

Efecto del bambú laminado como refuerzo de vigas laminadas de Pino Radiata



Abstract

This study deals with the analysis of the effect of Guadua bamboo laminate use as reinforcement in laminated beams of Radiata Pine when they are subjected to loads perpendicular to the axis in order to compare the results obtained with beams made of Radiata pine without reinforcement. For this was studied the mechanical behavior of 10 reinforced beams and 10 beams without reinforcement. The reinforced beams were made of Radiata pine and bamboo Guadua reinforcement. The reinforcement was placed in the bottom of the beams.

An exploratory analysis of the physical-mechanical properties of Guadua bamboo was conducted. The bamboo samples were taken of the same stock of bamboo used as reinforcement of the beams.

As a result of this research was obtained an experimental capacity in bending for beams reinforced with bamboo of 569.21 kg-m. For non-reinforced beams was obtained an experimental capacity of 563.39 kg-m.

These results showed that the reinforcement provided by Guadua bamboo sheeting capacity increased.

Keywords:

PINUS RADIATA; BAMBOO GUADUA ;
LAMINATED WOOD BEAMS;

Resumen

Este trabajo trata sobre el estudio teórico y experimental de vigas de madera laminadas reforzadas con bambú cuando estas se encuentran sometidas a cargas perpendiculares a su eje con el fin de comparar los resultados obtenidos con vigas de madera laminada sin refuerzo.

Para esto se estudió el comportamiento mecánico de 10 vigas reforzadas y 10 vigas sin refuerzo. Las vigas reforzadas estaban compuestas de Pino Radiata y el refuerzo de bambú Guadua. El refuerzo fue colocado en la parte inferior de las vigas. Las vigas sin refuerzo eran de madera laminada de Pino Radiata.

Los ensayos de las vigas se realizaron en el Centro de Investigación en Integración Bosque Industria (CIIBI) del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Como resultado de esta investigación se obtuvo una capacidad experimental promedio en flexión de las vigas reforzadas con bambú de 569.21 kg-m. Para las vigas sin refuerzo se obtuvo que una resistencia experimental promedio de 563.39 kg-m.

Con estos resultados se concluyó que el refuerzo proporcionado con láminas de bambú Guadua en promedio aumenta levemente la capacidad en flexión de una viga de madera de Pino Radiata.

Palabras clave:

PINO RADIATA; BAMBÚ GUADUA; VIGAS
LAMINADAS

Efecto del bambú laminado como refuerzo de vigas laminadas de Pino Radiata

DANNY CHACÓN RAMÍREZ

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Enero de 2012

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

PREFACIO.....	1
RESUMEN EJECUTIVO.....	3
¿QUÉ ES EL BAMBÚ?.....	5
EL BAMBÚ EN COSTA RICA.....	5
PRODUCCIÓN EN COSTA RICA.....	5
GENERALIDADES DEL BAMBÚ.....	6
GENERALIDADES DE LA MADERA.....	18
PINO RADIATA.....	21
MADERA LAMINADA.....	22
INTRODUCCIÓN.....	24
METODOLOGÍA.....	26
RESULTADOS.....	45
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	67
CONCLUSIONES.....	74
RECOMENDACIONES.....	76
APENDICES.....	75
REFERENCIAS.....	78

Prefacio

El estado del conocimiento acerca del Bambú Guadua desde el punto de vista físico-mecánico es amplio y ejemplo de esto son las investigaciones realizadas en el país.

En 1990 el Laboratorio de Productos Forestales de la Universidad de Costa Rica publicó un artículo producto de una amplia investigación realizada por el ingeniero Jaime Sotela, donde se determinaron las características físicas y mecánicas para el Bambú Guadua de dos de las principales zonas de producción de esta especie en Costa Rica.

Producto de esta investigación se creó un manual de ensayos físico-mecánicos para bambú que posteriormente fue pilar en la creación de las normas internacionales conocidas como normas ISO que estandarizan los métodos para la determinación de las propiedades físicas y mecánicas del bambú.

Sin embargo, hoy en Costa Rica el uso del bambú es muy limitado, aún cuando se posee información confiable del material. Similar cuando pensamos en la madera, un material extensivamente utilizado a nivel mundial, pero en nuestro país apenas comienza a tomar fuerza como verdadero material estructural. La madera como material constructivo es muy utilizado pero su uso es muy restringido en el área estructural. Principalmente la madera se utiliza para obra falsa como andamios, tarimas, rampas y encofrados.

En otros países, por ejemplo Colombia, se construyen gran cantidad de obras utilizando un material ecológico como lo es el bambú. Casas, muros y hasta puentes fabricados con bambú son ejemplo del uso de este material que se le ha dado el calificativo de “acero verde”.

El bambú, es un material lignocelulósico cuya resistencia a la tensión es más de 3 veces la resistencia de la madera. Por su característica de rajarse o abrir sus fibras (principal debilidad desde el punto de vista estructural) se ha pensado que esto se puede solventar mediante el uso combinado de elementos de madera aserrada y

formar así elementos tipo vigas reforzadas con láminas de bambú (función análoga a la del acero en una viga de concreto reforzado).

Estas vigas representan una solución factible como remplazo de materiales tradicionales como el acero en algunos elementos como lo son vigas de entrepiso. Arquitectónicamente son de gran belleza lo que hace factible su uso por sectores económicos de nivel medio.

Estas consideraciones crean la necesidad de un mayor conocimiento sobre el comportamiento estructural de estos elementos.

Para probar la viabilidad de esta hipótesis se debe llevar a cabo más investigación. Un caso particular es este estudio cuyo objetivo general es estudiar el comportamiento estructural de vigas de madera laminada de Pino Radiata reforzadas con láminas de bambú Guadua.

Específicamente se pretendió:

- Investigar bibliográficamente sobre las propiedades físicas, mecánicas del bambú Guadua y las características propias del material que afectan su comportamiento.
- Recoger información sobre las propiedades físicas, mecánicas del Pino Radiata.
- Caracterizar el bambú a utilizar como refuerzo mediante ensayos físicos y mecánicos siguiendo la norma ISO/TR 22157-2.
- Realizar un desarrollo teórico para las vigas con y sin refuerzo utilizando la teoría elástica de vigas.
- Llevar a cabo ensayos de flexión de vigas de madera laminada

con y sin refuerzo siguiendo la norma ASTM D-198.

- Calcular y determinar, para cada espécimen y con base en los resultados experimentales, la deflexión máxima, el tipo de falla y la carga máxima soportada.
- Comparar el desarrollo teórico con los resultados experimentales.

Deseo expresar mi agradecimiento a la Ing. Sonia Vargas Calderón por todo el apoyo y tiempo dedicado a la elaboración de este trabajo, que sin su ayuda no hubiese sido posible. Al Ing. Adrian Chaverri Coto por sus recomendaciones y acertados comentarios.

Al personal técnico del Centro de Investigación en Vivienda y Construcción (CIVCO) del Instituto Tecnológico de Costa Rica por la ayuda brindada durante los ensayos y pruebas realizadas al bambú.

A el Centro de Investigaciones en Integración Bosque-Industria (CIIBI) del Instituto Tecnológico de Costa Rica por permitir realizar los ensayos de flexión en sus instalaciones.

Resumen ejecutivo

El objetivo general de este trabajo fue establecer la factibilidad del uso de láminas de bambú Guadua como refuerzo en vigas de madera de Pino Radiata mediante el estudio del comportamiento carga-deflexión bajo carga estática de tres puntos.

La metodología utilizada en este trabajo para lograr lo anterior fue:

1-Revision bibliográfica y consultas a expertos.

2-Preparación del Bambú Guadua para su caracterización.

3-Elaboración de vigas con y sin refuerzo. Registro de defectos.

4-Modos de falla teóricos:

-Capacidad teórica de las vigas en Flexión.

-Capacidad teórica de las vigas en Cortante.

-Deflexión elástica teórica máxima en el centro del claro

5-Marco experimental:

-Caracterización del bambú mediante ensayos físico-mecánicos.

-Falla en flexión de vigas de madera reforzadas con bambú

-Falla en flexión de vigas de madera

Un amplio estudio bibliográfico se llevo a cabo, cual permitió profundizar sobre el comportamiento mecánico esperado de la

madera de Pino Radiata y especialmente del bambú Guadua. Se consultaron varios estudios experimentales de las propiedades físico - mecánicas para el bambú Guadua, se logró tener una percepción del comportamiento esperado para este material.

Arce¹ reporta un esfuerzo último en tensión para muestras con nudo de 814 kg / cm², para muestras sin nudo reporta un esfuerzo ultimo de 2758.21 kg / cm². También reporta valores experimentales para el módulo de elasticidad en tensión. Sin presencia de nudos reporta 188 580 kg / cm² y para muestras con nudo 74 525 kg / cm².

Sotela² reporta un esfuerzo en compresión promedio para muestras con nudo de 425 kg / cm² y para muestras sin nudo de 417 kg / cm².

Para determinar la resistencia teórica de las vigas con y sin refuerzo se utilizó en el caso del Pino Radiata un esfuerzo último en flexión de 755.30 kg / cm² y un módulo de elasticidad de 87 800.50 kg / cm². Estos datos fueron presentados por Tuck³.

El bambú se puede comparar a un tubo vacío de espesor determinado y a su vez variable según su posición su en la caña. Estos "tubos" se procesaron para obtener láminas con

¹ Arce, O. 1993. **Fundamentals of the design of bamboo structures**. Eindhoven: Faculteit Bouwkunde, Technische Universiteit Eindhoven.

² Sotela Motero, J. 1990. **Determinación de propiedades físicas y mecánicas del bambú de la especie guadua de dos zonas de Costa Rica**. Informe final para el proyecto Nacional de Bambú. Universidad de Costa Rica. Laboratorio de Productos Forestales, Laboratorio de Materiales y Modelos Estructurales. 65pp

³ Tuk Duran, J. 2007. **Madera: Diseño y construcción**. Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica.

dimensiones de 7.25 mm x 25 mm en promedio y con longitud variable. Estas láminas se usaron para la caracterización del bambú y como refuerzo para las vigas de madera.

Se realizó un muestreo exploratorio y se realizaron ensayos físico – mecánicos sobre muestras extraídas del lote de bambú Guadua utilizado como refuerzo en las vigas con el fin de caracterizarlo. Se ensayaron 15 probetas para la determinación de la densidad y contenido de humedad, 15 probetas sin nudo en compresión, 5 probetas con nudo en compresión, 17 probetas a tensión con nudo y 7 probetas a tensión sin nudo. Las pruebas de laboratorio se basaron en la norma internacional ISO/TR 22157.2.2003 “Bamboo-determination of physical and mechanical properties”.

Como resultado de este muestreo se obtuvo que el bambú tenía una densidad promedio de 636.64 kg / m³. Con un contenido de humedad entre 11.76% y 13.62%.

Se obtuvo una resistencia a la compresión con nudo promedio 269.77 kg / cm². La resistencia a la compresión sin nudo promedio fue de 389.90 kg / cm².

La resistencia a la tensión paralela a la fibra con nudo promedio de 1000.08 kg / cm² con un modulo de elasticidad de 125 965 kg/cm². En el caso de las probetas sin nudo se obtuvo un esfuerzo ultimo promedio de 1513.47 kg / cm².

Al comparar estos resultados con los obtenidos por Arce¹ y por Sotela², se verifica que no se obtuvieron valores similares de resistencia a la tensión y a la compresión. Esta diferencia de resultados se debió a la naturaleza biológica del material y a la dificultad que se encontró al ejecutar los ensayos mecánicos.

Los ensayos de flexión estática se realizaron en el Centro de Investigaciones en Integración Bosque-Industria (CIIBI) adjunto a la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

El montaje experimental fue basado en la norma ASTM-D198 “Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes”. Se abarco solo la parte referente a flexión estática ubicada entre las secciones 4 y 11 de la norma.

Todas las vigas reforzadas estaban compuestas de Pino Radiata y el refuerzo de bambú Guadua. El refuerzo fue colocado en la parte inferior de las vigas.

