabricadas todas las vigas, se ensayaron en laboratorio un total de 120 vigas: 30 vigas de madera maciza no reforzadas, 30 vigas de madera maciza reforzadas con pletinas metálicas dentadas, 30 vigas de madera laminada Glulam no reforzadas y 30 vigas de madera laminada Glulam reforzadas con pletinas metálicas dentadas.

Además de los ensayos de propiedades mecánicas realizados en las planchas de *Licania campestre* (ver tabla 2), se determinaron los módulos de elasticidad longitudinal y transversal para cada viga analizada con el uso de ensayos no destructivos de ultrasonido (ver figura 18).



Figura 18: *Análisis de ultrasonido*

Los módulos de elasticidad estimados se muestran en la tabla 4. Al comparar los módulos de elasticidad de las vigas de la tabla 4 con los módulos de elasticidad de las planchas de la tabla 2, se hallan valores más bajos para las vigas. Esto es consecuencia del efecto volumen. Las propiedades mecánicas determinadas experimentalmente en pequeñas probetas son siempre más altas que las estimadas en los elementos a escala natural.

Tabla 4: Módulos de elasticidad de las vigas macizas y de las vigas de madera laminada Glulam

Módulo de elasticidad paralelo a las fibras promedio (MPa)	13100
Módulo de elasticidad perpendicular a las fibras promedio (MPa)	850
Número de ensayos (MPa)	120

Se realizaron además análisis de adherencia de la resina epoxi Sikadur 301™ bajo parámetros de la norma ASTM (ASTM D905 [5]). Los resultados de dicho ensayo se encuentran en la tabla 5.

Tabla 5: Adherencia en vigas de madera laminada Glulam

Número de ensayos	6
Resistencia a cortante promedio (MPa)	8

La resistencia a cortante de las planchas (9 MPa, ver tabla 2) es idéntica a la resistencia a cortante entre las planchas (8 MPa, ver tabla 5). Se podrían producir, sin embargo, rupturas por cortante y adherencia entre las planchas.

Posteriormente, las 30 vigas de madera maciza, las 30 vigas de madera maciza reforzadas con pletinas metálicas dentadas, las 30 vigas de madera laminada Glulam sin reforzar y las 30 vigas de madera laminada Glulam reforzadas con pletinas metálicas dentadas fueron falladas en el Laboratorio de Productos Forestales de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, a través del ensayo a flexión de cuatro puntos según la norma ASTM (ASTM D198-08 [3]). Se evalúa el comportamiento carga - desplazamiento y la resistencia a flexión de las vigas.

Para el ensayo, se usa un marco rígido que permite apoyar la viga adecuadamente y que soporta un equipo mecánico capaz de aplicar fuerzas transversales sobre la viga para producir momentos de flexión (ver figura 19).



Figura 19: *Ensayo de flexión de cuatro puntos*

Durante el ensayo, las vigas son apoyadas sobre planchas metálicas para evitar concentraciones de esfuerzos debidas a las reacciones. Estas planchas son de 12 mm de espesor, con área de apoyo igual a 100 mm x 100 mm.

Las planchas de apoyo son soportadas por un mecanismo que permite la rotación del elemento de madera, así como pequeños desplazamientos hacia afuera, sin introducir restricciones significativas. La distancia entre ejes de apoyo es de 2100 mm.

Durante el ensayo a flexión de cuatro puntos (ver figura 20), se aplicó una carga con una tasa de control de desplazamiento con el fin de lograr la ruptura de las vigas entre 5 y 15 minutos. Los ensayos se detuvieron cuando una de las siguientes condiciones se alcanzó: la carga llegó al máximo y se redujo sin recuperación o cuando el desplazamiento excedió 50 mm.

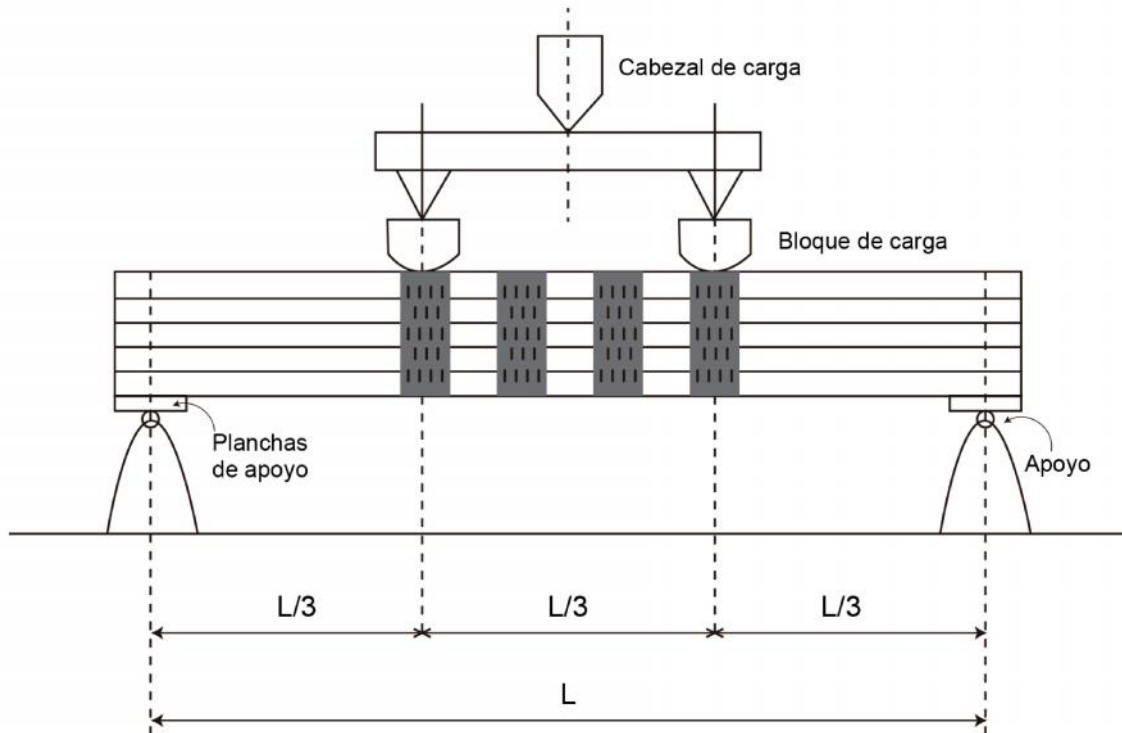


Figura 20: Mecanismo para ensayo de flexión de cuatro puntos

Los resultados experimentales fueron analizados y comparados con un modelo teórico. Se usa el modelo de Euler - Bernoulli donde se establece que en la deformación de una pieza recta sometida a flexión pura, las secciones rectas permanecen planas y normales a la deformación de la directriz con relación a la deflexión de la carga aplicada. Según esta hipótesis de deformación de Bernoulli, las fibras longitudinales que forman la viga se curvan transformándose en arcos de circunferencia concéntricos. En este proceso de deformación, las fibras pueden aumentar o disminuir su longitud. En el primer caso están sometidas a una tensión longitudinal de tracción y a una tensión longitudinal de compresión en el segundo caso (Cervera y Blanco [8]).

Por continuidad de la deformación, existirá una línea que dividirá la sección en una parte traccionada y otra comprimida y en la que la tensión longitudinal será nula. Al ser la deformación plana, esta línea neutra será una recta y por simetría del problema respecto del plano medio, será una recta perpendicular a dicho plano de simetría. A esta recta, contenida en el plano de la sección y perpendicular al plano de simetría, se le llama eje neutro (Cervera y Blanco [8]).

En el ensayo de flexión de cuatro puntos se genera entonces un estado de esfuerzos heterogéneo donde la viga en la parte inferior experimenta tensiones de tracción y en la parte superior tensiones de compresión.

En la figura 21 se muestra el diagrama de cortante y momento para el ensayo de flexión de cuatro puntos en las vigas de madera maciza y vigas de madera laminada Glulam no reforzadas y reforzadas con pletinas metálicas dentadas.

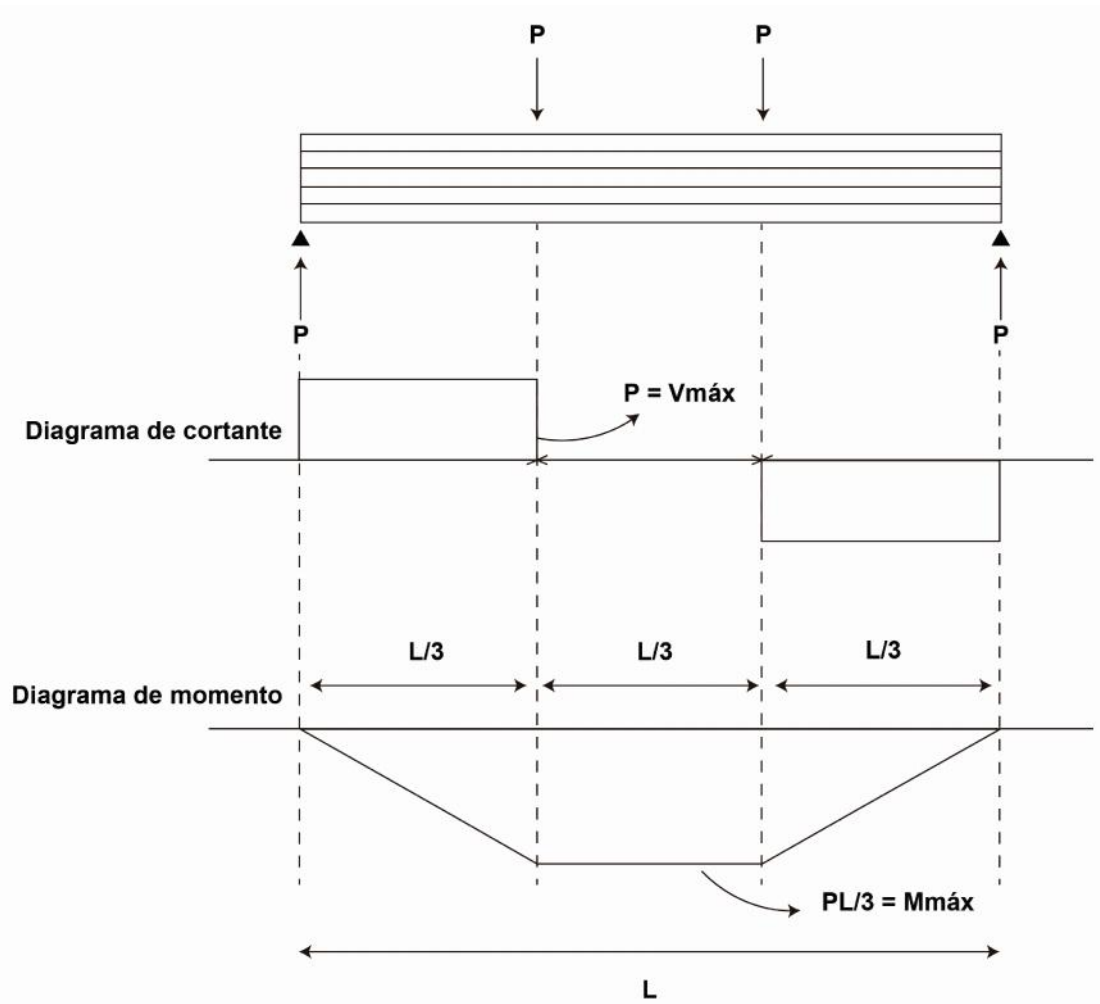


Figura 21: Diagrama de carga, cortante y momento para ensayo de flexión de cuatro puntos

Las tensiones se calculan relacionando el momento flector y el segundo momento de inercia de la viga. En las zonas cercanas a los apoyos se producen esfuerzos cortantes. Estructuralmente, el comportamiento de una viga se estudia con un modelo de prisma mecánico (ver figura 22).