Se estudio el comportamiento mecánico de 10 vigas reforzadas y 10 vigas sin refuerzo.

Previamente se realizó un registro completo de los defectos en las vigas. Principalmente la ubicación de nudos en la madera y en el refuerzo.

Estas tenían una sección transversal de 12.8 cm de peralte con 4 cm de ancho. En el caso de las vigas reforzadas los 12.8 cm de peralte estaban compuestos de 12 cm de madera y 0.8 cm de bambú. La longitud en ambos casos fue de 155 cm.

Como resultado principal de esta investigación se obtuvo una capacidad experimental en flexión para las vigas reforzadas con bambú de 569.21 kg-m. Para las vigas sin refuerzo se obtuvo una resistencia experimental promedio de 563.39 kg-m.

Los resultados experimentales muestran que, aunque el refuerzo proporcionado con láminas de bambú Guadua aumentó la capacidad en flexión en comparación con una viga sin refuerzo, éste no fue significativo.

Se realizó un análisis teórico mediante la teoría elástica de vigas con el fin de determinar analíticamente la resistencia esperada de los especímenes. Se analizaron dos modos de falla teóricos de las vigas. El primer modo se denominó “Modo de falla a flexión” y consistió en calcular teóricamente el momento que podía resistir la sección.

Para las vigas sin refuerzo se obtuvo una resistencia de 837.15 kg-m y en el caso de las vigas reforzadas una resistencia de 825 kg-m.

Como el ensayo consiste en cargar el espécimen en dos puntos ubicados en los tercios medios, la carga máxima teórica P que se puede aplicar fue de 3348.60 kg y 3300 kg respectivamente.

El segundo modo se denominó “Modo de falla en cortante” y consistió en determinar la máxima carga que podía aplicar la máquina de ensayos sin superar la resistencia al corte de la viga. Se estimó que para las vigas reforzadas la máxima carga que se podía aplicar era igual a 7129.40 kg y para las vigas sin refuerzo 7038.29 kg. Comparando las cargas máximas teóricas se dedujo que las vigas eran controladas por la flexión.

Finalmente se pudo apreciar que tanto teóricamente como experimentalmente se obtuvo un leve aumento de la capacidad de las vigas reforzadas en comparación con las vigas sin refuerzo.

Marco teórico

¿Qué es el bambú?

El origen etimológico de la palabra bambú es un misterio para los etimologistas. Se conoce sin embargo, que algunas tribus antiguas lo llamaban mambu, bambos o bambús.

Bajo un enfoque botánico, la especie *Bambú*, se encuentra clasificada dentro de la familia *Bambusoideae*, perteneciente a las *Poaceae* (posee entre 800 y 1000 especies dentro de 80 a 90 géneros).

*El Bambú es una hierba gigante que se clasifica botánicamente en la familia Poaceae, las que anteriormente se denominaban Gramineae*⁴.

*Es importante señalar que aunque muchas veces se le percibe como un árbol maderable, esta planta en realidad es una hierba, que con sus altas tasas de crecimiento manifiesta muchas ventajas para su producción y aprovechamiento*⁴.

Esta hierba gigante ha sido tradicionalmente relacionada al mundo oriental; específicamente se liga a la cultura china, indú, japonesa y otros países de Asia, en donde el bambú ha formado parte del estilo de vida de estas sociedades. El bambú ha favorecido los medios de vida de la población asiática por muchas generaciones, en usos tales como medicina, alimento, vivienda, complemento para agricultura, instrumentos de arte, ceremonias, entre otros.

El bambú en Costa Rica

Costa Rica es el país con más diversidad de especies de bambú en Centro América, posee 8 géneros y 39 especies reportadas. El 50% de las

⁴ Londoño, X. 2001. **La Guadua, un bambú importante de América.** Revista PROCANA, 56:10-14.

*especies fueron registradas en los últimos 20 años*⁵.

Se han dado diferentes momentos para el bambú en el país; primero la introducción del uso del bambú para apuntalar banano (soporte para la planta) por las empresas bananeras (DOLE) hace más de 50 años. Posteriormente el impulso de la Misión Técnica de Taiwán para capacitar artesanos o transformadores de bambú durante los últimos 20 años (desde 1983).

Igualmente desde 1988 hasta 1998 se realizó un proyecto del gobierno de Costa Rica que impulsaba la vivienda alternativa de bambú, por medio de Funbambú. También se encuentran otros esfuerzos puntuales como son las investigaciones sobre su propagación realizados por la Universidad de Costa Rica; conservación de suelos por el MAG; artesanías por el servicio de voluntarios japoneses y otras experiencias.

Según Morales⁶ *el bambú es usado como material de construcción, cercas, conservación, paisaje y herramientas dentro de las fincas; mientras que fuera de estas es vendido para usos similares, así como también para la pequeña industria de bambú.* La distribución del bambú en Costa Rica muestra productores e instituciones con diferentes tamaños de plantaciones que van desde pocos metros cuadrados hasta 800 ha.

Producción en Costa Rica

El Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) desarrolló en el año 2003 un

⁵ Montiel, M. Murillo, L.1998. **Historia ecológica y aprovechamiento del bambú.** Revista Biología Tropical, 46(3):11-18.

⁶ Morales, D. 2002. **Análisis de la población y productores de bambú en Costa Rica.** CATIE, Turrialba, Costa Rica. 33 p.

estudio titulado “Análisis de la Cadena Productiva del Bambú en Costa Rica”, cuyo objetivo fue el estudio de la producción de bambú en el país.

Este expone adecuadamente el comportamiento de la cadena productiva del bambú en el país. Posiblemente las variaciones de los datos presentados en este estudio a la fecha no son significativas.

Los resultados de este estudio establecen una superficie de bambú en Costa Rica de aproximadamente 1.345 ha, con cinco especies comerciales: *Bambusa vulgaris*, *Bambusa tuldooides*, *Guadua angustifolia*, *Phyllostachys aurea* y *Dendrocalamus giganteus*.

En el Cuadro 1 se puede observar la distribución de área sembrada de bambú por provincia en Costa Rica.

Provincia	Número de Productores	Área plantada (ha)
Alajuela	15	108.1
Cartago	10	8.9
Guanacaste	0	0
Heredia	10	802.9
Limón	25	247.3
Puntarenas	21	75.5
San José	24	102.9
Total	105	1345.6

Fuente: Morales, 2002 (4).

De las especies plantadas, se identificó que los géneros *Bambusa*, *Bambusa vulgaris* y *Bambusa tuldooides*, dominan el 71% del área plantada.

Seguidamente se encuentra *Guadua angustifolia* con el 22% y, finalmente, *Dendrocalamus giganteus* y *Phyllostachys aurea* con el 3% cada una respectivamente (Cuadro 2).

Especie	Área (ha)	Porcentaje (%)
<i>Guadua angustifolia</i>	302.26	22.5
<i>Bambusa vulgaris</i>	555.63	41.3
<i>Bambusa tuldooides</i>	400.09	30
<i>Phyllostachys aurea</i>	43.4	3.1
<i>Dendrocalamus giganteus</i>	42.6	3
Total	1345	100

Fuente: Morales, 2002 (4).

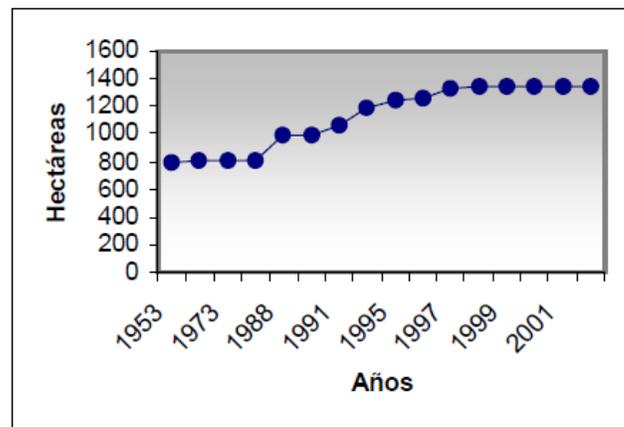


Figura 1. Tendencia del área plantada de bambú en Costa Rica.

Fuente: Morales, 2002 (4).

Generalidades del bambú

En este apartado se presenta información de algunos aspectos interesantes del bambú como lo son la composición, tipos, cultivo, botánica, silvicultura, métodos de preservación. Información que nos permite comprender de mejor manera al bambú como material de construcción.

Composición biológica

El bambú está compuesto por celulosa, hemicelulosa y lignina.

La celulosa es un carbohidrato que forma parte fundamental de todas las plantas. El polímero de la celulosa se construye a partir de moléculas monómeras ($C_6 H_{10} O_5$). Es el principal responsable de las propiedades mecánicas del bambú. La resistencia a la tensión de la celulosa ha sido estimada en 8000 kg/cm^2 . Sin embargo, en la práctica, la falla ocurre por deslizamiento. En este caso la resistencia desciende a 1500 kg/cm^2 .

La lignina es un polímero de fenilpropano que en su forma más simple se presenta como ($C_6 H_5 CH_3 CH_2 CH_3$) n. Se conoce que proporciona rigidez al tallo. Hace posible su crecimiento y mejora su capacidad de duración ante ciertos microorganismos. El módulo de elasticidad es de aproximadamente 18354.90 kg/cm^2 con una relación de Poisson es de aproximadamente 0.3.

En términos generales el bambú está compuesto de: 55% de celulosa, 25% de lignina, y 20% de hemicelulosa y otros⁷.

La planta

Estructuralmente el bambú está constituido por un sistema de ejes vegetativos segmentados, que forman alternadamente nudos y entrenudos, que varían en su morfología según correspondan al rizoma, al tallo o a las ramas. *Tanto los nudos como los entrenudos varían de una especie a otra, particularmente en los tallos, facilitándose por este medio su clasificación⁸.*

⁷ Shedden J. 1988. **Estudio experimental en vigas de concreto reforzadas con bambú.** Informe final para obtener el grado de licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica.

⁸ Hidalgo, O. 1974. **Bambú: cultivo y aplicaciones en fabricación de papel, construcción, arquitectura, ingeniería y artesanías.** ITALGRAF, Cali, Colombia. 318 p.



Figura 2. Nudos y entrenudos en el bambú

Fuente: Janssen, 2000 (11).

El rizoma

El rizoma tiene una gran importancia, no solo como órgano, en el cual se almacenan los nutrientes que luego distribuye a las diversas partes de la planta, sino como un elemento básico para la propagación del bambú, la cual se efectúa asexualmente por ramificación de los rizomas⁸.

Los bambúes del tipo paquimorfo se distinguen porque sus tallos aéreos se desarrollan en el espacio en forma aglutinada, formando manchas; en cambio los del tipo leptomorfo, los tallos se presentan en forma aislada o difusa. En los bambúes del tipo anfipodial, o intermedio, los rizomas presentan una ramificación combinada de los dos grupos principales.

- **Grupo Paquimorfo:** Genero típico, Guadua. Los bambúes de este grupo corresponden en su mayoría a especies tropicales. Sus rizomas se denomina paquimorfos por ser cortos y gruesos, con entrenudos asimétricos.
- **Grupo leptomorfo:** Los bambúes de este grupo son resistentes a temperaturas heladas y se desarrollan mejor en climas con inviernos no extremadamente fríos. Sus rizomas tienen forma cilíndrica o casi cilíndrica. Los rizomas se ramifican lateral o monopodialmente recorriendo considerables distancias, formando un sistema de redes entretejidas.



Figura 3. Rizoma paquimorfo.
Fuente: Hidalgo, 1974 (1).

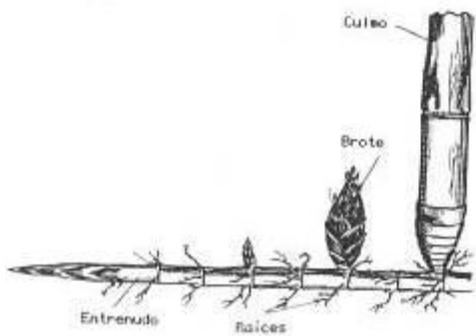


Figura 4. Rizoma leptomorfo.
Fuente: Hidalgo, 1974 (1).