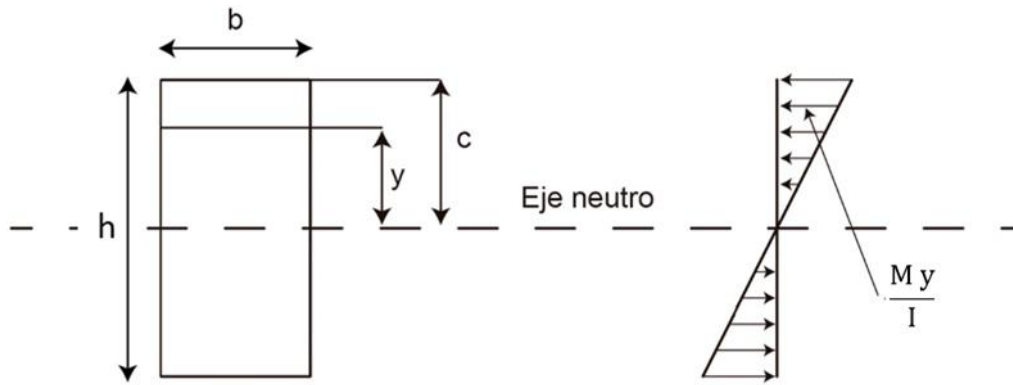


Figura 22: Tensiones de flexión en la viga

Para determinar las propiedades mecánicas de las vigas, se utilizaron las siguientes ecuaciones del modelo teórico:

$$= \frac{M y}{I} \quad (3)$$

$$\text{máx} = \frac{M_{\text{máx}} c}{I} \quad (4)$$

$$c = \frac{h}{2} \quad (5)$$

$$= \frac{(b h^3)}{12} \quad (6)$$

$$M_{\text{máx}} = \frac{(P L)}{3} \quad (7)$$

$$\text{máx} = \frac{P L^3}{24 E I} \left(\frac{23}{27} \right) \quad (8)$$

$$E = \frac{P L^3}{24 I} \left(\frac{23}{27} \right) \frac{1}{\text{máx}} \quad (9)$$

Tenemos:

- I : Inercia de una viga con sección rectangular en mm⁴
- c : Mitad de la altura en mm
- M : Momento en N-mm
- M_{máx} : Momento máximo en N-mm
- σ_{máx} : Resistencia a flexión de la viga en MPa
- E : Módulo de elasticidad en MPa
- P : Carga máxima en N
- L : Longitud de la viga en mm
- h : Altura de la viga en mm
- b : Anchura de la viga en mm
- δ_{máx} : Desplazamiento máximo de la viga en el centro de la luz en mm

En cortante (ver figura 23) tenemos:

$$\tau_{\text{máx}} = \left(\frac{3}{2} \right) \frac{V_{\text{máx}}}{b \cdot h} = \left(\frac{3}{2} \right) \frac{P}{b \cdot h} \quad (10)$$

Tenemos:

- τ_{máx} : Máxima tensión cortante en MPa
- V_{máx} : Cortante máxima en N

La máxima tensión cortante ocurre en el plano neutro (ver figura 23).

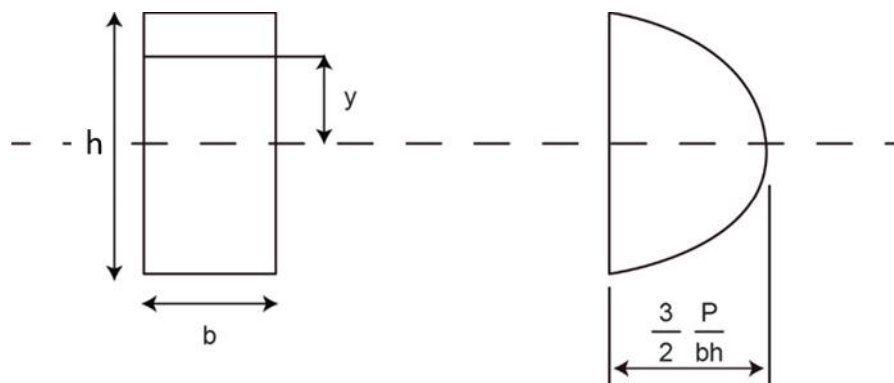


Figura 23: Tensiones de cortante en la viga

Es necesario mencionar que se desprecia el desplazamiento producido por el esfuerzo cortante. Con la geometría propuesta y con las propiedades mecánicas verificadas en las planchas de madera con ensayos y en las vigas con el ultrasonido, se determinó que el desplazamiento por cortante es menor que el 2% del desplazamiento total en el centro de la luz.

Con los datos experimentales y las ecuaciones del modelo teórico precedente se determinan el módulo de elasticidad y la resistencia a flexión de las vigas estudiadas (ver capítulo 5 de esta Tesis).

4.1 Vigas de madera maciza no reforzadas

Las vigas de madera maciza no reforzadas tienen: 50 mm de anchura y 150 mm de altura. Se ensayaron 30 vigas y se registraron las curvas de carga versus desplazamiento máximo en el centro de la luz (ver figuras 24, 25 y 26).

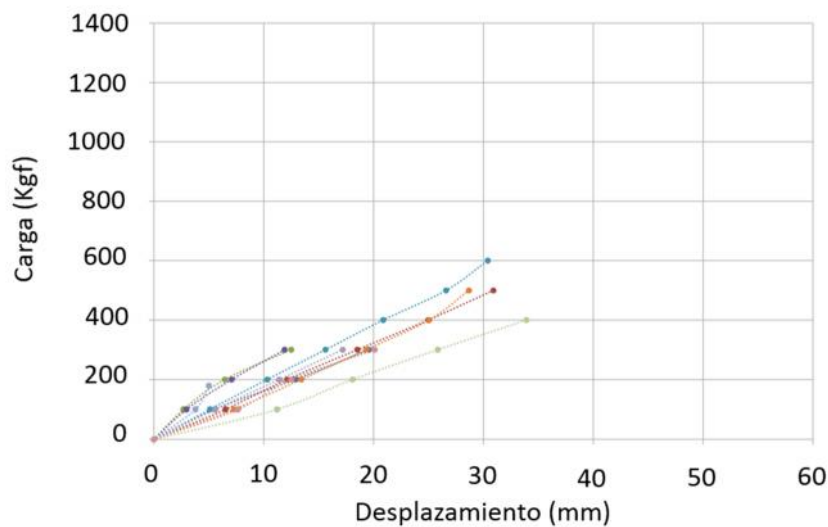


Figura 24: Curva carga - desplazamiento vigas de madera maciza no reforzadas, ensayos 1 a 10

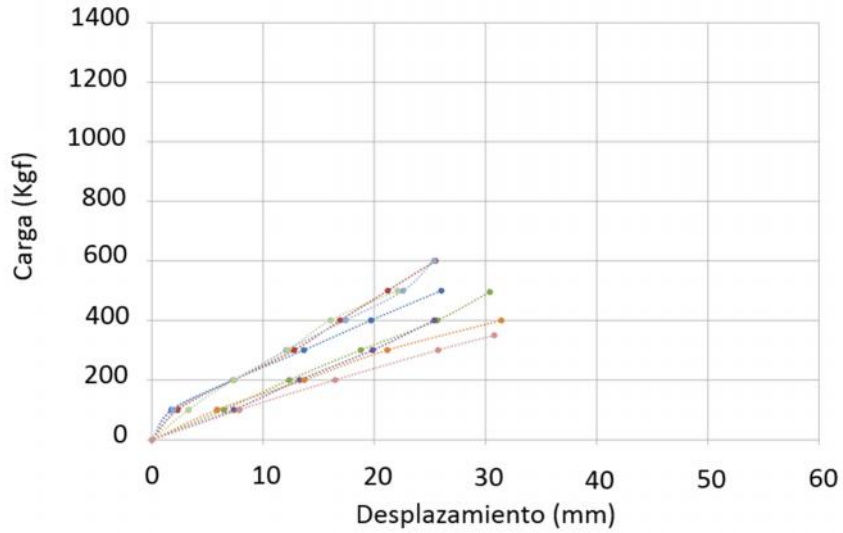


Figura 25: Curva carga - desplazamiento vigas de madera maciza no reforzadas, ensayos 11 a 20

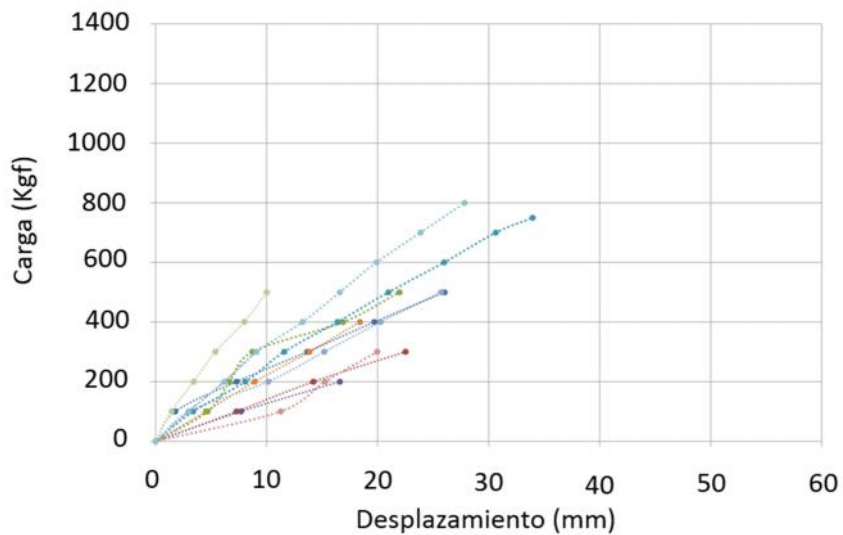


Figura 26: Curva carga - desplazamiento vigas de madera maciza no reforzadas, ensayos 21 a 30

El comportamiento de las vigas de madera maciza no reforzadas fue perfectamente elástico.

4.2 Vigas de madera maciza reforzadas con pletinas metálicas dentadas

Las vigas de madera maciza reforzadas con pletinas metálicas dentadas tienen: 50 mm de anchura y 150 mm de altura. Se ensayaron 30 vigas y se registraron las curvas de carga versus desplazamiento máximo en el centro de la luz (ver figuras 27, 28 y 29).

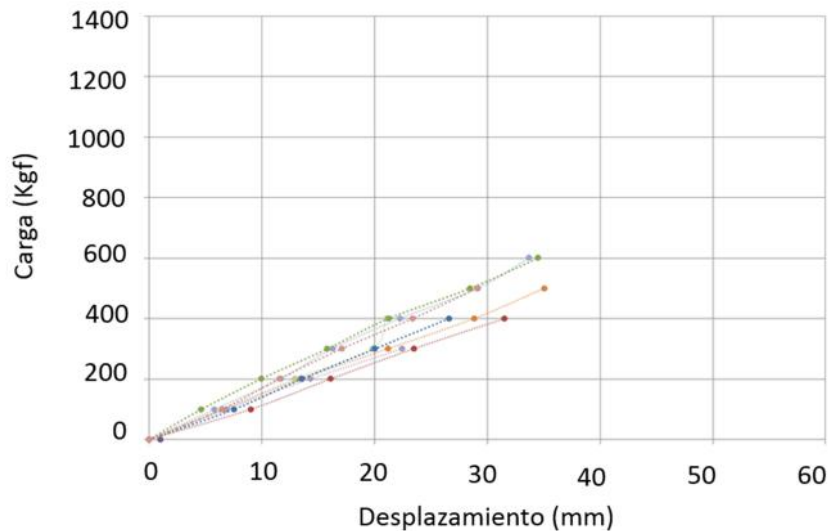


Figura 27: Curva carga - desplazamiento vigas de madera maciza reforzadas con pletinas metálicas dentadas, ensayos 1 a 10

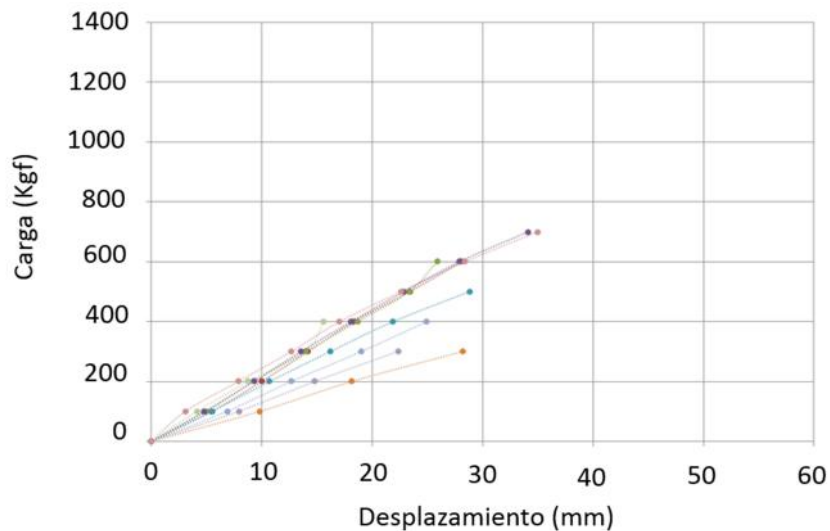


Figura 28: Curva carga - desplazamiento vigas de madera maciza reforzadas con pletinas dentadas, ensayos 11 a 20

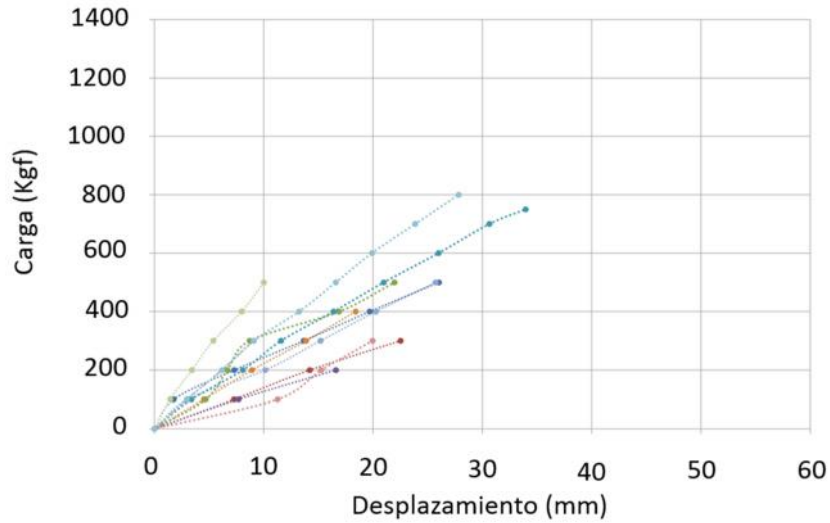


Figura 29: Curva carga-desplazamiento vigas de madera maciza reforzadas con pletinas dentadas, ensayos 21 a 30

El comportamiento de las vigas de madera maciza reforzadas con pletinas metálicas dentadas fue también perfectamente elástico.