El tallo

Los tallos de bambú se caracterizan por tener forma cilíndrica y entrenudos huecos, separados transversalmente por tabiques o nudos que le confieren mayor rigidez, flexibilidad y resistencia. Los tallos difieren, según la especie, en altura, diámetro y forma de crecimiento.

El tallo se origina en las especies del grupo Paquimorfo en el ápice del rizoma, y en las del grupo Leptomorfo, en una de las yemas laterales del rizoma.

Debido a su tejido delicado, el tallo está protegido con brácteas u hojas de forma triangular que lo cubren, las cuales se forman en cada uno de los nudos que se van formando.

Una vez que el bambú brota del suelo, lo hace con el máximo diámetro que tendrá de por vida es decir, este no aumentará y por el contrario disminuirá proporcionalmente con la altura⁸.

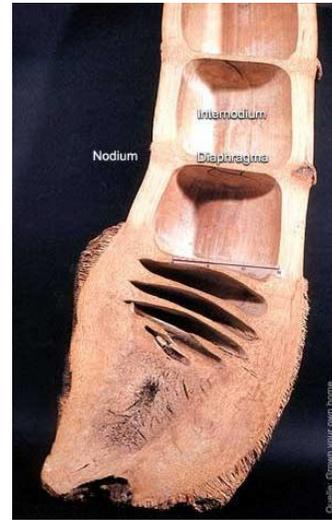


Figura 5. Corte longitudinal de un brote de bambú.
Fuente: Janssen, 2000 (11).

Un detalle interesante que se presenta en el crecimiento inicial del bambú, es que al hacer un corte longitudinal de un cogollo (Figura 5), se observa como si el tallo estuviera comprimido con sus nudos y entrenudos. Posteriormente el crecimiento se manifiesta por la elongación completa y sucesiva de los entrenudos.

Brácteas del culmo y ramas

Las brácteas son hojas modificadas que se caracterizan por su fuerte consistencia coriácea, de forma triangular, y protegen las yemas. Se encuentran en el rizoma, en el tallo durante los primeros estadios del desarrollo y en las ramificaciones de la panta donde existen nudos con yemas. Su dimensión es variable según la edad y la parte de la planta donde se desarrollen.

Ramas

La disposición o filotaxis de las ramas a través del culmo es alterna. La rama principal se desarrolla desde una yema individual en el nudo o yema nodal, el desarrollo de las ramas inferiores siempre varía. Los grupos de nudos cercanos a la base de las ramas contienen yemas inactivas o que pueden producir una o dos ramas secundarias, donde las ramas más bajas siempre producen espinas, mientras que las

superiores podrían tenerlas o no. La rama principal puede producir una gran espina o puede emitir nuevas ramificaciones, y producir de una a cuatro espinas adicionales en la base.

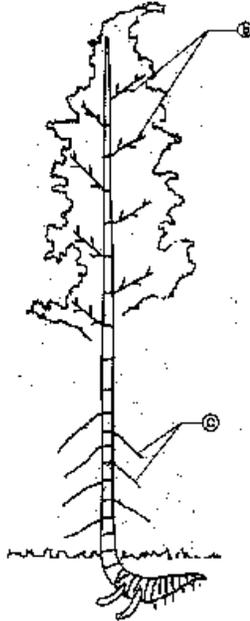


Figura 6. Posición de las ramas en el tallo: superiores e inferiores.
Fuente: Hidalgo, 1974 (1).

Hojas

Las hojas en las ramas son alternas, una en cada nudo, son persistentes tanto en las ramas superiores e inferiores.

Microestructura

La microestructura de un culmo de bambú se muestra en la Figura 7. La parte exterior es más densa que la parte interior y en la imagen es la zona con puntos más oscuros. Esta capa contiene mucha sílica, un buen material para proteger la planta. Los puntos oscuros decrecen de izquierda a derecha. Son fibras de celulosa con vacíos. La celulosa actúa como las barras de acero en el concreto reforzado.

Los vacíos tienen la función de transporte de líquidos durante la vida de la planta.

La parte externa del culmo está formado por dos capas celulares epidermales, siendo la interna más gruesa y altamente lignificada, mientras que las más externas están cubiertas por una capa cutinizada que posee una cobertura de cera por encima. Las partes internas de la caña constan de numerosas células de esclerénquima, lo que impide el movimiento lateral de líquidos.

El material entre los puntos oscuros se llama parénquima y es la matriz en donde las fibras están embebidas. *Aproximadamente un culmo de bambú está constituido de 40% de fibras, 10% vacíos y 50% parénquima*⁹.



Figura 7. Microestructura del bambú.
Fuente: Janssen, 2000 (11).

Fibras

Las fibras constituyen el tejido que soporta todo el esfuerzo mecánico al que está sometido el tallo debido al viento y otros factores externos, además de su propio peso. Las fibras del bambú en general se caracterizan por su forma delgada, ahusada en ambos lados y en algunos casos bifurcada en los extremos.

⁹ Janssen, J. 2000. **Designing and Bulding with Bamboo.** Technical University of Eindhoven, The Netherlands International Network for Bamboo and Rattan.

Su largo tiene influencia sobre la fortaleza del culmo y sus propiedades para pulpa. Ellas difieren en tamaño, forma y localización, dependiendo de la especie, edad y de su localización en el culmo.

En general puede decirse que la longitud de la fibra tiende a aumentar en relación con la altura del tallo. En la Figura 8 se aprecia como la longitud de las fibras es máxima en la mitad de la altura entre nudos y decrece hacia los nudos.

El ancho de las fibras tiende a decrecer con la altura del tallo.

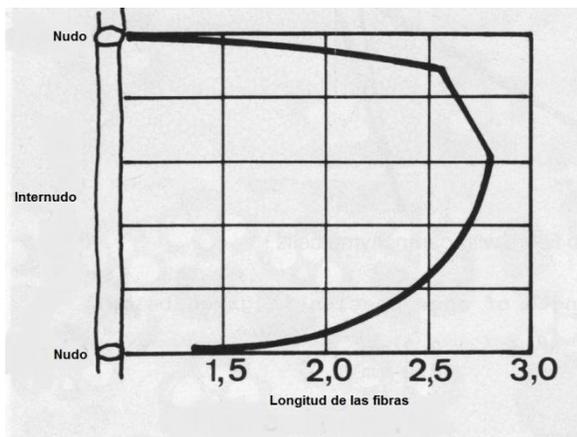


Figura 8. Longitud de las fibras según la posición en el culmo.

Fuente: Liese, 1985 (10).

En promedio la longitud de la fibra varía entre 1.5 y 4.4 mm para especies aisladas; pero un gran número predomina entre 2.2 y 2.6 mm. Generalmente las fibras son más largas que las de maderas duras.

La ultra estructura de la mayoría de las fibras es caracterizada por paredes poli laminadas secundarias (Figura 9). Esta laminación consiste de capas alternadas esbeltas y gruesas con diferente orientación.

La lámina gruesa exhibe un alto contenido de lignina en comparación con las láminas esbeltas. *Esta poli laminación no existe en las paredes celulares de las fibras de la madera normal*¹⁰.

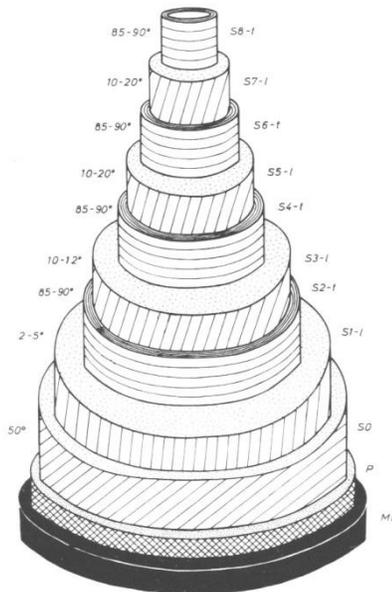


Figura 9. Poli laminación de una fibra de bambú.

Fuente: Liese, 1985 (10).

En la Figura 10 se puede apreciar la constitución de la sección transversal del bambú. Se aprecian los vacíos que representan aproximadamente 10% de la sección.

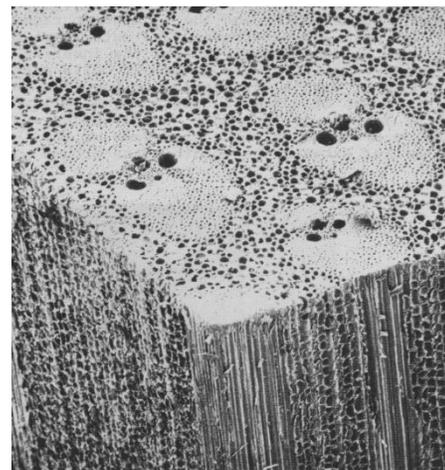


Figura 10. Imagen de la sección transversal tridimensional del bambú, vista en microscopio.

Fuente: Liese; 1985 (10).

¹⁰ Liese, W.1985. **Bamboos: Biology, silvics, properties, utilization.** GTZ.

Conservación

El bambú como la madera, una vez cortado se altera, se pudre y finalmente se reduce a polvo, por la influencia de los agentes atmosféricos, los cambios de humedad y la acción de organismos vegetales o animales.

El bambú se conservará en tanto se neutralicen todos los agentes anteriormente mencionados, y ello se logra sometiéndolo a un tratamiento de conservación desde el momento en que se corta hasta su utilización final¹¹.

Para lograr este fin se pueden aplicar una serie de cuidados y tratamientos, los cuales se indican a continuación:

- Corte del tallo según su edad, lo cual determina la mayor o menor resistencia física del bambú.
- Curado del bambú.
- Secado del bambú.
- Tratamiento con sustancias perseverantes contra hongos e insectos.
- Tratamiento con resinas sintéticas, para el mejoramiento de sus propiedades físicas.

Secado del bambú

Los tallos vivos de bambú como los árboles, contienen una cantidad considerable de humedad. Cuando el bambú se va a utilizar como material, que va estar expuesto a diversos factores físicos y climatológicos, debe someterse previamente a un secado, por las siguientes razones:

- El bambú se contrae con la pérdida de humedad y se dilata cuando ésta aumenta. *Para reducir al mínimo los cambios dimensionales del bambú, éste se debe secar aproximándose al contenido de humedad que tendrá cuando esté en uso, o sea entre el 10 y el 15%⁸.*
- El secado disminuye el peso del bambú.
- Los organismos que ocasionan pudrición y manchas, normalmente no viven en el bambú

cuando la humedad se encuentra por debajo del 15%.

- Las propiedades de resistencia del bambú aumentan, cuando se seca a un contenido de humedad bajo.
- *Los pegamentos actúan mejor en piezas de bambú seco⁸.*

Bambú guadua

En los apartados anteriores se presentó información del bambú desde un punto de vista general. En éste se enfoca a una especie de bambú conocida como Guadua, ya que el presente estudio se desarrolló alrededor de la misma.

Particularmente se dio importancia a las propiedades físicas y mecánicas del bambú Guadua, pero también se presenta alguna información general de este tipo de bambú.

Es importante señalar previamente que el material vegetal puede variar anatómicamente y estructuralmente dependiendo de la región del cultivo. *Además, dependiendo de la zona del culmo, de donde se hayan tomado las muestras y del contenido de humedad de las mismas, la resistencia de los elementos varía de manera inversamente proporcional de la cepa hacia la parte basal en el culmo⁸.*

Datos generales

Taxonomía

La guadua es el bambú americano de más amplia distribución; es una gramínea, específicamente de la subfamilia Bambusoideae, tribu Bambuseae, subtribu Guaduae y género Guadua¹². Su nombre científico es Bambusa guadua.

Distribución geográfica

¹² Londoño, X. 1998. **A decade of observations of a Guadua angustifolia plantations in Colombia.** En: *The Journal of the American Bamboo Society*, Vol. 12 (1), p. 37-42.

Es nativa del noroeste de Sur América, principalmente de Colombia y Ecuador, regiones en donde los guaduales se desarrollan en zonas muy fértiles comprendidas hasta los 700 msnm. Tiene una amplia distribución que abarca los países de América Central y Sur América.