4.3 Vigas de madera laminada Glulam no reforzadas

Las vigas de madera laminada Glulam no reforzadas tienen: 50 mm de anchura y 150 mm de altura. Se ensayaron 30 vigas y se registraron las curvas de carga versus desplazamiento máximo en el centro de la luz (ver figuras 30, 31 y 32).

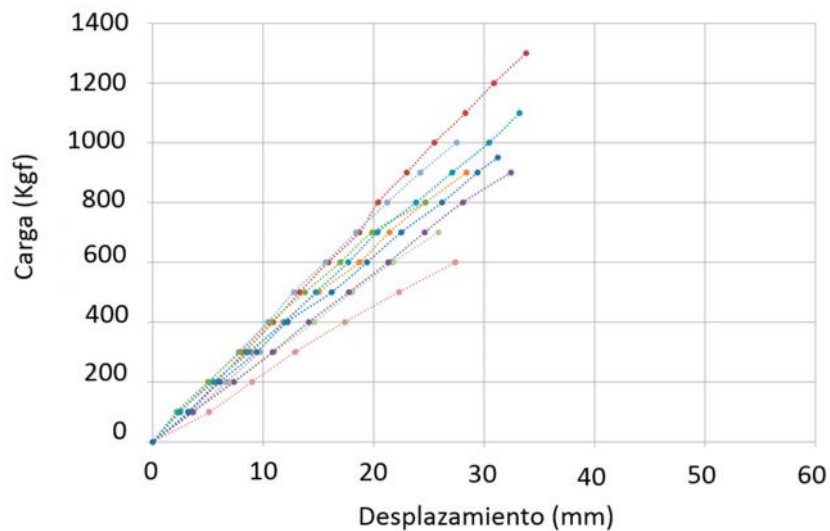


Figura 30: Curva carga - desplazamiento vigas de madera laminada Glulam no reforzadas, ensayos 1 a 10

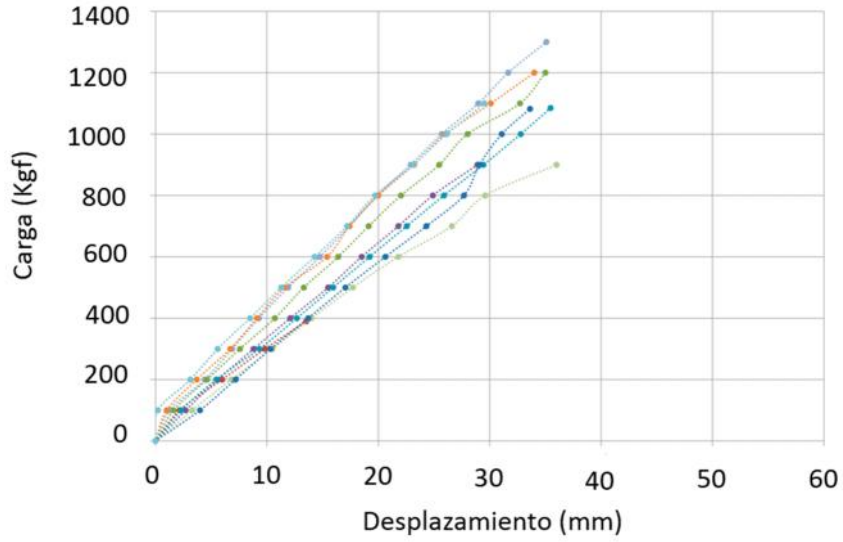


Figura 31: *Curva carga - desplazamiento vigas de madera laminada Glulam no reforzadas, ensayos 11 a 20*

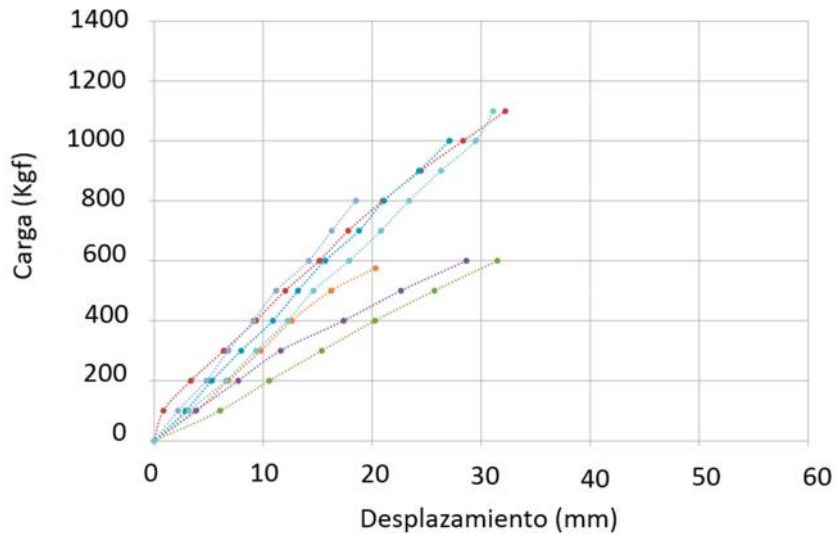


Figura 32: *Curva carga - desplazamiento vigas de madera laminada Glulam no reforzadas, ensayos 21 a 30*

El comportamiento de las vigas de madera laminada Glulam no reforzadas fue también perfectamente elástico.

4.4 Vigas de madera laminada Glulam reforzadas con pletinas metálicas dentadas

Las vigas de madera laminada Glulam reforzadas con pletinas metálicas dentadas tienen: 50 mm de anchura y 150 mm de altura. Se ensayaron 30 vigas y se registraron las curvas de carga versus desplazamiento máximo en el centro de la luz (ver figuras 33, 34 y 35).

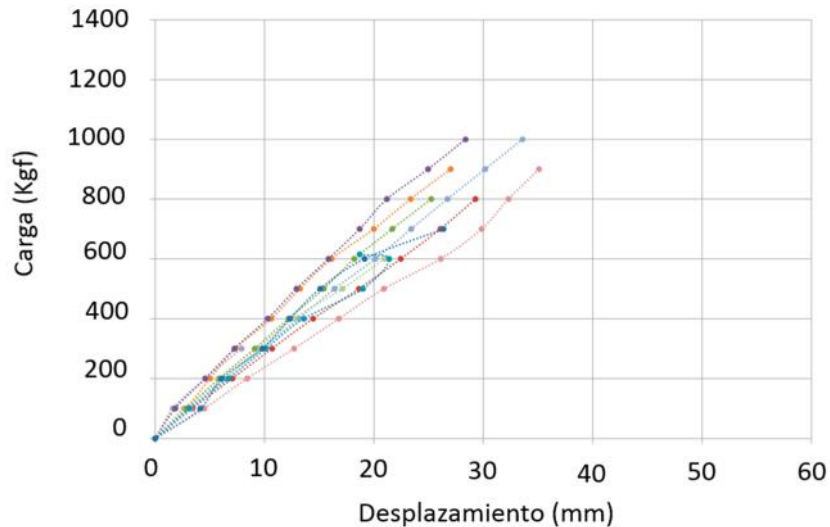


Figura 33: Curva carga - desplazamiento vigas de madera laminada Glulam reforzadas con pletinas metálicas dentadas, ensayos 1 a 10

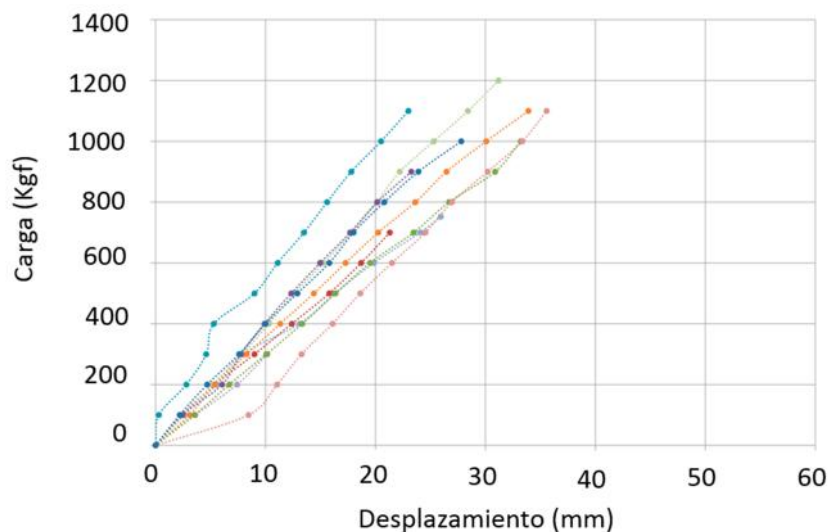


Figura 34: Curva carga - desplazamiento vigas de madera laminada Glulam reforzadas con pletinas metálicas dentadas, ensayos 11 a 20

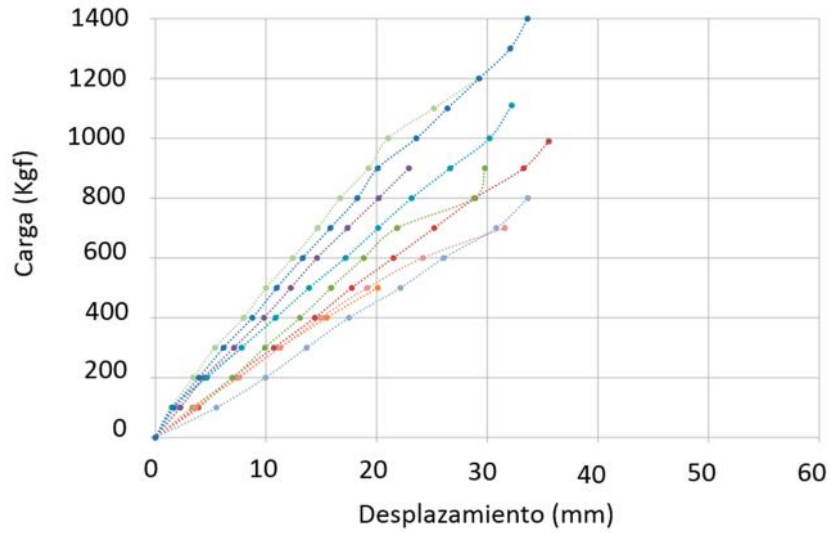


Figura 35: Curva carga - desplazamiento vigas de madera laminada Glulam reforzadas con pletinas metálicas dentadas, ensayos 21 a 30

El comportamiento de las vigas de madera laminada Glulam reforzadas con pletinas metálicas dentadas fue también perfectamente elástico.

Capítulo 5

Estudio comparativo y conclusiones

Con los datos experimentales y las ecuaciones del modelo teórico, determinamos el módulo de elasticidad y la resistencia a flexión de las vigas estudiadas.

Adicionalmente, se estiman los valores característicos del módulo de elasticidad y de la resistencia a flexión de cada grupo de vigas estudiado. Los valores característicos definidos en el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1:2004 [12]) corresponden al quinto percentil. Se espera entonces que en todas las muestras de la población ensayada solamente el 5% tenga un valor más bajo que el característico.

Los valores de resistencia a flexión característicos pueden usarse en el diseño estructural de la viga por resistencia última. En este tipo de diseño se considera por separado la incertidumbre en las cargas actuantes, en los métodos de diseño y en la resistencia del material. De esta forma, se obtienen diseños estructurales más eficientes.

Los organismos que permiten la comercialización de las vigas de madera laminada Glulam entregan entonces una certificación a los productores al considerar los valores característicos del elemento estructural.

Otro parámetro importante en el diseño estructural es el módulo de elasticidad. Para el análisis y diseño de los elementos, se recomienda considerar el valor del módulo de elasticidad característico, con el fin de garantizar mayor seguridad a la estructura. Utilizar el módulo de elasticidad promedio equivale a aceptar una probabilidad alta de que el módulo de elasticidad real esté por debajo de lo considerado. Por ello, el módulo de elasticidad promedio solo se considera adecuado para la estimación de las deformaciones. Por este motivo, en esta investigación entregamos el módulo de elasticidad característico y el módulo de elasticidad promedio para cada grupo de vigas estudiado.

Se valoraron entonces las tensiones generadas en los 4 grupos de vigas estudiadas mediante ensayos a flexión. Se estimó además el incremento en la resistencia aportado por el refuerzo y se estableció el modo de ruptura predominante en los elementos de madera laminada Glulam reforzados con pletinas metálicas dentadas.