Propiedades físicas

Existe amplia información de estudios realizados sobre las propiedades físicas del bambú del género Guadua. Sin embargo, para el caso particular de este trabajo, la información se obtuvo del estudio realizado en Costa Rica por Jaime Sotela².

A continuación se presentan los resultados obtenidos por Sotela para la densidad y para la contracción volumétrica. Los culmos de guadua fueron obtenidos de dos zonas de Costa Rica: Zona Atlántica (Guácimo) y de la Zona Sur (frontera Costa Rica-Panamá).

Ubicación	n	%w	PV/VV (g/cm ³)	PS/VS (g/cm ³)	PS/VV (g/cm ³)	CV%
BASE	4	113,14	1,092	0,828	0,522	37,02
MEDIO	3	88,25	1,254	0,898	0,669	25,55
ALTO	3	78,68	1,089	0,880	0,615	30,25
		93,36	1,145	0,869	0,602	30,94
Desviación estándar		17,79	0,094	0,037	0,074	5,76

Fuente: Sotela, 1990 (6).

Donde

n: número de pruebas
 %w: porcentaje de humedad
 PV: peso verde en g
 PS: peso seco en g
 VV: volumen verde en cm³
 VS: volumen seco en cm³
 CV: contracción volumétrica

Ubicación	n	%w	PV/VV (g/cm ³)	PS/VS (g/cm ³)	PS/VV (g/cm ³)	CV%
BASE	4	125,08	1,112	0,703	0,499	29,26
MEDIO	3	95,32	1,109	0,813	0,570	29,86
ALTO	4	81,89	1,089	0,805	0,604	25,00
Promedio		100,76	1,103	0,774	0,558	28,04
Desviación estándar		22,10	0,013	0,061	0,054	2,65

Fuente: Sotela, 1990 (6).

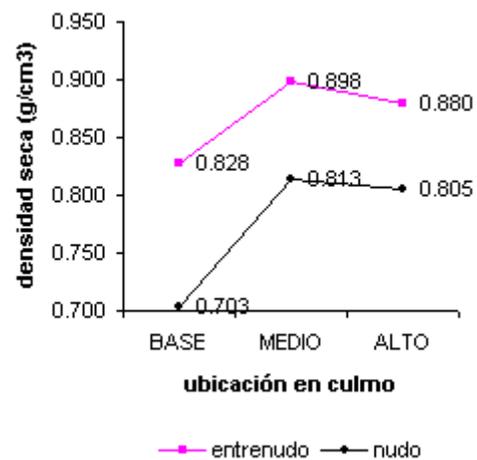


Figura 11. Densidad seca vs tipo y ubicación de la muestra. Zona Atlántica. Fuente: Sotela, 1990 (6).

Ubicación	n	%w	PV/VV (g/cm ³)	PS/VS (g/cm ³)	PS/VV (g/cm ³)	CV%
BASE	2	122,48	1,127	0,755	0,507	32,82
MEDIO	3	99,21	1,120	0,862	0,563	34,64
ALTO	3	90,76	1,112	0,860	0,583	32,15
Promedio		104,15	1,120	0,826	0,551	33,20
Desviación estándar.		16,43	0,008	0,061	0,039	1,29

Fuente: Sotela, 1990 (6).

Cuadro 6. Ensayo de densidad y contracción volumétrica, especímenes de nudo. Zona Sur						
Ubicación	n	%w	PV/VV (g/cm ³)	PS/VS (g/cm ³)	PS/VV (g/cm ³)	CV%
BASE	3	98,80	1,141	0,772	0,579	24,70
MEDIO	3	98,57	1,131	0,794	0,571	28,08
ALTO	3	91,03	1,126	0,806	0,590	26,64
Promedio		96,13	1,133	0,790	0,580	26,47
Desviación estándar		4,42	0,008	0,017	0,010	1,70

Fuente: Sotela, 1990 (6).

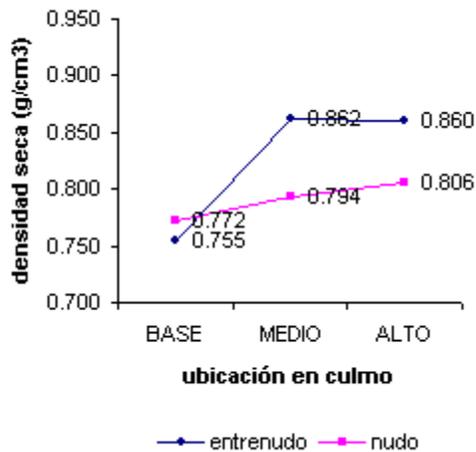


Figura 12. Densidad seca vs tipo y ubicación de la muestra. Zona Sur. Fuente: Sotela, 1990 (6).

De este estudio Sotela² concluyó lo siguiente:

- La densidad y la contracción de los culmos ensayados poseen valores similares para ambas zonas estudiadas.
- La contracción promedio es del orden del 30% en las dos zonas.
- La densidad de las muestras de entrenudo es mayor que las de nudo.
- La densidad seca en general oscila en un rango de 0,7 a 0,9 g/cm³ para el bambú procedente de ambas zonas.
- De los gráficos mostrados se aprecia que la densidad es máxima en la mitad de la altura del culmo, esto tanto para la zona entrenudo como en el nudo.

Propiedades mecánicas

La siguiente información es producto de una revisión bibliográfica sobre las propiedades mecánicas del Bambú Guadua, que incluye dos estudios de procedencia nacional y dos estudios originados en Colombia.

Estudio 1: **Determinación de propiedades físicas y mecánicas del bambú de la especie guadua de dos zonas de Costa Rica.** Sotela Motero, J. 1990. Informe final para el proyecto Nacional de Bambú. Universidad de Costa Rica. Laboratorio de Productos Forestales, Laboratorio de Materiales y Modelos Estructurales. 65pp

Estudio 2: **Fundamentals of the design of bamboo structures.** Oscar Antonio Arce Villalobos. Eindhoven: Faculteit Bouwkunde, Technische Universiteit Eindhoven. 1993.

Estudio 3: **Determinación de la resistencia mecánica a tensión y cizalladura de la Guadua angustifolia kunth.** Ciro, H. Osorio, J. Velez, J. Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín, Colombia. Vol 58, #1. Julio 2005.

Resistencia a la flexión

En el caso de estudio 1 se llevaron a cabo un total de 12 ensayos de este tipo, tres en culmos de la Zona Atlántica de Costa Rica en condición fresca, mientras que en condición seca al aire en cinco culmos de la región anterior y en cuatro de la Zona Sur de Costa Rica.

La condición "seca al aire" se define como aquella en el cual el contenido de humedad de los especímenes de bambú se encuentra en equilibrio con la humedad ambiental (de 15 a 19 por ciento); mientras que la condición "fresca" es aquella en la cual el contenido de humedad de los especímenes es superior a la anterior, lo que significa que el proceso de secado aún no finaliza (humedad superior al 25%). Los resultados de estos ensayos se muestran en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Resistencia a la flexión promedio y desviación estándar							
Procedencia	n	Módulo Elasticidad (kg/cm ²)		Esfuerzo L. P. (kg/cm ²)		M.R. (kg/cm ²)	
		p	d.e.	p	d.e.	p	d.e.
Atlántico	3	182551	15330	390,7	62,7	614,7	79,2
Atlántico	5	236743	61349	669,4	180,0	757,8	124,9
Zona Sur	4	277689	46157	926,1	101,7	1113,5	140,0

Fuente: Sotela, 1990 (6).

Donde

N: número de pruebas
 Esfuerzo L.P: esfuerzo en el límite proporcional (kg/cm²)
 MR: módulo de ruptura (kg / cm²)
 p: promedio
 d.e: desviación estándar

Del Cuadro 7 se infiere que el módulo de ruptura obtenido en la Zona Sur es en promedio 49% superior al obtenido para la Zona Atlántica.

Esto demuestra la variabilidad de las propiedades mecánicas en materiales de origen natural.

Además, según Sotela² el comportamiento observado en las curvas carga-deformación es elástico.

Esfuerzo cortante

Se presentan los resultados experimentales respecto al esfuerzo cortante obtenidos por Sotela² y Ciro et al¹³.

Los resultados obtenidos por Sotela, fueron producto de 48 muestras ensayadas para los sitios de la zona Atlántica y la zona Sur. Además se obtuvieron muestras del nudo y del entrenado del culmo de bambú. Los siguientes cuadros muestran los resultados.

Cuadro 8. Esfuerzo cortante según posición en el culmo del bambú (Zona Atlántica)			
Posición	Numero de muestras	Esfuerzo (kg/cm ²)	
		Promedio	Desviación estándar.
Muestras del entrenado			
Base	4	54,26	11,41
Media	4	62,06	3,06
Alta	4	79,39	14,34
Muestras del nudo			
Base	4	54,40	7,85
Media	4	62,89	10,84
Alta	4	67,94	17,32

Fuente: Sotela, 1990 (6).

De la información anterior se obtiene una comparación gráfica del comportamiento del esfuerzo cortante según la posición en el culmo de bambú (Figura 13).

Se puede apreciar que se presenta una variación significativa únicamente en la parte alta del culmo.

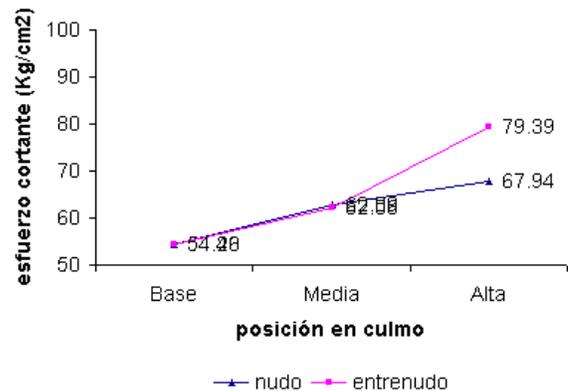


Figura 13. Esfuerzo cortante vs posición en el culmo. Zona Atlántica
 Fuente: Sotela, 1990 (6).

Cuadro 9. Esfuerzo cortante según posición en el culmo del bambú (Zona Sur)			
Posición	Numero de muestras	Esfuerzo (kg/cm ²)	
		Promedio	Desviación Estándar
Muestras del entrenudo			
Base	4	70,80	9,24
Media	4	84,63	6,81
Alta	4	96,73	3,79
Muestras del nudo			
Base	4	63,21	9,25
Media	4	71,99	12,62
Alta	4	69,80	11,02

Fuente: Sotela, 1990 (6).

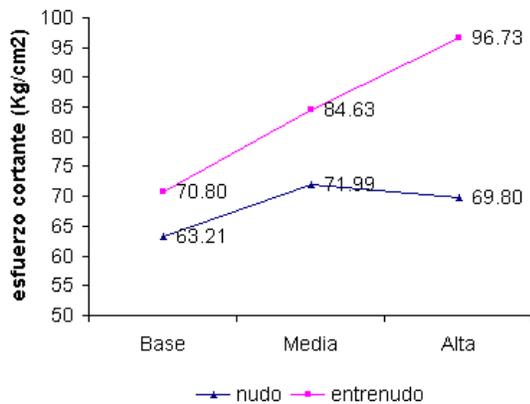


Figura 14. Esfuerzo cortante vrs posición en el culmo. Zona Sur
Fuente: Sotela; 1990. (6)

De manera semejante a las muestras obtenidas de la zona Atlántica, se observan variaciones importantes en los resultados para esfuerzo cortante dependiendo de la posición y de la procedencia de la muestra, es decir del nudo o del entre nudo.

Un estudio semejante al realizado por Sotela lo llevó a cabo Ciro et al¹³. Para el

¹³ Ciro et al. 2005, **Determinación de la resistencia mecánica a tensión y cizalladura de la Guadua angustifolia kunth.** Facultad Nacional de Agronomía, Medellín, Colombia. Vol 58

estudio se seleccionaron 18 elementos para las pruebas a esfuerzo cortante. Dicho material correspondió a Guadua *angustifolia*, de la zona media del culmo o zona basal, con diámetros entre 0,7 y 1,5 cm. El material seleccionado, fue secado naturalmente hasta alcanzar contenidos de humedad en base seca menores del 20 %.