Es necesario anotar que el análisis estadístico de los resultados utilizados en esta investigación no busca evaluar las interacciones entre los diferentes parámetros que definen el comportamiento mecánico de las vigas.

En las tabla 6 y 7 se muestran las propiedades de las vigas de madera maciza no reforzadas, vigas de madera maciza reforzadas con pletinas metálicas dentadas, vigas de madera laminada Glulam no reforzadas y vigas de madera laminada Glulam reforzadas con pletinas metálicas dentadas.

Todas las vigas ensayadas muestran un comportamiento perfectamente elástico. La carga de ruptura la define en todos los casos la presencia de defectos en la viga. En las vigas de madera maciza se hace muy evidente el efecto de las anomalías en la resistencia y en el comportamiento mecánico global de la viga (ver figuras 36 y 37).



Figura 36: *Ruptura de viga de madera maciza en zona con alteraciones físicas*



Figura 37: *Ruptura de viga de madera maciza en zona con presencia de nudos*

Tabla 6: Resumen de propiedades de vigas de madera maciza no reforzadas y vigas de madera maciza reforzadas con pletinas metálicas dentadas

	Vigas de madera maciza no reforzada	Vigas de madera maciza reforzadas con pletinas metálicas dentadas
Número de ensayos	30	30
Resistencia promedio a flexión (MPa)	25	27
Coefficiente de variación (%)	39	22
Valor característico de la resistencia a flexión (MPa)	12	17
Módulo de elasticidad promedio (MPa)	8018	6739
Coefficiente de variación (%)	45	21
Valor característico de módulo de elasticidad (MPa)	4406	4799

Tabla 7: Resumen de propiedades de vigas de madera laminada Glulam no reforzadas y vigas de madera laminada Glulam reforzadas con pletinas metálicas dentadas

	Vigas de madera laminada Glulam no reforzadas	Vigas de madera laminada Glulam reforzadas con pletinas metálicas dentadas
Número de ensayos	30	30
Resistencia promedio a flexión (MPa)	44	44
Coefficiente de variación (%)	26	24
Valor característico de la resistencia a flexión (MPa)	26	30
Módulo de elasticidad promedio (MPa)	13114	13150
Coefficiente de variación (%)	27	27
Valor característico de módulo de elasticidad (MPa)	8489	8729

El modo de ruptura predominante en las vigas de madera laminada Glulam reforzadas con pletinas metálicas dentadas se produce en las planchas inferiores con inicio de fisuración en los nudos presentes.

Las vigas de madera laminada Glulam disminuyen la influencia de los defectos presentes en las planchas (nudos, cambios de dirección de las fibras, etc.). Por este motivo, la resistencia a flexión de las vigas de madera laminada Glulam no reforzadas es mayor que la resistencia a flexión de las vigas de madera maciza no reforzadas. El valor característico de la resistencia a flexión pasa de 12 MPa para las vigas de madera maciza no reforzadas a 26 MPa para las vigas de madera laminada Glulam no reforzadas. Esto es un aumento del 117%.

Las propiedades mecánicas de las vigas de madera laminada Glulam reforzadas con pletinas metálicas dentadas son las más altas de todas las vigas estudiadas.

El valor característico de la resistencia a flexión de las vigas de madera laminada Glulam reforzadas con pletinas metálicas dentadas aumenta:

- 150% respecto a las vigas de madera maciza no reforzadas.
- 77% respecto a las vigas de madera maciza reforzadas.
- 16% respecto a las vigas de madera laminada Glulam no reforzadas.

El valor característico del módulo de elasticidad de las vigas de madera laminada Glulam reforzadas con pletinas metálicas dentadas aumenta:

- 64% respecto a las vigas de madera maciza no reforzadas.
- 95% respecto a las vigas de madera maciza reforzadas.
- 0,2% respecto a las vigas de madera laminada Glulam no reforzadas.

Las tablas 8 y 9 muestran las propiedades mecánicas de las vigas de madera maciza y de las vigas de madera laminada Glulam sugeridas por el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1:2004 [12]).

Tabla 8: Clasificación de propiedades mecánicas de las vigas de madera maciza según Eurocódigo 5

Clase	C30	C27	C24	C18	C16	C14
Valor característico de la resistencia a flexión (MPa)	30	27	24	18	16	14
Valor característico de módulo de elasticidad (MPa)	8000	7700	7400	6000	5400	4700
Módulo de elasticidad promedio (MPa)	12000	11500	11000	9000	8000	7000
Densidad característica (Kg/m ³)	380	370	350	320	310	290

Tabla 9: Clasificación de propiedades mecánicas de las vigas de madera laminada Glulam según Eurocódigo 5

Clase	GL 24	GL 28	GL 32
Valor característico de la resistencia a flexión (MPa)	24	28	32
Valor característico de módulo de elasticidad (MPa)	9400	10200	11100
Módulo de elasticidad promedio (MPa)	11600	12600	13700
Densidad característica (Kg/m ³)	380	410	430

Las vigas de madera maciza no reforzadas no estarían clasificadas porque su valor característico de resistencia a flexión (12 MPa, ver tabla 6) es menor que los 14 MPa requeridos por la clase C14.

Por otro lado, las vigas de madera maciza reforzadas con pletinas metálicas dentadas estarían clasificadas entre las categorías C16 y C18 según su valor característico de resistencia a flexión (17MPa, ver tabla 6). Esto demuestra la importancia del reforzamiento de las secciones.

Las vigas de madera laminada Glulam no reforzadas estarían clasificadas entre las clases GL 24 y GL 28 según su valor característico de resistencia a flexión (26 MPa, ver tabla 7).

Conviene entonces usar una viga de madera laminada Glulam, en lugar de utilizar vigas de madera maciza.

Las vigas de madera laminada Glulam reforzadas con pletinas metálicas dentadas estarían clasificadas entre la categorías GL 28 y GL 32 según su valor característico de resistencia a flexión (30 MPa, ver tabla 7).

Aunque la madera maciza usada en nuestra investigación tenía una densidad promedio relativamente alta (500 kg/m^3), su resistencia a flexión la clasificaría como sección de menor calidad según el Eurocódigo 5. Esto es consecuencia de la gran cantidad de defectos presentes en las planchas.

Es clara entonces la conveniencia de usar la viga de madera laminada Glulam y se evidencia que la utilización de las pletinas metálicas dentadas aporta incrementos importantes en las propiedades mecánicas de las vigas.

Con esta investigación, se determinó entonces la distribución de esfuerzos en vigas de madera laminada Glulam por medio de un análisis teórico y una validación experimental. Se estimó el incremento en la resistencia y el aumento de la rigidez de las secciones de madera laminada Glulam reforzadas con pletinas metálicas dentadas.

Las vigas de madera maciza, sin importar el uso de refuerzos, presentan un comportamiento mecánico frágil y una tendencia a la ruptura iniciada en las zonas con alteraciones físicas.

Todas las vigas presentan un comportamiento perfectamente elástico y pueden ser analizadas con un modelo teórico basado en las hipótesis de Euler – Bernoulli. No se requiere el uso de modelos teóricos no lineales, ni de modelos elasto - plásticos.

Dadas las características de la unión entre la madera y el refuerzo, se puede decir que la sección de madera laminada Glulam reforzada con pletinas metálicas dentadas es una sección perfectamente solidaria con un incremento considerable en la resistencia del elemento tratado.

La mejora de las propiedades mecánicas de las vigas de madera laminada Glulam reforzada con pletinas metálicas dentadas se puede reflejar en una disminución de la sección de los elementos Glulam y, como consecuencia de esto, en un menor peso de la estructura. Además, se puede presentar simultáneamente un aumento en la homogeneidad del elemento disminuyendo así la posibilidad de que se presenten fallas frágiles.

La madera laminada Glulam reforzada con pletinas metálicas dentadas es un material versátil que gracias a su eficiente proceso de fabricación permite la obtención de elementos que no están limitados en cuanto a su sección transversal, longitud o forma. De esta manera, se logran estructuras estéticamente agradables y con diversos usos arquitectónicos.

Las mejoras en el comportamiento mecánico de las vigas de madera laminada Glulam reforzadas con pletinas metálicas dentadas representan una oportunidad para obtener un mejor uso de la madera como materia prima del sector de la construcción.

La técnica de reforzamiento con pletinas metálicas dentadas propuesta en esta tesis presenta evidentes ventajas desde el punto de vista del comportamiento mecánico de las vigas.

Finalmente, se recomienda en investigaciones futuras:

- Utilizar pletinas metálicas dentadas en toda la longitud de las vigas.
- Ensayar las vigas con otras secciones y condiciones de carga.
- Comparar económicamente todas las técnicas de reforzamiento (fibra de carbono CFRP, fibra de vidrio GFRP, fibra de bambú y pletinas metálicas dentadas).
- Verificar la durabilidad a largo plazo de las vigas de madera laminada Glulam reforzadas con pletinas metálicas dentadas.
- Estudiar otros adhesivos con un impacto contaminante menor al del epoxi utilizado en esta investigación.

Bibliografía

- [1] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard methods of testing on small clear specimens of timber. D143-94. ASTM Annual Book of Standards. West Conshohocken, Pa., 2006.
- [2] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard test methods for specific gravity of wood and wood-based materials. D2395-02. ASTM Annual Book of Standards. West Conshohocken, Pa., 2006.
- [3] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes. D198-08. ASTM Annual Book of Standards. West Conshohocken, Pa., 2009.
- [4] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard Practice for Sampling and Data-Analysis for Structural Wood and Wood- Based Products. D2915-10. ASTM Annual Book of Standards. West Conshohocken, Pa., 2003.
- [5] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard Test Method for Strength Properties of Adhesive Bonds in Shear by Compression Loading. D905. ASTM Annual Book of Standards. West Conshohocken, Pa., 2008.
- [6] Borri, A., Corradi, M., and E. Speranzini, "Reinforcement of wood with natural fibers," *Compos. Part B Eng.*, vol. 53, pp. 1–8, Oct. 2013.
- [7] Bragdon, M. M. "Behavior and design of FRP reinforced longitudinal glulam deck bridges." BS Univ. Maine, 2002.
- [8] Cervera, R. M., Blanco, D. E., *Mecánica de estructuras Libro 1 Resistencia de materiales*. Cataluña: UPC, Sep. 2001.
- [9] Daud, N. and Shanks, R., "Epoxy–silica composites replicating wood cell structure," *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 62, pp. 11–15, Jul. 2014.
- [10] Echavarría, C., Correa, C. and Echeverri, C., "Conexiones pernadas de madera reforzadas con placas dentadas de acero," *DYNA*, vol. 77, no. 164, pp. 98–108, Dec. 2010.
- [11] Echavarría, C., Jiménez, L. and Ochoa, J. C. "Bamboo-reinforced glulam beams: an alternative to fiberglass-reinforced glulam beams," *DYNA*, vol. 79, no. 174, pp. 24–30, Aug. 2012.
- [12] Eurocode 5, Design of timber structures EN 1995-1-1:2004 (E) European Committee for Standardization, Brussels, Belgium. 2004.
- [13] Fiorelli J. and Dias, A. A. "Analysis of the strength and stiffness of timber beams reinforced with carbon fiber and glass fiber," *Mater. Res.*, vol. 6, no. 2, pp. 193–202, Jun. 2003.

- [14] Fournier Z. R., "Construcción sostenible y madera: realidades, mitos y oportunidades," *Tecnol. En Marcha*, vol. 21, no. 4, pp. 92–101, Oct. 2008.
- [15] Fueyo, J. G., Cabezas, J. A., Domínguez, M. and Rubio, M. P. "Análisis de Tensiones en Uniones de Tres Barras de Cerchas Ligeras de Madera Realizadas con Placas-Clavo," *Inf. Technological*, vol. 20, no. 6, pp. 45–56, Jan. 2009.
- [16] Ghaffar, S. H. and Fan, M., "Structural analysis for lignin characteristics in biomass straw," *Biomass Bioenergy*, vol. 57, pp. 264–279, Oct. 2013.
- [17] Humphrey, M. F. "An investigation into the rehabilitation of timber structures with fiber composite materials," 2004.
- [18] NSR-10, Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (2010). Colombia: Diario Oficial. Decreto 926 del 19 de marzo de 2010.
- [19] Mascia, N. T. and Mayer, R. M. "Analysis of wood laminated beams reinforced by natural fibers," in *Structural Health Assessment of Timber Structures*, vol. 778, Trento, Italy: Trans Tech Publications, 2013, pp. 553–560.
- [20] Raftery, G. M. and Whelan, C., "Low-grade glued laminated timber beams reinforced using improved arrangements of bonded-in GFRP rods," *Constr. Build. Mater.*, vol. 52, pp. 209–220, Feb. 2014.
- [21] Reza, S. A., "Rehabilitation of timber railroad bridges using glass fiber reinforced polymer composite," West Virginia University, Virginia, 2007.
- [22] Triantafillou, T. C. "Composites: a new possibility for the shear strengthening of concrete, masonry and wood," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 58, no. 8, pp. 1285–1295, Agosto 1998.
- [23] *Wood Handbook: Wood as an engineering material*, Forest Products Laboratory, U.S. Department of Agriculture. Madison, WI, 2010.
- [24] Zhu, Z., Zeng, H., Zhu and Yang F., Zhu, H., Qin H., and Wei, W., "Kinetics and thermodynamic study of phosphate adsorption on the porous biomorph-genetic composite of $-Fe_2O_3/Fe_3O_4/C$ with eucalyptus wood microstructure," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 117, pp. 124–130, Sep. 2013.

Anexo 1

Bamboo reinforced glulam beams: an alternative to CFRP reinforced glulam beams

César Echavarría^{1,a}, Beatriz Echavarría^{1,b} and Hernán Cañola^{1,c}

¹School of Construction, Calle 59A 63-20, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia

^acaechavarrial@unal.edu.co, ^bbaechava@unal.edu.co, ^chdcanola@unal.edu.co

Keywords: glulam, beam, CFRP, bamboo, reinforcement.

Abstract. A research study was undertaken to investigate the mechanical performance of glulam beams reinforced by CFRP or bamboo. Local reinforcement is proposed in order to improve the flexural strength of glulam beams. The glulam beam is strengthened in tension and along its sides with the carbon fiber-reinforced polymer CFRP or bamboo. A series of CFRP reinforced glulam beams and bamboo reinforced glulam beams were tested to determine their load-deformation characteristics. Experimental work for evaluating the reinforcing technique is reported here. According to experiment results, the CFRP and bamboo reinforcements led to a higher glulam beam performance. By using CFRP and bamboo reinforcements several improvements in strength may be obtained.

Introduction

Wood is often inappropriate for heavy loads construction applications because of its low durability and high variability. In order to add value to lumber, the glued-laminated timber (glulam) technique is a rational option; it is a well-established technique for minimizing the effects of knots, micro fibrils angle, and heterogeneity existing in solid timber beams.

With higher mechanical properties and less variability, glulam has become an interesting alternative to traditional materials (e.g. concrete, steel) for structures in civil engineering. A further step to decrease this variability has been widely investigated during recent decades by bonding carbon and glass fibers (FRPs) to timber or glulam beams [1, 5-12]. These fibers are stiff and strong, have low density and are corrosion resistant. It has been shown that it is possible to increase the flexural properties, the shear properties, or both of them simultaneously. However, fibers used as FRP components are difficult to recycle. The properties of some natural fibers (bamboo, cotton, wool, etc.) have been investigated and the reported results showed promising use of some of them as an alternative to FRPs in many applications. Natural fibers are light, renewable and possess high mechanical properties. These characteristics make them suitable to be used for the strengthening of structural elements made of wood.

This paper shows an experimental study on reinforcing glulam beams made of Carbonero (*Licania Campestre*) with CFRP and bamboo.

Reinforced glulam beams

The lumbers used to produce glued-laminated timber are first graded to determine their strength (visual grading) and stiffness (mechanical grading) so as to optimize the mechanical properties of each component of the glulam and place each member in the most optimal place. Lumbers with the highest mechanical properties will be placed in the top and bottom of the glulam, where the bending stresses (both compression and tension) are the greatest.

The initial assembly is achieved when the wood is in a dry state. The glue is then applied and the laminas are stuck together. Pressure is applied during curing to provide a good bonding between the laminas. As a final step, surface planing, patching and end trimming are achieved to get a smooth surface. Glulam timbers exhibit the same characteristic as lumber; however, glulam timber has less variability, better mechanical properties and allows for better control and removal of natural defects present in wood such as knots, shakes, the slope of the grain, etc.

The tension failure of glulam in bending is brittle, random, and difficult to predict. In order to increase glulam beams load capacity, CFRP or bamboo can be used as a superficial covering (reinforcement) on the lateral faces of the glulam beam. The required beam section can be reduced by reinforcing the wood with stiff and strong materials, thereby obtaining an increase in bending stiffness and strength.

Using reinforcement ensures improvements in structural performance. Reinforced glulam beams can be a good option as a substitute for high quality solid timber beams when forest resources are not available to make solid timber elements.

Reinforcement can have major advantages:

- The enhancement of the glulam beam's mechanical properties.
- The decrease of the cross section and the weight of the glulam beam.
- The allowable use of lower wood grades.

In this project all the glulam beams were made of Carbonero (*Licania Campestre*). In Table 1 there is a general description of its mechanical properties.

Table 1. Mechanical properties of Carbonero, *Licania Campestre*

σ_L Tensile strength [MPa]	107
τ_{LT} Shear strength [MPa]	9

CFRP

A composite fiber-reinforced polymer (FRP) is used in this study. FRP consists of a polymer matrix that is reinforced with fibers. The fibers are usually fiberglass, carbon, or aramid, while the polymer is usually an epoxy, vinylester or polyester thermosetting plastic. FRPs are commonly used in the aerospace, automobile, marine, and construction industries. Fig. 1 shows the CFRP reinforcement.



Figure 1. CFRP

The reinforcement materials used in this research are SikaWrap™ HEX-230C carbon fiber fabric unidirectional woven in 230 gr/m² and the epoxy resin of Sikadur™ HEX300. Sikadur™ HEX300 is an epoxy system which has high strength, a high modulus of elasticity, and which adheres even in the presence of moisture. For this research, it is used as primer and impregnating resin, as a bonding agent between the glulam beam and the reinforcement.

These reinforcements are glued laterally on the glulam beam as shown in Fig. 2. The glulam beam is reinforced in tension (bottom of the beam) and on its sides with CFRP (U-shaped half wrapping).

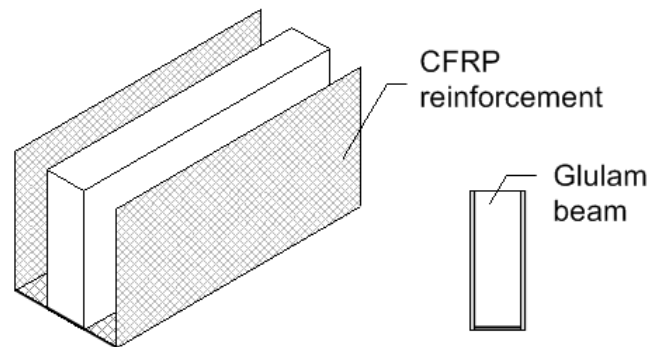


Figure 2. CFRP reinforced glulam beam

This reinforcement contributes to improvement in the wood's mechanical behaviour and giving the necessary strength to avoid brittle failures. In particular, the shear and tensile strength of the reinforced wood increase considerably. The elastic constants and material properties of CFRP reinforcement are summarized in Table 2. These properties are typically provided by the manufacturer of the FRP material product. Nevertheless, independent checks (via theoretical calculations) and tests have been conducted to verify the FRP material properties reported here.

Table 2. Mechanical properties of CFRP reinforcement

Plate thickness t [mm]	σ_L Tensile strength [MPa]	E_L Modulus of elasticity [MPa]
0,3	1640	93450

CFRP becomes an alternative which is particularly useful for reinforcement in existing structures.

Bamboo (*Guadua Angustifolia*)

Recyclability and environmental friendliness are important ecological attributes. Natural fibers, which serve as reinforcement in composite materials, have gained a renewed interest for use as construction material. *Guadua Angustifolia* is the predominant Bamboo in Colombia. Bamboo is mainly used in Colombia for household objects and roof systems; it is also employed for flooring and furniture. There are other more industrial-scale uses which are being developed and investigated.

The process for obtaining Bamboo in sheets and planks involves cutting stalks into thin strips, making them flat, and finally boiling and drying the strips. Thin flat strips of bamboo are used in our research as reinforcement to improve the behaviour of the glulam beam.

Fig. 3 shows the reinforcement, which is constituted by the bamboo (*Guadua Angustifolia*) and the epoxy resin of Sikadur HEX300™. The bamboo strip reinforcements are glued laterally on the glulam beam as shown in Fig. 4 and 5. Elastic constants and material properties are summarized in Tables 3 and 4. Bamboo exhibits interesting specific mechanical properties compared to CFRP, especially regarding the modulus of elasticity.

Table 3. Elastic constants of bamboo reinforcement [MPa]

E_T	E_L
650	14100

Table 4. Mechanical properties of bamboo reinforcement

Plate thickness t [mm]	σ_L Tensile strength [MPa]
5,0	100

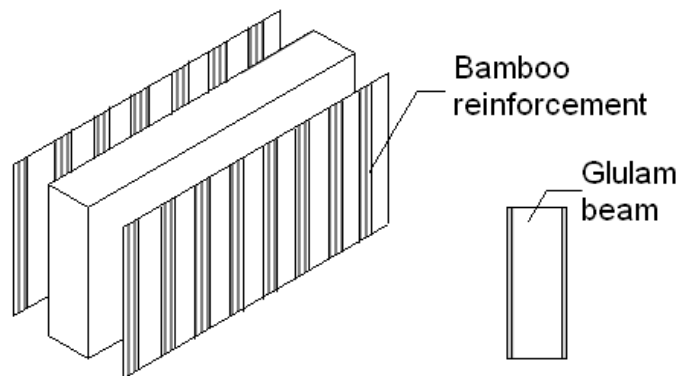
Figure 3. Bamboo, *Guadua Angustifolia*

Figure 4. Bamboo reinforced glulam beam

In all cases, the application of reinforcement must be carried out with precautions. The bonding of fiberglass and bamboo reinforcements must be prepared very carefully:

- The wood surface must be flat, clean, and not weathered to insure proper adhesion.
- The wood surface must be dry when carrying out the gluing process, in order to optimize the bonding between the wood and the reinforcement (the CFRP or the bamboo).



Figure 5. Bamboo reinforced glulam beam

Experimental verification and discussion

This paper presents a comparative study: 10 non-reinforced glulam beams made of Carbonero (*Licania Campestre*), 8 CFRP reinforced glulam beams and 8 bamboo reinforced glulam beams were prepared and tested under four point bending. By reinforcing the glulam beams with bamboo or CFRP, a more homogeneous mechanical behaviour is obtained, since load capacity and ultimate displacement are increased. The tensile and shear strength must be enhanced mainly by the judicious use of reinforcement.

Laboratory tests on non-reinforced and reinforced glulam beams were performed. The cross section of the beams is rectangular with a width of 50 mm and a height of 150 mm. The beam is simply supported with a span of 2.40 m represented by the geometry shown in Fig. 6 and 7.

The glulam beams were made of *Carbonero* kiln-dry lumber. Prior to gluing, the laminas were conditioned to attain 12% equilibrium moisture content. Specific gravity based on oven-dry mass and volume at 12% moisture content of the specimens varied from 0,50 to 0,60 as determined per ASTM D2395-02 [3]. For each lamina, wood elastic properties were determined non-destructively using transverse vibration (E-computer) and visual grading criteria. Material shear strength and tensile strength parallel-to-grain were determined using ASTM D143-94 [2] test methods. Tests were conducted on small, clear, straight-grained specimens at 12% moisture content. The elastic constants of Carbonero are summarized in Table 5.

Table 5. Elastic constants of Carbonero, *Licania Campestre* [MPa]

E_x	E_y	G_{xy}	ν_{yx}
930	14300	990	0,28



Figure 6. Bending test

The beams were tested under four point bending using a universal testing machine in accordance with ASTM D198-08 [4]. The displacement-control rate of loading was applied to achieve failure in 5-15 min and the load-displacement curve was recorded. Tests were stopped when one of the following conditions was reached: when the load dropped with no recovery or when the displacement exceeded 50 mm. A total of 26 glulam beams were tested in the course of this study. The number of replications and the summary of test results for each configuration are given in Tables 6, 7, and 8.

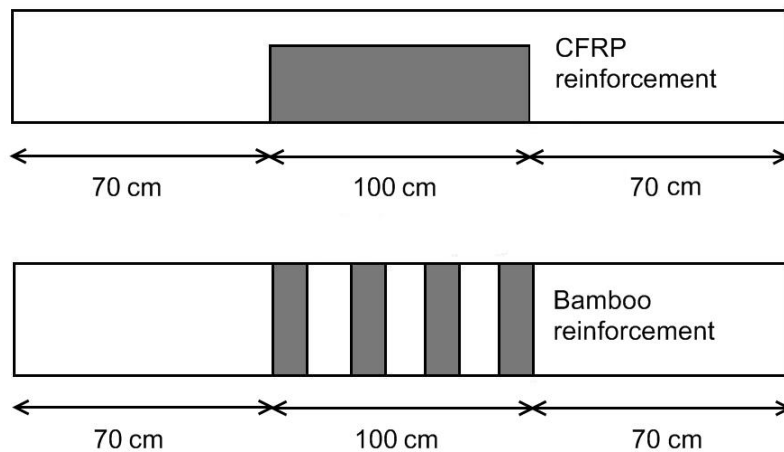


Figure 7. Reinforced glulam beams

Table 6. Experimental average flexural strength in non-reinforced glulam beams

Number of beams	E [MPa]	Average flexural strength [MPa]
10	14800	45

Table 7. Experimental average flexural strength in CFRP reinforced glulam beams

Number of beams	E [MPa]	Average flexural strength [MPa]
8	15000	110

Table 8. Experimental average flexural strength in bamboo reinforced glulam beams

Number of beams	E [MPa]	Average flexural strength [MPa]
8	13800	56

The displacement measured at mid-span presented a linear behaviour in all the glulam beams. Besides, a failure in the tension side was mostly registered for the non-reinforced beams. As mentioned previously, glulam beams tested in bending usually failed at the tension side at knots, defects or finger joints positions. Glulam is thus mostly reinforced on the tension side in order to enhance the tensile properties, to increase the flexural strength and stiffness and to make the glulam beam fail in compression mode, which is more ductile.