Los resultados obtenidos se muestran en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Resistencia al esfuerzo cortante				
Parámetro	Promedio (kg/cm ²)	Intervalos de confianza al 95% (kg/cm ²)		Coeficiente de variación (%)
		Inferior	Superior	
Esfuerzo Cortante	57.6	51	61	17

Fuente: Ciro et al, 2005 (14).

En este caso se aprecian diferencias con los valores promedio del trabajo realizado por Sotela². Esta situación se ve más marcada con los datos correspondientes a la zona Atlántica.

Esfuerzo a la compresión

El comportamiento a la compresión fue estudiado por tres autores y los resultados se indican a continuación.

El primer caso, el estudio de Sotela², se basó en un total de 24 ensayos a la compresión (12 muestras de nudo y 12 de entrenudo) por cada procedencia.

Cuadro 11. Esfuerzo a la compresión según posición en el culmo del bambú (Zona Atlántica)				
Posición	Módulo de Elasticidad (kg/cm ²)		Esfuerzo (kg/cm ²)	
	Promedio	Desviación estándar	Promedio	Desviación estándar
Muestras del entrenado				
Base	167955	27773	331,66	21,94
Media	195936	17989	445,10	20,04
Alta	212681	16741	485,28	120,10
Muestras del nudo				
Base			370,18	39,44
Media			418,93	36,43
Alta			487,86	53,09

Fuente: Sotela, 1990 (6).

Cuadro 12. Esfuerzo a la compresión según posición en el culmo del bambú (Zona Sur)				
Posición	Módulo de Elasticidad (kg/cm ²)		Esfuerzo(kg/cm ²)	
	Promedio	Desviación estándar	Promedio	Desviación estándar
Muestras del entrenado				
Base	122319	26256	340,55	20,09
Media	216069	15731	425,58	13,22
Alta	189925	16746	476,51	26,48
Muestras del nudo				
Base			348,71	47,09
Media			444,66	50,57
Alta			482,91	33,07

Fuente: Sotela, 1990 (6).

En este caso los resultados obtenidos para ambas zonas de procedencia en estudio, no presentan grandes diferencias. Esto tanto para el esfuerzo ultimo en compresión como para el modulo de elasticidad. Como punto de comparación se presentan los resultados obtenidos por Arce¹, quien realizó el estudio en Holanda utilizando bambú Guadua de procedencia costarricense (Cuadro 13).

Cuadro 13. Esfuerzo a la compresión (kg/cm²)		
Variable	Esfuerzo (kg/cm ²)	Módulo de Elasticidad (Kg/cm ²)
Número de muestras	31	31
Promedio	514.78	188222.22
Mediana	518.35	184485.22
Moda	509.38	184475.03
Desviación estándar	82.98	29733.03
Mínimo	372.07	143343.53
Máximo	684.51	257217.13
Coefficiente de variación	16.12	15.8

Fuente: Arce, 1993 (5).

Respecto a los ensayos a la compresión, el autor indica que las condiciones del ensayo son un punto crítico a ser tomado en cuenta. La fricción y la rigidez de los platos de carga contribuyen al modo de falla de los especímenes.

El autor indica que se debe diferenciar entre la resistencia del bambú como material y la resistencia a la compresión de los culmos. En este último caso la resistencia depende de la geometría de los culmos. Parámetros medidos muestran una fuerte influencia de las imperfecciones en el espécimen.

Esfuerzo de tensión paralelo a las fibras

El bambú Guadua es conocido como "Acero verde" por su gran capacidad ante cargas de tensión paralelas a las fibras.

El trabajo realizado por Arce representa una fuente de información muy completa, debido a que en éste estudio se considera la influencia de la velocidad de carga y de la densidad en la capacidad a tensión paralela a la fibra del bambú

Guadua. Dichos resultados se presentan a continuación:

Cuadro 14. Influencia de la velocidad de carga en el esfuerzo de tensión paralelo a la fibra (kg/cm²)			
Variable	0,2 mm/min	0,6 mm/min	1 mm/min
Tamaño de muestra	11.00	11.00	11.00
Promedio	2774.01	2998.37	3159.84
Mediana	3066.46	2976.15	3343.53
Moda	2879.51	2660.55	2895.01
Desviación estándar	622.83	637.10	390.42
Mínimo	1464.63	1996.02	2685.42
Máximo	3524.57	4280.12	3818.35
Coefficiente Variación	22.45	21.25	12.35

Fuente: Arce, 1993 (5).

Los resultados muestran como el esfuerzo de tensión paralelo a la fibra aumenta conforme se aumenta la velocidad de carga.

De la curva de Esfuerzo-Deformación mostrada en la Figura 15, Arce¹ concluye que el bambú Guadua tiene un comportamiento elástico bajo carga de tensión paralela a las fibras, con un modo de falla claramente frágil.

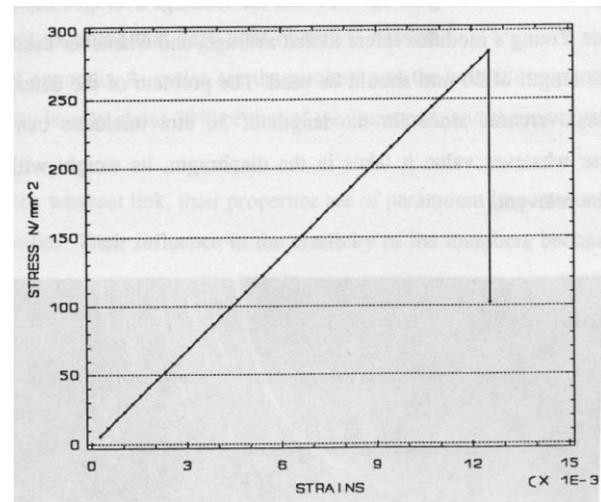


Figura 15. Curva esfuerzo – deformación en tensión paralela típica

Fuente: Arce, 1993 (5).

Otro punto de interés del comportamiento en tensión del bambú Guadua es la presencia de nodos en el culmo. Arce¹ en su trabajo realizó el estudio de la resistencia a la tensión diferenciando si el espécimen corresponde a la zona nodal o entrenodo del bambú. Los resultados (Cuadro 15) demostraron que el esfuerzo en la zona nodal es solo 30% del esfuerzo en las zonas entrenodo. Existe variación entre el módulo de elasticidad en la zona nodal y la entrenodo. El módulo de elasticidad en el nodo es aproximadamente 40% del módulo de elasticidad de la zona entrenodo (ver Cuadro 16).

Cuadro 15. Efecto del nodo en el esfuerzo de tensión paralelo		
Variable	Tensión entrenodo (kg/cm ²)	Tensión nodal (kg/cm ²)
Tamaño de muestra	11	11
Promedio	2758.21	814.37
Mediana	2926.50	822.73
Moda	2691.03	801.94
Desviación estándar	611.31	144.75
Mínimo	1577.57	534.96
Máximo	3407.44	1038.63
Error estándar	18.08	4.28

Fuente: Arce, 1993 (5).

Cuadro 16. Efecto del nodo en el Módulo de elasticidad		
Variable	Módulo de elasticidad entrenodo (kg/cm ²)	Módulo de elasticidad nodal (kg/cm ²)
Tamaño de muestra	11	11
Promedio	192230.38	75969.42
Mediana	198213.05	78797.15
Moda	179408.77	68835.88
Desviación estándar	55796.94	15218.35
Mínimo	91009.17	56177.37
Máximo	273138.63	99836.90
Coefficiente Variación	29.03	20.03

Fuente: Arce, 1993 (5).

El trabajo realizado por *Ciro et al*¹³, también incluyó el esfuerzo de tensión paralelo a las fibras, cuyos resultados se presentan a continuación:

Cuadro 17. Esfuerzo de tensión paralelo a la fibra (kg/cm ²)				
Parámetro	Promedio	Intervalos de confianza al 95% (kg/cm ²)		Coeficiente de variación (%)
		Inferior	Superior	
Esfuerzo de tensión	1943.93	1552.5	2335.37	34

Fuente: *Ciro et al*, 2005 (14).

Cabe señalar que los resultados presentados en el Cuadro 17, son obtenidos de muestras de la zona entrenodal.

Generalidades de la madera

En esta sección se presentan conceptos básicos y necesarios para comprender adecuadamente el comportamiento de la madera desde el punto de vista estructural.

Se presentaran definiciones y características respecto a la madera en general. Posteriormente se definirán las características y propiedades mecánicas para diseño con madera de Pino Radiata, utilizada en el desarrollo del presente trabajo.

Definición

La madera es un material de origen natural, compuesto de fibras longitudinales, que presenta un comportamiento variable según la dirección en que este se analice (anisotropía).

*Para los ingenieros la madera es un sólido de color variable y misterioso. En realidad, la madera es el fruto de un proceso en que la naturaleza invierte miles de días de sol, de lluvia y los elementos genéticos para su elaboración*³.

La madera está compuesta por Celulosa (40 - 60%), Hemicelulosa (20 - 35%) y Lignina (20 - 40%).

Estructura

Se presenta la estructura fundamental de la madera, desde la macro estructura, la micro estructura hasta llegar a la ultra estructura.

Macro estructura

Es la que se observa a simple vista. Básicamente está compuesta de las partes mostradas en la Figura 16.

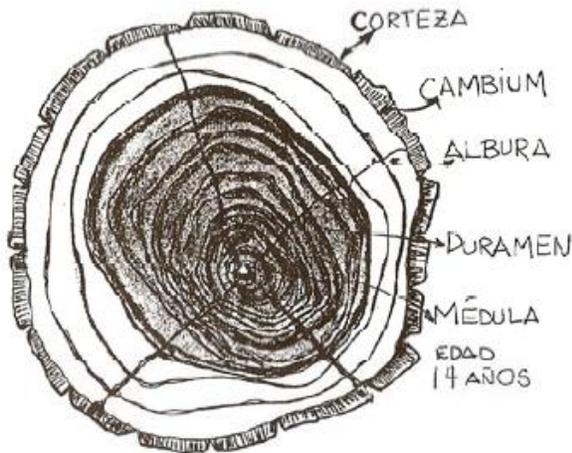


Figura 16. Partes fundamentales de un tronco
Fuente: Tuck, 2007 (2).

A continuación se presenta la definición de cada una de las partes de la macroestructura según Tuck³:

Corteza externa: está constituida por células muertas. Su espesor varía según la especie.

Corteza interna: Por ella circula la sabia.

El cambium: Es un tejido que produce la madera hacia el interior y la corteza, hacia el exterior.

Material leñoso: Es básicamente la madera. Esta dividido en albura y duramen.

Medula: Se encuentra en el centro. Es el primer tejido que origina el crecimiento del árbol y donde inicia su muerte.

Micro estructura

La madera es un tejido exclusivo de los vegetales leñosos. Estos están formados por células que semejan tubos huecos, en los cuales la pared del tubo corresponde con la pared celular y el interior del hueco, al lumen de la célula.

De forma simple y general se puede decir que la madera está formada principalmente por la unión de las células y el tamaño, forma y distribución de las mismas, forman otros elementos anatómicos como los radios leñosos, la presencia de canales o vasos entre otros.

Ultra estructura

Con referencia en la Figura 17, entre las paredes celulares se encuentra una capa llamada media (ML) constituida esencialmente por lignina, que actúa como cementante.

La pared celular está compuesta por la capa primaria (P) y secundaria (S). La capa primaria P es muy delgada y las microfibras están orientadas de forma aleatoria. La capa secundaria S está constituida por tres subcapas (S1, S2 y S3)¹⁴.