There is a noticeable increase of flexural strength by reinforcing the beams (Tables 7 and 8). Both CFRP and bamboo work well as reinforcements. The ratio of reinforced and non-reinforced flexural strength using CFRP is 244%. The ratio using bamboo is 124%. Table 9 resumes the comparative results.

Table 9. Relation between modulus of elasticity and flexural strength of reinforced and non-reinforced glulam beams

	Ratio of reinforced and non-reinforced glulam beams (%)	
	Modulus of elasticity	Flexural strength
CFRP reinforcement	101	244
Bamboo reinforcement	93	124

The mechanical behaviour of reinforced glulam beams will be more homogeneous and the reliability of the whole structure will increase.

Conclusions

The improvements on mechanical performance of CFRP and bamboo reinforced glulam beams offer a higher failure load. The stiffness of CFRP reinforced glulam beams and bamboo reinforced glulam beams are identical. Behaviour of reinforced glulam beams is more uniform than unreinforced ones; it leads to further improvement in design properties.

There are many advantages for using CFRP or bamboo reinforcements in glulam beams:

- Increased strength.
- Improved structural efficiency and reduced structural member size requirements, weight, and costs under certain conditions.
- Allowing for the upgrading of structures for higher loads or for restoring original strength.

By placing the reinforcement in the center of the beam, both CFRP and bamboo are options with great potential for improving the flexural strength of glulam beams. By reinforcing glulam beams with CFRP or bamboo, under certain conditions, structural members size requirements, weight, and costs can be reduced. Bamboo could be a good alternative for reinforcement because it is less expensive than CFRP.

References

- [1] A. André, Fibers for strengthening of timber structures, Research report, Luleå University of Technology, Division of Structural Engineering, (2006)
- [2] American Society for Testing and Materials (ASTM), Standard methods of testing on small clear specimens of timber. D143-94. ASTM Annual Book of Standards. West Conshohocken, Pa, (2006)
- [3] American Society for Testing and Materials (ASTM), Standard test methods for specific gravity of wood and wood-based materials. D2395-02. ASTM Annual Book of Standards. West Conshohocken, Pa, (2006)
- [4] American Society for Testing and Materials (ASTM), Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes. D198-08. ASTM Annual Book of Standards. West Conshohocken, Pa, (2009)
- [5] M. Brunner, M. Schnueriger, Timber beams strengthened by attaching prestressed carbon FRP laminates with a gradiented anchoring device, Proceedings of the international symposium on bond behaviour of FRP in structures (BBFS 2005), (2005) 465-471.
- [6] J. Fiorelli, A. Alves Dias, Analysis of the strength and stiffness of timber beams reinforced with carbon fiber and glass fiber, *Materials Research*, 6(2) (2003) 193-202.
- [7] P. Haller, J. Wehsener, Use of technical textiles and densified wood for timber joints. Proceedings RILEM Symposium on Timber Engineering, Stockholm, Sweden, (1999)
- [8] Z. Martin, J. Stith, D. Tingley, Commercialisation of FRP reinforced glulam beam technology. Proceedings of the 6th World Conference on Timber Engineering WCTE, Whistler, Canada, (2000)
- [9] G. Patrick, The structural performance of FRP reinforced glued laminated beams made of homegrown Sitka spruce. Ph.D. Thesis, Queen's University, Belfast, Northern Ireland, (2004)
- [10] M. Romani, H. Blaß, Design model for FRP reinforced glulam beams. Proceedings of the International Council for Research and Innovation in Building and Construction (CIB), Working Commission W18 Timber Structures, Meeting 34, Venice, Italy, (2001)
- [11] R. Rowlands, R. Van Deweghe, T. Laufenberg, G. Krueger, Fiber-reinforced wood composites, *Wood and Fiber Science*, 18 (1986) 39-57.
- [12] M. Valluzzi, E. Garbin, C. Modena, Flexural strengthening of timber beams by traditional and innovative techniques, *Journal of Building Appraisal*, 3 (2007) 125–143.

Anexo 2

BAMBOO REINFORCED GLULAM BEAMS: AN ALTERNATIVE TO PUNCHED METAL PLATE, GFRP AND CFRP REINFORCED GLULAM BEAMS

César Echavarría¹, Beatriz Echavarría², Hernán Cañola³

ABSTRACT: A research study was undertaken to investigate the mechanical performance of glulam beams reinforced by bamboo, punched metal plates, fiberglass GFRP or carbon fiber-reinforced polymer CFRP. Local reinforcement is proposed in order to improve the flexural strength of glulam beams. The glulam beam is strengthened in tension and along its sides with the reinforcements. A series of reinforced glulam beams were tested to determine their load-deformation characteristics. Experimental work for evaluating the reinforcing technique is reported here. According to results in this research study the GFRP, CFRP, punched metal plates and bamboo reinforcements led to a higher glulam beam performance.

KEYWORDS: glulam, beam, bamboo, punched metal plate, GFRP, CFRP, reinforcement

1 INTRODUCTION ¹²³

Glulam timbers exhibit the same characteristics as lumber. However, glulam has less variability and higher mechanical properties that make it easier to control and remove natural defects present in wood such as knots, shakes, the slope of the grain, etc. A further step to decrease this variability has been widely investigated during recent decades by bonding carbon and glass fibers (FRPs) to timber or glulam beams [1, 5-16]. These fibers are stiff and strong, have low density and are corrosion resistant. It has been shown that it is possible to increase the flexural properties, the shear properties, or both simultaneously. However, fibers used as FRP components are difficult to recycle. The properties of some natural fibers (bamboo, cotton, wool, etc.) have been investigated and the reported results showed promising utilisation of some of them as an alternative to FRPs in many applications. Natural fibers are light, renewable and possess good mechanical properties. These characteristics make them suitable to be used for the strengthening of structural elements made of wood. Another method of

increasing the flexural strength of glulam beams is to reinforce the beam with a punched metal plate of same type as used in the joints of truss structures, see Figures 2 and 3.

In this project all the glulam beams were made of Carbonero (*Licania Campestre*). In Table 1 there is a general description of its mechanical properties and elastic constants.

Table 1: Mechanical properties of Carbonero, *Licania Campestre*

σ_L Tensile strength [MPa]	107
τ_{LT} Shear strength [MPa]	9
E_L [MPa]	14300
E_T [MPa]	930
G_{TL} [MPa]	990

2 REINFORCED GLULAM BEAMS

The tension failure of glulam in bending is brittle, random, and difficult to predict. In order to increase glulam beams load capacity and ductility, CFRP, GFRP, punched metal

¹ César Echavarría, School of Construction, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.

Email: caechavarrial@unal.edu.co

² Beatriz Echavarría, School of Construction, Universidad Nacional de Colombia, Integral S.A., Medellín, Colombia.

Email: baechava@unal.edu.co

³ Hernán Cañola, School of Construction, Universidad Nacional de Colombia, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, Medellín, Colombia.

Email: hdcanola@unal.edu.co

plates or bamboo can be used as reinforcement on the lateral faces of the glulam beam.

2.1 BAMBOO (GUADUA ANGUSTIFOLIA)

Recyclability and environmental friendliness are important ecological attributes of timber constructions. Natural fibers, which serve as reinforcement in composite materials, have gained a renewed interest for use as construction material. Guadua Angustifolia is the predominant bamboo in Colombia. Bamboo is mainly used in Colombia for household objects and roof systems; it is also employed for flooring and furniture. There are other more industrial-scale uses which are being developed and investigated. Thin flat strips of bamboo are used in our research as reinforcement to improve the behavior of the glulam beam. Figures 1 and 6 show the reinforcement, which is constituted by the bamboo (Guadua Angustifolia) and the epoxy resin of Sikadur HEX300™.

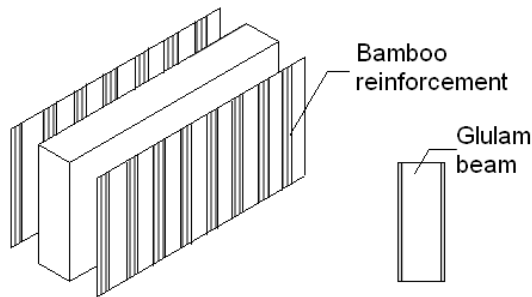


Figure 1: Bamboo reinforced glulam beam

Elastic constants and material properties are summarized in Tables 2 and 3.

Table 2: Elastic constants of bamboo reinforcement

E_T [MPa]	E_L [MPa]
650	14100

Table 3: Mechanical properties of bamboo reinforcement

Plate thickness t [mm]	σ_L Tensile strength [MPa]
5,0	100

2.2 PUNCHED METAL PLATES

The reinforcement effect of punched metal plates in areas with a moment peak is also tested. Punched metal plates are made from galvanized steel sheets. The reinforcement is made by MP24 plates from Simpson™. Different widths and lengths of the plates are used. All plates are located at

the centre of the beams 10 mm from the tensile edge, see Figures 2, 3 and 6.

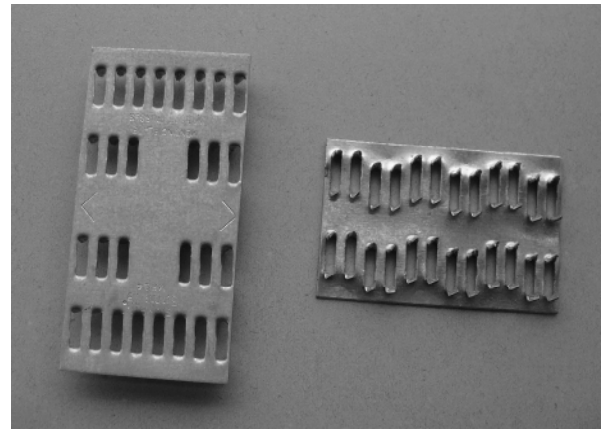


Figure 2: Punched metal plate reinforcement

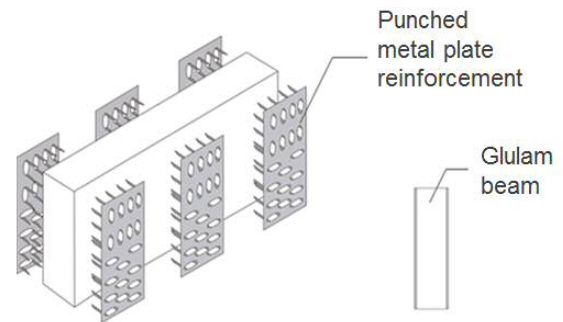


Figure 3: Punched metal plate reinforced glulam beam

The elastic constants and material properties of punched metal plate reinforcement are summarized in Table 4.

Table 4: Mechanical properties of punched metal plate reinforcement

Plate thickness t [mm]	σ_L Tensile strength [MPa]	E_L Modulus of elasticity [MPa]
1,0	190	210000

2.3 GFRP

The reinforcement materials used in this research are OCV™ roving fiberglass bi-directional fabrics woven in 800 gr/m2 (WR800) and the epoxy resin of Sikadur HEX300™. Sikadur HEX300™ is an epoxy system which has high strength, a high modulus of elasticity, and which adheres even in the presence of moisture. For this research, it is used as primer and impregnating resin, and as a bonding agent between the glulam beam and the reinforcement.

These reinforcements are glued laterally on the glulam beam as shown in Figures 4, 5 and 6. The glulam beam is reinforced in tension (bottom of the beam) and on its sides with fiberglass (U-shaped half wrapping).

The elastic constants and material properties of fiberglass reinforcement are summarized in Tables 5 and 6.