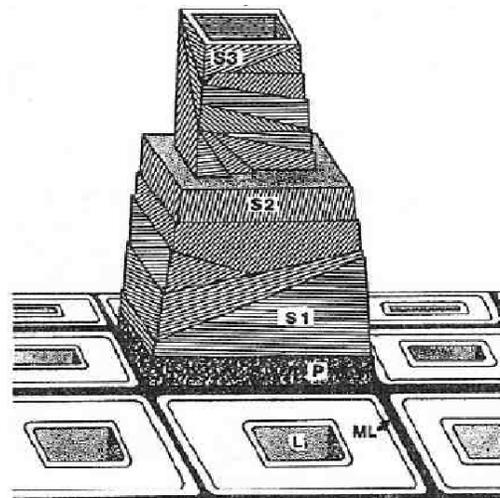


Figura 17. Ultraestructura de la madera
Fuente: González, 2008 (7).

¹⁴ González Beltrán G. 2008. **Diseño de estructuras de madera.** Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica.

Características

La madera es caracterizado por ser un material aniso trópico y higroscópico, a continuación se definen dichos términos.

Anisotropía

La madera es un material vegetal con fibras longitudinales, en la dirección de crecimiento, que determinan un comportamiento anisótropo.

En el comportamiento de la madera hay propiedades con valores diferentes en las tres direcciones principales:

- Axial:** Paralela al eje de crecimiento del árbol.
- Radial:** Perpendicular a la primera y que pasa por el centro.
- Tangencial:** Normal a las dos anteriores.

Higroscópico

Su contenido de humedad varía en equilibrio, con la humedad y temperatura del medio ambiente³.

De acuerdo con la humedad relativa del ambiente, la madera perderá humedad en un ambiente seco, y la madera seca absorberá humedad en un ambiente húmedo.

Propiedades físicas

Se presenta el concepto de punto de saturación de fibras y de contenido de humedad. Ambos términos hacen referencia a propiedades físicas de la madera, las cuales varían según cada especie

Agua en la madera

El agua en la madera se encuentra de alguna de las tres siguientes formas:

- Agua libre: Se encuentra dentro de las cavidades celulares.
- Agua ligada o higroscópica: En las paredes celulares.

Agua de constitución: Integrada a estructura molecular de la madera.

Contenido de Humedad

Se define como el cociente del peso de agua que existe en una muestra y el peso seco de la misma muestra.

Las muestras para evaluar la humedad, deben ser preferiblemente de 5 cm x 5 cm de sección x 15 cm de longitud.

Punto de Saturación de Fibras

Es aquel contenido de humedad para el cual las paredes celulares están completamente llenas de agua y las cavidades están vacías. Es decir se ha perdido toda el agua libre. Dependiendo de la especie varía entre un 25 y un 35%.

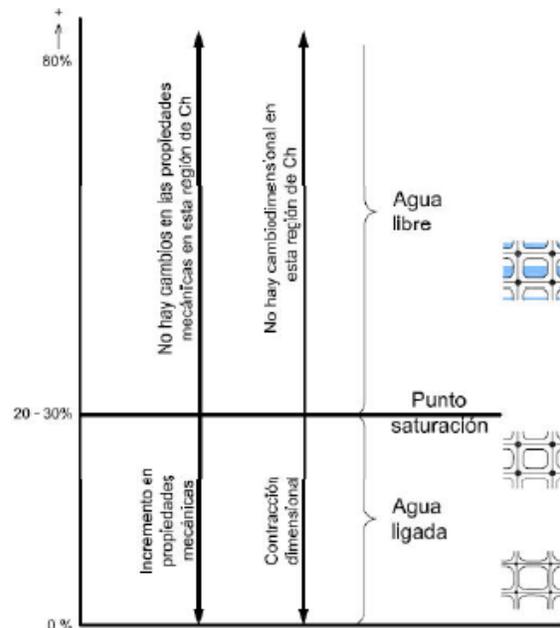


Figura 18. Diagrama de rangos de humedad donde ocurren cambios dimensionales y de resistencia Fuente: González, 2008 (7).

La Figura 18 muestra la variación del contenido de humedad en la madera y su efecto sobre las propiedades mecánicas y dimensionales. Cuanto menor sea el contenido de humedad mayor será la resistencia mecánica

de la madera y la contracción dimensional aumentara.

Condición de la madera según su Contenido de Humedad.

Madera Verde: Ha perdido agua libre pero su Contenido de Humedad se encuentra sobre el Punto de Saturación de Fibras.

Madera Seca: Ha perdido toda el agua libre y parte del agua ligada.

Madera Anhidra: Ha perdido toda el agua libre y toda el agua ligada.

Pino Radiata

El Pino Radiata es plantado extensivamente en el hemisferio sur, principalmente en Chile, Nueva Zelanda, Australia y Sur Africa.

Apariencia

Madera con crecimiento de los anillos anuales bien diferenciados por una franja estrecha de madera de verano más oscura.

Estos anillos poseen un ancho bastante irregular, pueden ser exageradamente anchos sobre todo en los primeros años, pudiendo alcanzar los 15 cm para con la edad irse haciendo más regulares y estrechos oscilando alrededor de los 2 a 6 cm de anchura.

Propiedades mecánicas

El Pino Radiata presenta fuertes variaciones en su resistencia mecánica. Estas propiedades son extraídas del Cuadro 4.1 según Tuck³.

Módulo de ruptura (kg/cm²)	414
Módulo de elasticidad (kg/cm²)	65306
Esfuerzo de compresión (kg/cm²)	183
Esfuerzo de compresión ⊥ (kg/cm²)	33
Esfuerzo cortante (kg/cm²)	64

Fuente: Tuck, 2007 (2).

Módulo de ruptura (kg/cm²)	894
Módulo de elasticidad (kg/cm²)	96939
Esfuerzo de compresión (kg/cm²)	415
Esfuerzo de compresión ⊥ (kg/cm²)	60
Esfuerzo cortante (kg/cm²)	119

Fuente: Tuck, 2007 (2).

Como se aprecia en los cuadros anteriores las propiedades de la madera mejoran a menor contenido de humedad. Estos datos están referenciados a un estado verde y a un contenido de humedad de 12%.

Los valores de resistencia en condiciones de humedad intermedia, se deben calcular tomando en cuenta el punto de saturación de fibras.

Para determinar la resistencia en estas condiciones intermedias se utilizan los valores en condición verde y en condición seca, mediante un procedimiento de interpolación³.

Cuando no se conoce el Punto de Saturación de Fibras de una determina especie se toma este como 30%.

El procedimiento se puede apreciar gráficamente de la siguiente forma:

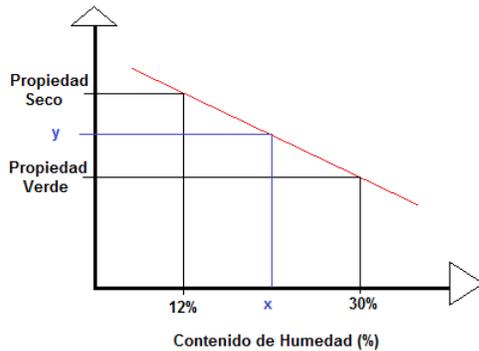


Figura 19. Relaciones de resistencia a dos niveles de humedad requeridos para interpolar linealmente.

Donde x representa el contenido de humedad al cual deseamos obtener una determinada propiedad (módulo de elasticidad, módulo de ruptura, etc). El gráfico está adaptado a las condiciones de este trabajo dado que se cuenta con datos en estado verde (al cual se le asocia un contenido de humedad de 30%, por no tener información al respecto) y en estado seco (12%).

Madera laminada

La madera laminada es un producto compuesto por piezas de madera aserrada y cepillada, unidas con un adhesivo no reológico³. En la madera laminada cada uno de los componentes se alinean en tal forma, que el grano o las fibras quedan dispuestos en sentido paralelo.

El espesor máximo de las láminas es de 5 cm y normalmente se utilizan secciones estándar de 2.5 cm o 5 cm.

Algunas ventajas de la madera laminada según González¹⁴ son:

- Tamaño: cualquier tamaño de elemento es técnicamente posible. Por lo tanto, ofrece el potencial de producir grandes elementos de árboles pequeños.
- Diversidad de formas: dándole curvatura a la madera utilizada, se puede obtener una variedad de formas

como vigas de sección variable, vigas curvas, arcos y marcos rígidos.

- Mayor resistencia: las láminas son escogidas de manera que un miembro de madera laminada pueda ser de gran tamaño y prácticamente libre de defectos.
- Libre de rajaduras y torceduras: como las láminas individuales son generalmente de 5 cm de espesor, se secan uniformemente. Esto impide los efectos causados por el secado tales como rajaduras y torceduras. Además, en el miembro armado, las láminas no pueden deformarse independientemente al estar restringidas.

Producción

Según González la producción de la madera laminada puede dividirse en 4 etapas: preparación de las laminas (secado y clasificación), uniones por los extremos, pega de laminas y acabados.

Las láminas de mayor espesor (5 cm) y de longitudes de 1.5 m a 5 m se secan a un contenido de humedad máximo de 15%. Luego se cepillan y se clasifican.

Las láminas se unen en los extremos mediante uniones “dentadas” las cuales tienen una longitud típica de 2.8 cm. Las láminas se prensan posteriormente a la aplicación de adhesivo en las juntas.

La madera que se utilizó en este trabajo es de marca Xilolam comercializada por la empresa GrupoXilo, en el manual técnico brindado por la empresa se presentan valores de diseño recomendados.

El Cuadro 19 muestra los valores de diseño aplicables a la madera de Pino Radiata, utilizada en el laminado (se incluyen efectos de la cola y el tratamiento preservante).

Cuadro 19. Valores de diseño, aplicados a laminado tipo Xilolam, a 18% de humedad.				
Especie	Condición de Humedad %	fb (kg/cm²)	fv (kg/cm²)	E (kg/cm²)
Pino Radiata	18	90	20	90000

Fuente: Grupo Xilo. (30)

Especificaciones generales de la madera laminada tipo Xilolam¹⁵:

- *Toda la madera será Pino Radiata o Pino Caribaea*
- *Cepillada las cuatro caras.*
- *Seca al 12% de humedad al momento de ser encolada.*
- *Curada bajo método Vacío-Presión con preservante Osmose micropro para una estructura bajo techo o según uso.*
- *Libre de cromo y arsénico.*
- *La penetración del preservante será de albura completa.*
- *Se utiliza Cola Estructural MUF1242, termoestable e impermeable.*
- *Acabado con impermeabilizante Xilotop.*

¹⁵ Grupo Xilo. **Manual de especificaciones y manipulación de la madera laminada Xilolam.**

Introducción

El bambú es un material vegetal cuyas propiedades mecánicas indican un tener gran potencial para ser explotadas por la ingeniería.

Es un material lignocelulósico cuya resistencia a la tensión es más de 3 veces la resistencia de la madera.

La planta de bambú presenta largos culmos, huecos en el interior, segmentados a intervalos más o menos iguales por una especie de diafragma perpendicular al eje del culmo. Estos se conocen como nudos. Sus paredes tienen excelente resistencia a la tensión y a la compresión.

Investigadores costarricenses han comprobado experimentalmente estas propiedades, por ejemplo:

Arce¹ reporta un esfuerzo último en tensión para muestras con nudo de 814 kg/cm^2 , para muestras sin nudo reporta un esfuerzo último de 2758.21 kg/cm^2 .

Sotela² reporta un esfuerzo en compresión promedio para muestras con nudo de 425 kg/cm^2 y para muestras sin nudo 417 kg/cm^2 .

Costa Rica es el país con más diversidad de especies de bambú en Centro América, posee 8 géneros y 39 especies reportadas. El 50% de las especies fueron registradas en los últimos 20 años.

A pesar de las formidables propiedades físicas y mecánicas mencionadas, el bambú ha sido poco o nada utilizado en la industria de la construcción debido básicamente a dos factores: su configuración geométrica que dificulta la confección de piezas estructurales de sección transversal rectangular y su pobre resistencia al cortante que no permite que el material sea clavado o atornillado tornando complicado el panorama de un proyecto donde deban construirse uniones.

El problema de su baja resistencia al cortante y su orientación de fibras hace que el bambú se parta con la simple aplicación de fuerza con las manos. Una perforación en la

pared de un culmo provoca una grieta que se propaga muy fácilmente.