Table 5: *Elastics constants of fiberglass reinforcement*

E_L [MPa]	E_T [MPa]	G_{LT} [MPa]	ν_{TL}
19600	19600	7950	0,23

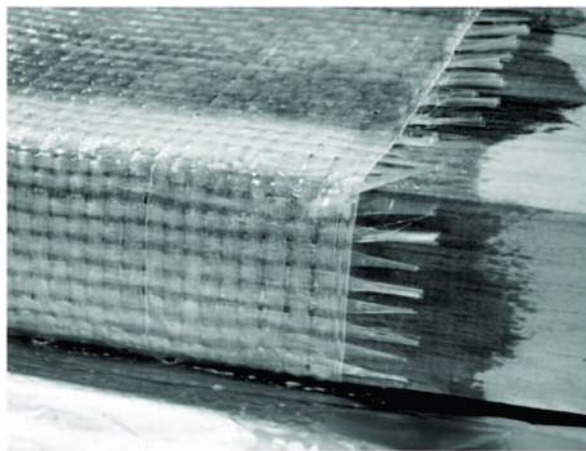


Figure 4: *GFRP reinforced glulam beam*

Table 6: *Mechanical properties of fiberglass reinforcement*

Plate thickness t [mm]	σ_L Tensile strength [MPa]
0,6	650

2.4 CFRP

A composite fiber-reinforced polymer (FRP) is used in this study. FRP consists of a polymer matrix that is reinforced with fibers. The fibers are usually fiberglass, carbon, or aramid, while the polymer is usually an epoxy, vinylester or polyester thermosetting plastic. FRPs are commonly used in the aerospace, automobile, marine, and construction industries.

The reinforcement materials used in this research are SikaWrap™ HEX-230C carbon fiber fabric unidirectional woven in 230 gr/m² and the epoxy resin of Sikadur™ HEX300. These reinforcements are glued laterally on the glulam beam as shown in Figures 5, 6 and 7.

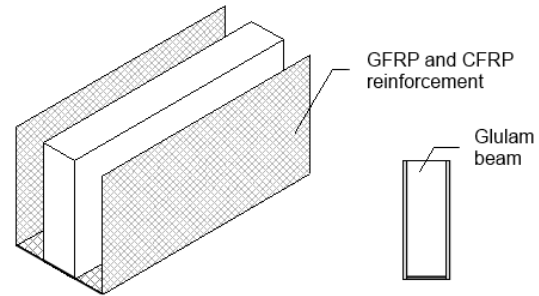


Figure 5: *GFRP and CFRP reinforced glulam beam*

The elastic constants and material properties of CFRP reinforcement are summarized in Table 7.

Table 7: *Mechanical properties of CFRP reinforcement*

Plate thickness t [mm]	σ_L Tensile strength [MPa]	E_L Modulus of elasticity [MPa]
0,3	1640	93450

The required beam section can be reduced by reinforcing the wood with stiff and strong materials, thereby obtaining an increase in bending stiffness and strength. Using reinforcement ensures improvements in structural performance. Reinforced glulam beams can be a good option as a substitute for high quality solid timber beams when forest resources are not available to make solid timber elements.

Laboratory tests on non-reinforced and reinforced glulam beams were performed. The cross section of the beams is rectangular with a width of 50 mm and a height of 150 mm. The beam is simply supported with a span of 2.40 m represented by the geometry shown in Figure 6.

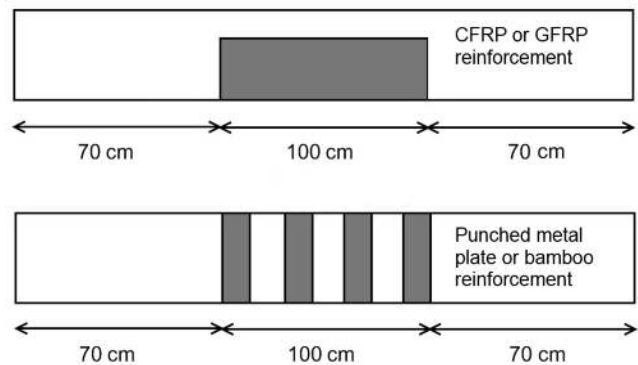


Figure 6: *Reinforced glulam beams*

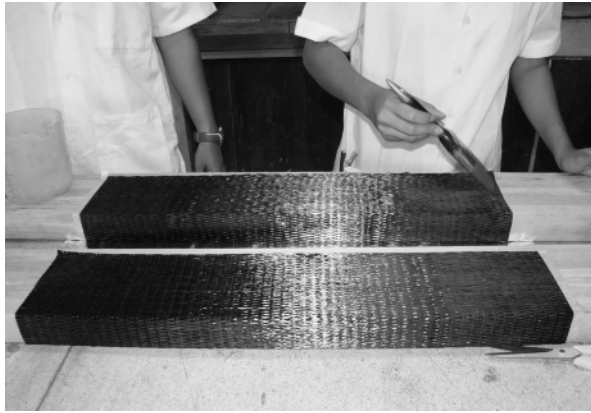


Figure 7: CFRP reinforced glulam beam

The following precautions must be taken for the successful bonding of the CFRP, GFRP and bamboo reinforcements:

- The wood surface must be flat, clean, and not weathered to insure proper adhesion.
- The wood surface must be dry when carrying out the gluing process in order to optimize the bonding between the wood and the reinforcement.

3 DISCUSSION AND EXPERIMENTAL VERIFICATION

The glulam beams were made of Carbonero kiln-dry lumber. Prior to gluing, the laminas were conditioned to attain 12% equilibrium moisture content. Specific gravity based on oven-dry mass and volume at 12% moisture content of the specimens varied from 0,50 to 0,60 as determined per ASTM D2395-02 [3]. For each lamina, wood elastic properties were determined non-destructively using transverse vibration (E-computer) and visual grading criteria. Material shear strength and tensile strength parallel-to-grain were determined using ASTM D143-94 test methods [2]. Tests were conducted on small, clear, straight-grained specimens at 12% moisture content.

The beams were tested under four point bending using a universal testing machine in accordance with ASTM D198-08 [4], see Figure 8.

The displacement-control rate of loading was applied to achieve failure in 5 to 15 min and the load-displacement curve was recorded. Tests were stopped when one of the following conditions was reached: when the load dropped with no recovery or when the displacement exceeded 50 mm.

This paper shows an experimental study on reinforcing glulam beams made of Carbonero (*Licania Campestre*) with CFRP, GFRP, punched metal plates and bamboo: 30 non-reinforced, 8 bamboo reinforced, 30 punched metal plate reinforced, 9 GFRP reinforced and 8 CFRP reinforced glulam beams were prepared and tested under four point bending.



Figure 8: Bending test

The number of replications and the summary of test results for each configuration are given in Tables 8, 9 and 10.

Table 8: Experimental average flexural strength in non-reinforced glulam beams

Number of beams	E [MPa]	Average flexural strength [MPa]
30	13114	44

Table 9: Experimental average flexural strength in reinforced glulam beams

Reinforcement	Number of beams	E [MPa]	Average flexural strength [MPa]
Bamboo	8	13800	56
Punched metal plate	30	13150	44
GFRP	9	17100	50
CFRP	8	15000	110

By reinforcing the glulam beams with the CFRP, GFRP, punched metal plates and bamboo, a more homogeneous mechanical behavior is obtained, since load capacity, ultimate displacement, and ductility are increased.

There is a noticeable increase of flexural strength by reinforcing the beams. The ratio of reinforced and non-reinforced flexural strength using bamboo is 127%. The ratio using punched metal plates is 100%. The ratio using GFRP is 114%. The ratio using CFRP is 250%.

Table 10: Relation between modulus of elasticity and flexural strength of reinforced and non-reinforced glulam beams

Reinforcement	Ratio of reinforced and non-reinforced glulam beams (%)	
	Modulus of elasticity	Average flexural strength
Bamboo	105	127
Punched metal plate	100	100
GFRP	130	114
CFRP	114	250

In general, the failure for all beams with or without reinforcement showed strong correlation to the appearance and the size of the knots in the tensile side in the area of the load supply. An examination of the failure types in the tests with a low failure load compared to the mean value of each series shows that the failure in many cases occurred at knots within the reinforcing area.

4 CONCLUSIONS

Advantages of using CFRP, GFRP, punched metal plates or bamboo reinforcements in glulam beams include:

- Increased strength and stiffness.
- Improved structural efficiency and reduced structural member size requirements, reduced weight, and reduced cost under certain conditions.
- Upgraded structural capacity for higher loads or for restoring original strength.

Behavior of reinforced glulam beams is more uniform than unreinforced ones and it leads to further improvement in design properties. The decreased coefficient of variation in tests with a reinforcement shows that the failure load is less sensitive to weak sections.

In further analysis it is recommended to:

- Use a punched metal plate with other section lengths.
- Use a GFRP with high tension capacity.
- Test beams with other spans and loading conditions.

REFERENCES

- [1] ANDRE, A. Fibers for strengthening of timber structures. Research report, Luleå University of Technology, Division of Structural Engineering, 2006.
- [2] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard methods of testing on small clear specimens of timber. D143-94. ASTM Annual Book of Standards. West Conshohocken, Pa., 2006.
- [3] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard test methods for specific gravity of wood and wood-based materials. D2395-02. ASTM Annual Book of Standards. West Conshohocken, Pa., 2006.
- [4] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes. D198-08. ASTM Annual Book of Standards. West Conshohocken, Pa., 2009.
- [5] BRUNNER, M., SCHNUERIGER, M. Timber beams strengthened by attaching prestressed carbon FRP laminates with a gradiented anchoring device. Proceedings of the international symposium on bond behavior of FRP in structures (BBFS 2005), pp. 465-471, 2005.
- [6] DAVALOS, J.F., BARBERO, E. AND MUNIPALLE, U. Glued-laminated timber beams reinforced with E-glass/polyester pultruded composites. Proceedings 10th structures congress, ASCE, San Antonio, Texas, pp. 47-50, 1992.
- [7] CHEN, C.J. Mechanical behavior of fiberglass reinforced timber joints. Ph.D Thesis N° 1940. Swiss Federal Institute of Technology Lausanne EPFL, Switzerland, 1999.
- [8] CHEN, C.J., HALLER, P. Experimental Study on Fiberglass Reinforced Timber Joint. Pacific Timber Engineering Conference. Gold Coast, Australia, 1994.
- [9] ECHAVARRÍA, C., CORREA, C. AND ECHEVERRI, C. Dowel-type timber joints reinforced with steel nail plates. Dyna, Año 77, 164, pp. 98-108, 2010.
- [10] FIORELLI, J. DIAS, A.A. Analysis of the strength and stiffness of timber beams reinforced with carbon fiber and glass fiber. Materials Research; 6(2):193-202, 2003.
- [11] HALLER, P., CHEN, C.J. AND NATTERER, J.

- Experimental study of glassfibre reinforced and densified timber joints. Proceedings Timber Engineering Conference. New Orleans, USA, 1996.
- [12] HALLER, P., WEHSENER, J.
Use of technical textiles and densified wood for timber joints. Proceedings RILEM Symposium on Timber Engineering. Stockholm, Sweden, 1999.
- [13] MARTIN, Z.A., STITH, J.K. AND TINGLEY D.A.
Commercialisation of FRP reinforced glulam beam technology. Proceedings of the 6th World Conference on Timber Engineering WCTE, Whistler, Canada, 2000.
- [14] PATRICK, G.R.H.
The structural performance of FRP reinforced glued laminated beams made of homegrown Sitka spruce. Ph.D. Thesis, Queen's University, Belfast, Northern Ireland, 2004.
- [15] ROMANI, M., BLAß, H.J.
Design model for FRP reinforced glulam beams. Proceedings of the International Council for Research and Innovation in Building and Construction (CIB), Working Commission W18 Timber Structures, Meeting 34, Venice, Italy, 2001.
- [16] ROWLANDS, R.E., VAN DEWEHGE, R.P., LAUFENBERG, T.L. AND KRUEGER, G.P.
Fiber-reinforced wood composites. Wood and fiber science; 18:39-57, 1986.

Anexo 3

**Vigas de madera laminada GLULAM reforzadas con
platinas metálicas dentadas**

Formulación proyecto de tesis

Maestría en construcción, modalidad investigación

Candidato

Hernán Darío Cañola

Director

Ph.D. M.Sc. Ingo. César Echavarría

Noviembre 27 de 2013

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN

TABLA DE CONTENIDO

1. TEMA.....	2
2. PROBLEMA.....	2
3. OBJETIVOS.....	3
3.1 OBJETIVO GENERAL	3
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
4. MARCO TEÓRICO	3
5. ANTECEDENTES.....	4
6. METODOLOGÍA	6
7. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	8
BIBLIOGRAFÍA	9

1. TEMA

Las vigas de madera laminada GLULAM son uno de los elementos más utilizados en las estructuras de madera de varios pisos. Por esta razón, resulta de vital importancia comprender su comportamiento frente a las cargas actuantes para posteriormente generar nuevos métodos de diseño y de construcción seguros y económicos.

Con esta investigación, se pretende determinar la distribución de esfuerzos en vigas de madera laminada GLULAM por medio de un análisis teórico y una validación experimental. Se evalúa el incremento en la resistencia y el aumento de la rigidez de las secciones de madera GLULAM con el uso de platinas metálicas dentadas.

La mejora de las propiedades mecánicas de las vigas se puede reflejar en una disminución de la sección de los elementos GLULAM y, como consecuencia de esto, en un menor peso de la estructura. Además, se puede presentar simultáneamente un aumento en la ductilidad del elemento disminuyendo así la posibilidad de que se presenten fallas frágiles.