La tecnología del bambú laminado elimina estos problemas de cortante y geometría, permitiendo a este material un uso más racional en la ingeniería estructural.

La iniciativa de la empresa Grupo Xilo surgió ante el conocimiento de estas desventajas. Su interés en conocer la factibilidad del uso de bambú como refuerzo en vigas laminadas impulsó el desarrollo de esta investigación.

Por su característica de rajarse o abrir sus fibras (principal debilidad desde el punto de estructural como se mencionó) se ha pensado que esta se puede corregir mediante su uso en conjunto con elementos de madera aserrada y formar así elementos tipo viga reforzadas con láminas de bambú cuya función es análoga a la del acero en una viga concreto reforzado.

El uso de un elemento sin conocer su comportamiento estructural puede conllevar a problemas de integridad estructural, un aumento de los costos asociados a un sobre diseño como consecuencia de ese desconocimiento. En el presente estudio se determina el comportamiento estructural de vigas rectangulares compuestas por madera laminada de Pino Radiata con refuerzo de láminas de bambú Guadua en la parte inferior.

Para eso fueron fabricadas y ensayadas 10 vigas con refuerzo y 10 vigas sin refuerzo, ambas con las mismas dimensiones de peralte, ancho y longitud. Se ensayaron utilizando las especificaciones de la norma ASTM D198.

Se investigó la bibliografía disponible con el fin de extraer valores de resistencia del bambú Guadua y de la madera de Pino Radiata. En el caso del bambú se verificaron experimentalmente sus propiedades físico-mecánicas, esto mediante la norma ISO/TR 22157.2.2003 "Bamboo-determination of physical and mechanical properties" donde se establecen los procedimientos, equipos y valores a recolectar en

los ensayos de contenido de humedad, densidad tensión paralela a la fibra.

Utilizando los resultados de la investigación y las características geométricas de los especímenes se aplicó un desarrollo teórico basado en la teoría general de vigas, analizando por separado el modo de falla por cortante y por momento, obteniendo para cada viga la carga máxima teórica y las deflexiones elásticas. Estos valores se comparan con los determinados experimentalmente.

Con los resultados experimentales y teóricos se analiza el comportamiento estructural de los especímenes y el efecto que tuvo la colocación del refuerzo de bambú laminado.

No se encontraron registros de investigaciones previas teóricas o practicas del problema tratado en este trabajo hechas en Costa Rica.

Fuera del país, se tuvo acceso a un trabajo realizado en Brasil por Lima et. al¹⁶. En dicha investigación se realizo un análisis teórico y experimental de vigas de madera reforzadas con bambú. Se utilizo madera de *Pinus elliottii* y como refuerzo bambú *Dendrocalamus giganteus*.

Se utilizaron diferentes espesores de bambú. Como resultado se observo un aumento máximo de 50% en la rigidez de las vigas con presencia de refuerzo.

¹⁶ Lima, H. Dias, A. 2001. **Vigas mistas de madeira de reflorestamento e bambú laminado colado: análise teórica e experimental.** Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental. v5. n3. p519-524.

Metodología

A continuación se describe de manera detallada los métodos y materiales utilizados en el desarrollo del presente proyecto.

El proyecto se desarrolló en el periodo de Febrero - Octubre 2011. La ejecución de las principales fases se dio en las instalaciones del Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción CIVCO del Instituto Tecnológico de Costa Rica y en las instalaciones de la empresa Grupo Xilo ubicada en el Alto de Ochomogo, Cartago.

La metodología utilizada en este trabajo para estudiar el comportamiento a flexión de vigas laminadas de Pino Radiata reforzadas con Bambú Guadua fue la siguiente:

1-Revisión bibliográfica, consultas a expertos.

2-Preparación del Bambú Guadua para su caracterización.

3-Elaboración de vigas con y sin refuerzo. Registro de defectos.

4-Modos de falla teóricos:

-Capacidad teórica de las vigas en Flexión.

-Capacidad teórica de las vigas en Cortante.

-Deflexión elástica teórica máxima en el centro del claro

5-Marco experimental:

-Caracterización del bambú mediante ensayos físico-mecánicos.

-Falla en flexión de vigas de madera reforzadas con bambú

-Falla en flexión de vigas de madera

1- Revisión bibliográfica y consultas a expertos

Se realizó una amplia investigación bibliográfica de los dos materiales fundamentales involucrados en esta investigación: Bambú Guadua y Pino Radiata.

Para ambos materiales se dio énfasis al estudio de las propiedades físico-mecánicas ya que éstas son pilares fundamentales en el desarrollo del presente estudio. El resumen que se incluye en esta investigación contempla conceptos básicos de ambos materiales en general, características propias de su estructura biológica y, por último, una amplia caracterización del Bambú Guadua desde el punto de vista de su resistencia mecánica ante diferentes solicitaciones. La información se basó en estudios realizados en Costa Rica y otros países como Colombia y Holanda. Para el caso del Pino Radiata, al tratarse de una madera de importación de origen chileno, la investigación se basó en estudios realizados en ese país, en el cual las características de éste tipo de madera se encuentran debidamente documentadas en la norma NCh 1198-2006 "Madera-Construcciones en madera-Cálculo". Y en datos presentados por Tuck³.

Como complemento se realizó una entrevista al ingeniero Guillermo González Beltrán PhD, director del área de laboratorios del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME) de la Universidad de Costa Rica, quien posee amplia experiencia en investigaciones que involucra madera y bambú.

2- Preparación del Bambú Guadua para su caracterización

Con el fin de caracterizar el material de que se disponía para realizar este estudio y comparar datos con lo reportado en la literatura, se procedió a procesar cañas de bambú. La procedencia del material fue desconocida, se tuvo certeza de que ese material estuvo almacenado por largo tiempo en las instalaciones del CIVCO.

El bambú se proceso hasta lograr láminas con una sección transversal rectangular de dimensiones aproximadas de 25 mm x 7.5 mm.

El culmo o caña, como se muestra en la Figura 20, se seccionó longitudinalmente en láminas correspondientes a segmentos de la circunferencia de la caña con un ancho determinado. Esto se logra mediante un sistema mecánico, que consiste de un motor que mediante una polea desliza una placa de apoyo (Figura 21), este deslizamiento provoca la compresión de la caña contra una serie de cuchillas (Figura 22) que la divide en 6 partes longitudinales. La Figura 23 resume gráficamente este proceso.



Figura 20. Bambú Guadua en estado seco al aire.



Figura 21. Placa de apoyo deslizante.



Figura 22 .Cuchillas encargadas de dividir la caña de bambú.

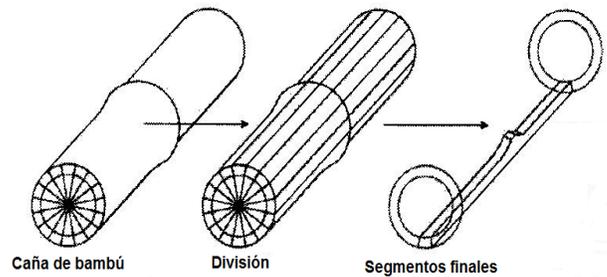


Figura 23. Proceso de división de una caña de bambú.

Al tener segmentada la caña, cada uno de los elementos obtenidos son introducidos en una máquina cepilladora, que posee una serie de cuchillas (Figura 24) que se encargan de cortar el bambú.

Cuenta con 4 cuchillas de este tipo, una para cada canto, al desgastar el elemento por sus cuatro costados se obtiene un acabado de lámina, con sección transversal rectangular, este proceso se resume gráficamente en la Figura 25.

Con el bambú preparado en láminas (Figura 26) se procede a la etapa de caracterización.



Figura 24. Cuchillas encargadas de cepillar los segmentos de la caña de bambú.

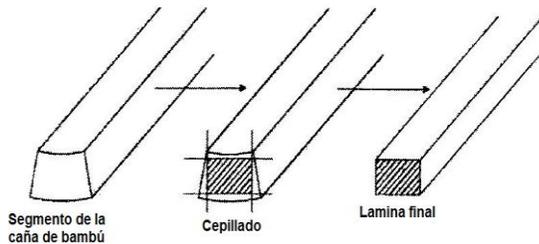


Figura 25. Proceso de cepillado



Figura 26. Producto final, láminas de Bambú Guadua.

3- Elaboración de vigas con y sin refuerzo

Para determinar el aporte del bambú utilizado como refuerzo en vigas de Pino Radiata, se fabricaron vigas de Pino Radiata con y sin

refuerzo con sección transversal semejante a la mostrada en la Figura 27 y la Figura 28 respectivamente. Las probetas fueron fabricadas por la empresa Xilo, de forma que se elaboraron según el proceso productivo que ellos normalmente utilizan para las vigas laminadas de Pino Radita. Fueron elaboradas 10 probetas de cada tipo. Las dimensiones de las vigas responden a la norma ASTM D143. Se cumplió con la relación claro-peralte utilizada para ensayos de flexión estática en vigas de madera.

Según esta norma los especímenes utilizados para madera deben tener una sección transversal de 50 x 50 mm y un claro de 760 mm, por lo tanto una relación claro entre peralte de 15.2. La sección transversal final estuvo fuertemente asociada a las dimensiones comerciales de la madera disponible en la empresa Grupo Xilo.

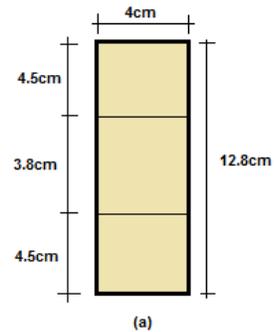


Figura 27. Especímenes considerados. Viga sin reforzar

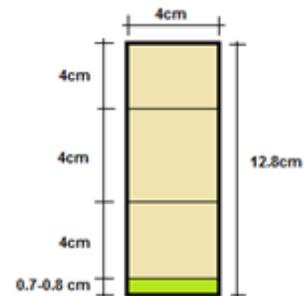


Figura 28. Especímenes considerados. Viga con refuerzo en tensión

Las láminas fueron colocadas una contigua a la otra sin aplicar pegamento. El detalle se muestra en la Figura 29.

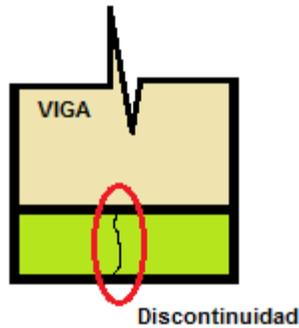


Figura 29. Sección transversal de la viga con refuerzo. Se muestra la posición de las laminas de bambú.

3.1- Caracterización de los especímenes

Los especímenes se identificaron mediante un código en el cual VR = viga reforzada con indicación adicional de una letra de la A a la J; y VS = vigas sin refuerzo enumeradas de 1 a 10.

3.2- Inspección de los especímenes

Se definió defecto como una irregularidad física o química que afecte su aspecto, resistencia o durabilidad.

Nudos: Se marcaron en el espécimen y se registró su ubicación. Para mayor detalle se puede consultar el Apéndice 1.

Alabeos: La medición y registro de los alabeos se realizó en distintos puntos de las vigas. Se estableció como procedimiento colocar una cuerda tensa entre los extremos de cada espécimen y registrar las desviaciones de la viga con respecto a la cuerda.

4- Modos de falla teóricos

Para poder comprender la naturaleza de los esfuerzos y estimar la carga máxima teórica que se desarrolla en los especímenes es recomendado utilizar una teoría que se ajuste a la configuración de cargas del ensayo. Para este trabajo se limitó a teorías elásticas.

El valor de carga máxima teórica varía según la localización y el modo de falla, por lo tanto, se obtuvieron varias estimaciones en distintas localizaciones bajo diferentes modos de falla y escoger el valor más bajo como carga máxima estimada.

Para los especímenes estudiados en este trabajo se estimó el valor de carga máxima teórica bajo el modo de falla de flexión y cortante.

En el caso de la flexión, se estimó el momento máximo teórico. La Figura 30 muestra los sectores donde se aplicaron los modos de falla en las vigas.