Se estudiará entonces un sistema viable y competitivo en aspectos económicos (disminución de sección y peso de la estructura) y se aumentará a su vez el factor de seguridad de la estructura (aumento en la ductilidad y eliminación de rupturas prematuras).

2. PROBLEMA

¿Cómo estimar mediante un modelo teórico las distribuciones de esfuerzos en las vigas de madera laminada GLULAM reforzadas con platinas metálicas dentadas?

¿Cómo determinar los esfuerzos de flexión generados en las vigas de madera laminada GLULAM mediante ensayos?

¿Cómo estimar el incremento de la resistencia a flexión de las vigas de madera laminada GLULAM reforzadas con platinas metálicas dentadas?

¿Cómo determinar el modo de ruptura por flexión predominante en elementos de madera laminada GLULAM reforzada con platinas metálicas dentadas?

La madera laminada GLULAM es un material versátil que, gracias a su eficiente proceso de fabricación, permite la obtención de elementos que no están limitados en cuanto a su sección transversal, longitud o forma. De esta manera,

se logran estructuras estéticamente agradables y con diversos usos arquitectónicos.

Su uso como material estructural puede ser potencializado si se logra mejorar el comportamiento mecánico de los principales elementos estructurales que la componen. Por lo anterior, se hace indispensable el desarrollo de métodos y procesos viables, tanto económicamente como a nivel de seguridad, que conlleven al aumento de la capacidad resistente de los elementos GLULAM.

Las mejoras en el comportamiento mecánico de las vigas de madera laminada GLULAM representan una oportunidad para obtener un mejor uso de la madera como materia prima del sector de la construcción.

Valerse de los recursos naturales renovables como la madera, para procesarla mediante nuevas y mejores técnicas, genera oportunidades de desarrollo empresarial que protegen la estabilidad del ecosistema, constituyendo un elemento dinamizador del desarrollo sostenible.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar las distribuciones de esfuerzos en vigas de madera laminada GLULAM reforzadas con platinas metálicas dentadas.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Valorar las tensiones generadas en vigas de madera laminada GLULAM mediante ensayos de flexión.
- Estimar el incremento en la resistencia aportada por el refuerzo.
- Establecer el modo de ruptura por flexión predominante en elementos de madera laminada GLULAM reforzada con platinas metálicas dentadas.

4. MARCO TEÓRICO

Debido a su versatilidad y a las facilidades que muestra en cuanto a tamaño y forma de sus elementos, la madera laminada GLULAM presenta una gran ventaja frente a otros materiales estructurales. Desde hace ya varias décadas, se viene utilizando en la construcción para desarrollar diferentes tipos de estructuras y acabados. Sin embargo, la búsqueda de nuevos materiales, cada vez más eficientes, y el uso óptimo de estos ha llevado a la necesidad de mejorar las propiedades mecánicas de los elementos estructurales. Se

pretende generar así un avance en cuanto al uso intensivo de dicho material en la construcción.

Las estructuras de madera usan frecuentemente refuerzos metálicos, fibra de vidrio, fibra de carbono, bambú y otras fibras naturales para aumentar su capacidad resistente. Dadas las características de la unión entre la madera y el refuerzo, se puede decir que la sección de GLULAM reforzada es una sección perfectamente solidaria con un incremento considerable en la resistencia y ductilidad del elemento tratado. La posible disminución de las dimensiones de los elementos y el aumento de sus propiedades mecánicas en cuanto a resistencia, rigidez y ductilidad; son dos de los principales aspectos obtenidos mediante el reforzamiento con platinas metálicas dentadas.

5. ANTECEDENTES

En el país existen diversas empresas que desde hace varios años vienen desarrollando estructuras con vigas GLULAM, entre estas se puede mencionar la empresa “Técnica y Arquitectura”.

Cabe destacar que a nivel internacional existe una gran cantidad de empresas dedicadas al diseño, instalación y estudio de este material, normas que rigen su uso y diversas investigaciones tendientes a mejorar su calidad.

A continuación se presenta un breve resumen del estado actual del conocimiento en el área de las estructuras de madera reforzadas:

Rehabilitación de estructuras de madera mediante el uso de refuerzos:

Humphreys [2] reforzó los durmientes de un puente vehicular deteriorado mediante el uso de láminas de fibra de carbono adheridas con un pegante epóxico y posteriormente los llevó hasta la falla mediante el ensayo de flexión de tres puntos. Se observa claramente el aumento de la capacidad de carga de los elementos. Sin embargo, el modo de falla predominante fue la falla frágil debido a la deslaminación de las láminas de fibra de carbono.

Reza [3] utilizó fibra de vidrio para rehabilitar las pilas de un puente ferroviario, realizando pruebas estáticas y dinámicas. Además, introdujo dos métodos de aplicación de refuerzo de fibra de vidrio sobre las cuerdas de madera del puente evaluándolas mediante pruebas de flexión en una configuración de cuatro puntos.

Schober [4] presentó un estudio de las técnicas de restauración y reforzamiento de pisos de madera sometidos a cargas de flexión, mediante el uso de fibras de carbono.

López [5] usó paneles de madera laminada reforzada con fibra de vidrio para reemplazar la cubierta de un puente de carretera ubicado en Unión Washington, Maine. Se evidenciaron claramente las ventajas y la viabilidad económica del compuesto frente al uso de otros materiales. Se mostró la posibilidad del reemplazo total del puente.

Vigas de madera reforzadas con fibras de vidrio y carbono:

Fiorelli [6] realizó un análisis experimental de vigas de madera reforzadas con fibras de vidrio o carbono. El modelo teórico empleado para calcular la resistencia a flexión de las vigas tiene en cuenta la resistencia a tracción y la falla por compresión de los elementos reforzados. Consideró un modelo de tracción elástica frágil y de compresión elásto-plástica. La validez del modelo se comprueba mediante la comparación con resultados experimentales.

Conexiones de madera reforzados con platinas metálicas dentadas:

Echavarría [1] realizó un análisis de las conexiones de madera pernadas con el uso de platinas dentadas de acero. Este refuerzo actúa como mecanismo para atender el exceso de tracción perpendicular y mejorar el comportamiento de la conexión. Una de las ventajas de esta técnica de refuerzo es que no se requiere el uso de pegantes y el elemento estará listo para usarse inmediatamente después de que hayan sido instaladas las platinas sobre la superficie de madera. El refuerzo con las platinas dentadas aumenta la resistencia de la conexión. Las platinas dentadas de acero representan una solución efectiva porque son elementos de bajo costo y de fácil instalación.

Vigas de madera laminada GLULAM reforzadas con fibra de vidrio o bambú:

Se considera que la madera laminada reforzada puede presentar ventajas sobre la madera laminada sin reforzar (Bragdon [7]). Se ha demostrado que cuantías de refuerzo GFRP (refuerzo de fibra de vidrio) del orden del 3% pueden incrementar la resistencia a flexión de vigas de madera laminada en más del 100% y su rigidez entre un 10% y un 15% (Bragdon [7]).

Investigaciones han demostrado que al igual que las vigas de madera laminada, los paneles de madera laminada presentan mejoras al reforzarse con GFRP (Bragdon [7]). Sin embargo, se sabe que la durabilidad de los elementos reforzados con fibra de vidrio frente al medio ambiente es un tema que se encuentra todavía en desarrollo, ya que esta característica depende de un gran número de factores que hacen que su estudio sea bastante complejo (Bragdon [7]).

Echavarría [8] realizó un estudio experimental para determinar el comportamiento mecánico de vigas de madera laminada GLULAM reforzadas con fibra de vidrio o bambú. El refuerzo se propone con el fin de mejorar la resistencia en flexión y la ductilidad de las vigas de madera laminada. La viga

se refuerza en la zona traccionada y en las caras laterales con los refuerzos de fibra de vidrio o de bambú. Los refuerzos generan un aumento considerable de resistencia.

Se hace claro que el reforzamiento de las vigas de madera laminada GLULAM puede presentar ciertas ventajas.

La finalidad de este proyecto es entonces profundizar en el estudio de las vigas GLULAM reforzadas con platinas metálicas dentadas. De esta manera, se contribuye al desarrollo de este elemento con el fin de impulsar su uso intensivo como material de construcción.

6. METODOLOGÍA

Inicialmente, se realizarán ensayos para determinar las propiedades mecánicas de las vigas de madera laminada GLULAM sin refuerzo.

Posteriormente, se elaborarán modelos a escala real en madera laminada con refuerzos de platinas metálicas dentadas.

Para la parte experimental, los apoyos se colocarán a 1.7 m de separación entre ejes, las vigas tienen una longitud total de 2 m. Las cargas se aplicarán simétricamente en los tercios de la luz.

Las vigas se deformarán a velocidad constante y se registrarán datos carga-deformación hasta que se produzca la rotura.

Se usarán diferentes configuraciones para así determinar las propiedades mecánicas de las vigas GLULAM con refuerzo.

Después de realizados los ensayos y los cálculos pertinentes, se compararán los resultados para determinar cuál configuración de refuerzo genera resistencias adecuadas.

En este proyecto, en la parte experimental, se empleará una madera de densidad intermedia y se usarán platinas metálicas dentadas.

A continuación, presentaremos las etapas principales de este estudio:

Estudio teórico:

- Evaluación con un modelo teórico simplificado o con el método de elementos finitos de las distribuciones de esfuerzos en vigas formadas por planchas de madera.
- Valoración de los esfuerzos máximos en las secciones GLULAM sin reforzar y reforzadas.

Estudio experimental:

- Estimación de la resistencia de la madera en tracción perpendicular a las fibras (ensayo según norma ASTM D143-94 [9]).
- Estimación de la resistencia de la madera en cizalladura (ensayo según norma ASTM D143-94 [9]).
- Determinación de la humedad de las vigas según la norma ISO 3131.
- Determinación de la densidad de la madera según la norma ISO 3130.
- Determinación de los esfuerzos por medio del ensayo a flexión para vigas GLULAM sin reforzar y reforzadas.
- Determinación de la capacidad resistente de una viga GLULAM en flexión (norma ASTM C 1018 (1992) [9]).

Cada ensayo estará acompañado de las evaluaciones de humedad y densidad para las piezas de madera.

Estudio teórico vs Estudio experimental:

- Comparación de resultados según los modelos teórico y experimental.
- Optimización de las vigas GLULAM reforzadas.

Informe final:

La última etapa de trabajo consiste en la preparación y presentación de un informe que recopile los principales resultados obtenidos. Igualmente, esta investigación apoyará a los cursos de pregrado y postgrado de la Facultad de Arquitectura en el área de compuestos y madera.

7. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Descripción	Mes inicial	Duración en meses
Revisión bibliográfica	1	3
Compra de materiales y suministros	1	5
Comportamiento mecánico de las vigas GLULAM	2	4
Vigas GLULAM reforzadas con platinas metálicas dentadas	4	4
Determinación teórica y experimental de los modos de ruptura de las vigas GLULAM	4	7
Optimización de las vigas GLULAM reforzadas	4	7
Preparación de informe final	10	2
Entrega de compromisos del proyecto	11	1

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ECHAVARRÍA, César, CORREA, Camilo, ECHEVERRI, Carlos.
Dowel-type timber joints reinforced with steel nail plates. *Dyna*, Año 77, 164, pp. 98-108, 2010.
- [2] HUMPHREYS, M.F.
An investigation into the rehabilitation of timber structures with fiber composite materials.
Queensland University of Technology, Brisbane, Australia, 2004.
- [3] REZA, Sadat Abhari.
Rehabilitation of timber rail road bridges using glass fiber reinforced polymer composite.
West Virginia University, Morgantown, West Virginia, 2007.
- [4] SCHÖBER, K.U. RAUTENSTRAUCH, K.
Experimental investigation of flexural strengthening of timber structures with CFRP.
Proceeding of the international Symposium on Bond Behavior of FRP in structures.
Weimar, Germany, 2005.
- [5] LOPEZ, Roberto.
FRP-Glulam Panels for Highway Bridge Deck Replacement.
Advanced Engineered Wood Composites Center, Univ. of Maine, Orono, 2000.
- [6] FIORELLI, Juliano. ALVES, Antonio.
Analysis of the strength and stiffness of timber beams reinforced with carbon fiber and glass fiber.
Materials Research, Vol. 6 N° 2 (2003), 193-202.
- [7] BRAGDON, Melanie Marie.
Behavior and design of FRP reinforced longitudinal glulam deck bridges.
B.S. University of Maine, 2002.
- [8] ECHAVARRÍA, César., JIMÉNEZ, Laura., OCHOA, Juan.
Bamboo-reinforced glulam beams: an alternative to fiberglass-reinforced glulam beams.
Dyna, Año 79, 174, pp. 24-30, 2012.
- [9] ASTM, American Society for Testing and Materials.
Standard test methods for evaluating dowel bearing strength of wood and wood-based products.
Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, PA. 2003. D5652.
- [10] BLASS, H.J., SCHMID, M., LITZE, H., WAGNER, B.
Nail plate reinforced joints with dowel-type fasteners. Proceedings of World Conference on Timber Engineering, Whistler, British Columbia, Canada, 2000.