Para determinar la capacidad de cara teórica de cada tipo de viga primero se define las propiedades mecánicas. En el caso del bambú, estas son obtenidas experimentalmente mediante los ensayos anteriormente expuestos, en la sección de resultados se aprecian los datos obtenidos.

En el caso de la madera se utilizaran valores reportados en la literatura

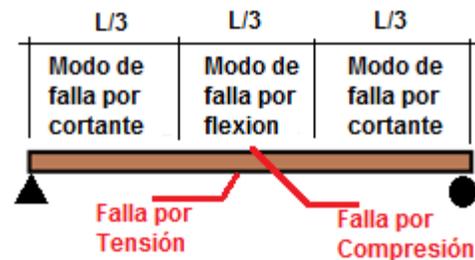


Figura 30. Zonas donde se estima la carga máxima teórica

4.1- Modo de falla teórico en flexión

En cualquier sección transversal existen fuerzas internas que pueden descomponerse en fuerzas normales y tangenciales a la sección. Los componentes normales a la sección son los esfuerzos de flexión (tensión en un lado del eje neutro y compresión del otro); su función es la de resistir el momento flector que actúa en la sección y son de interés primordial en esta investigación.

Para determinar la capacidad en flexión teórica tanto de una viga simple de Pino Radiata como de una viga compuesta de Bambú Guadua y Pino Radiata se determinaron los esfuerzos normales en la sección transversal. Para lograrlo se partió de una serie de supuestos respecto al comportamiento mecánico.

Estos supuestos fundamentales fueron:

- ✓ Una sección transversal plana antes de la aplicación de cargas se mantiene plana

posteriormente a la aplicación de cargas. Es decir las deformaciones unitarias en la sección transversal de la viga, por encima y por debajo del eje neutro, son proporcionales a la distancia desde el eje neutro.

- ✓ El esfuerzo de flexión en cualquier punto depende de la deformación unitaria en dicho punto, de la misma manera que en el diagrama esfuerzo-deformación del material. Es decir se aplica la Ley de Hooke :

$$\sigma = \epsilon * E \quad [\text{kg} / \text{cm}^2] \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

σ : esfuerzo en un punto determinado de la sección transversal.
 ϵ : deformación unitaria
 E : módulo de elasticidad del material.

- ✓ Cuando los esfuerzos en las fibras exteriores son menores que el límite de proporcionalidad, la viga se comporta elásticamente. En este caso puede afirmarse que:
 1. El eje neutro pasa a través del centro de gravedad de la sección transversal.
 2. La magnitud de los esfuerzos de flexión normales a la sección aumenta directamente con la distancia desde el eje neutro y es máxima en las fibras externas. El esfuerzo en cualquier punto está presentado por la ecuación:

$$f_b = M * c / I \quad [\text{kg} / \text{cm}^2] \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

f_b : Esfuerzo por flexión
 M : Momento flector interno en la sección
 I : Momento de inercia de la sección
 c : Distancia desde el eje neutro hasta el punto en cuestión

- ✓ Existe compatibilidad de deformaciones unitarias entre las láminas de refuerzo

(bambú) y la madera en todo nivel, es decir las capas no se deslizan una respecto a la otra.

- ✓ Se asume que las láminas de bambú se comportan como un único elemento, no se presentan discontinuidades en los puntos de contacto entre lámina y lámina.

Se consideraron las limitaciones de la teoría de flexión que fue desarrollada para un material elástico, homogéneo e isotrópico. Ni el bambú ni la madera cumplen con estos requisitos, además la expresión para calcular esfuerzos en vigas homogéneas, elásticas e isotrópicas (Ecuación 1) no es aplicable directamente a este tipo de vigas ya que son compuestas por dos materiales.

Para analizar una viga compuesta de dos materiales o más se usó el método de la sección transformada. Básicamente consiste en transformar una sección compuesta de un número determinado de materiales, en una conformada por un único material a la cual es posible aplicar la ecuación para flexión simple (Ecuación 2). Se definió la relación de módulos como:

$$n = E_1 / E_2 \quad [\text{Adimensional}] \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde

E_1 : Módulo de elasticidad del material 1
 E_2 : Módulo de elasticidad del material 2

Para los cálculos previos se utilizan las propiedades mecánicas mostradas en el Cuadro 24.

Cuadro 24. Propiedades mecánicas de los materiales a utilizar en los cálculos teóricos.		
Pino Radiata (CH=17.2%)		Fuente
MOR (kg/cm ²)	755.30	Referencia 2
MOE (kg/cm ²)	87800.50	Referencia 2
τ (kg/cm ²)	103.10	Referencia 2
Bambú Guadua (considerando el efecto de los nudos)		Fuente
σ Tensión (kg/cm ²)	1000.00	El autor
MOE (kg/cm ²)	125965	El autor

4.1.1-Vigas sin refuerzo

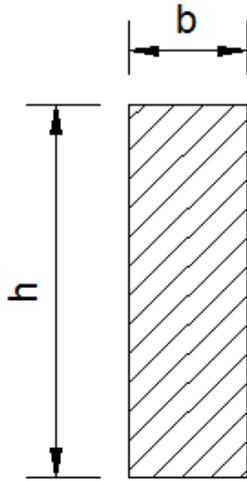


Figura 31. Configuración de la sección transversal de las vigas sin refuerzo

La capacidad en flexión de la viga mostrada anteriormente se calcula utilizando el siguiente procedimiento:

$$M_{\max} = \text{MOR} \cdot I / c \quad [\text{kg}\cdot\text{m}] \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

MOR: módulo de ruptura para Pino Radiata [kg/cm^2]

Inercia de la sección:

$$I = 1/12 \cdot b \cdot h^3 \quad [\text{cm}^4] \quad \text{Ecuación 5}$$

Distancia a la fibra extrema:

$$c = h/2 \quad [\text{cm}] \quad \text{Ecuación 6}$$

4.1.2-Vigas con refuerzo a tensión

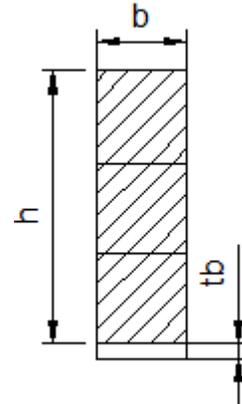


Figura 32. Configuración de la sección transversal de las vigas refuerzo a tensión

Utilizando el concepto de sección transformada, se obtiene una sección hipotética compuesta únicamente de un material. Esto permite ubicar el eje neutro de la sección real.

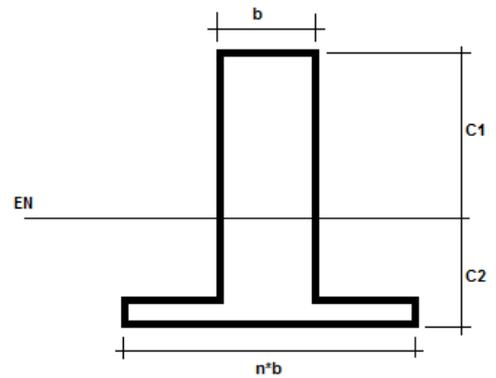


Figura 33. Sección transformada

Relación de módulos:

$$n = E_{bt} / E_m \quad \text{Ecuación 7}$$

Ubicación del centroide de la sección transformada:

$$\bar{y} = \frac{b \cdot c_1^2 \cdot \frac{c_1}{2} + n \cdot b \cdot c_2 \cdot (c_1 + \frac{c_2}{2})}{b \cdot c_1 + n \cdot b \cdot c_2} \quad [\text{cm}] \quad \text{Ecuación 8}$$

$$C1 = h + tb - C2 \quad [\text{cm}] \quad \text{Ecuación 9}$$

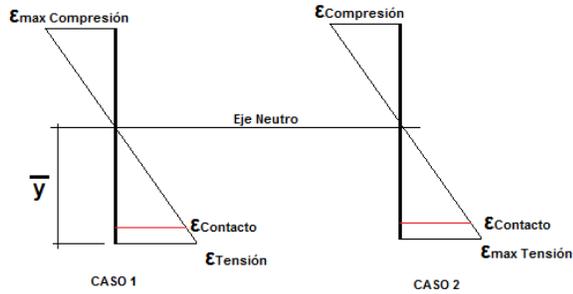


Figura 34. Distribución de deformaciones unitarias

La Figura 34 muestra la distribución de deformaciones unitarias consideradas en el análisis. En el Caso 1 se considera la deformación máxima en la madera (Compresión) y en el Caso 2 se considera la deformación máxima en el bambú (Tensión). En ambos casos la deformación varía linealmente a partir del principio de que las secciones permanecen planas durante la flexión.

Se analizan ambos casos determinando la capacidad de carga teórica de la viga, regirá el valor mínimo obtenido entre los dos casos.

CASO 1

Se realizó la distribución de deformaciones unitarias a partir de la deformación máxima de compresión que soporta la madera. El análisis realizado es elástico, por lo tanto se aplica la ley de Hooke.

Deformación máxima en compresión [cm/cm]:

$$\epsilon_{\text{max Compresión}} = \text{MOR} / E_m \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

MOR: Módulo de ruptura de la madera
 E_m : Módulo de elasticidad de la madera

Deformación en la fibra extrema de tensión [cm/cm]:

$$\frac{\epsilon_{\text{max Compresión}} \cdot y}{y_{\text{ext}}} \quad \text{Ecuación 11}$$

Deformación en la superficie de contacto:

$$\frac{\epsilon_{\text{max Compresión}} \cdot y_{\text{contacto}}}{y_{\text{ext}}} \quad \text{Ecuación 12}$$

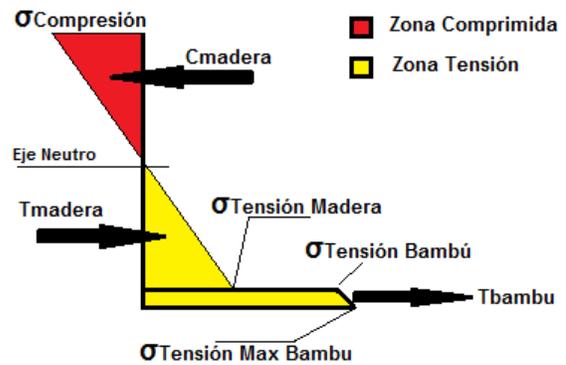


Figura 35. Distribución de esfuerzos en la sección real de la viga reforzada

La Figura 35 muestra la distribución de esfuerzos (de tensión y compresión) en la sección transversal de la viga. Nuevamente, partiendo del supuesto de que se comporta elásticamente, cada deformación unitaria en la sección multiplicada por el módulo de elasticidad del correspondiente material resulta en un esfuerzo (Ley de Hooke).

A partir de lo anterior se calcularon los esfuerzos [kg / cm²] en los materiales de la siguiente forma:

$$\sigma_{\text{Compresión}} = E_m \cdot \epsilon_{\text{max Compresión}} \quad \text{Ecuación 13}$$

$$\sigma_{\text{Tensión Madera}} = E_m \cdot \epsilon_{\text{Contacto}} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$\sigma_{\text{Tensión Bambú}} = E_b \cdot \epsilon_{\text{Contacto}} \quad \text{Ecuación 15}$$

$$\sigma_{\text{Tensión Max Bambú}} = E_b \cdot \epsilon_{\text{Tensión}} \quad \text{Ecuación 16}$$

Determinados dichos esfuerzos fue posible determinar las fuerzas resultantes [kg] de tensión y compresión.

$$C_{\text{madera}} = \frac{\sigma_{\text{Compresión}} \cdot A_{\text{madera}}}{2} \quad \text{Ecuación 17}$$

$$T_{\text{madera}} = \frac{\sigma_{\text{Tensión Madera}} \cdot A_{\text{madera}}}{2} \quad \text{Ecuación 18}$$

$$T_{\text{bambu}} = \frac{\sigma_{\text{Tensión Bambú}} \cdot A_{\text{bambu}}}{2} \quad \text{Ecuación 19}$$

Cada resultante define un momento respecto al eje neutro de la sección. En la siguiente figura se muestran los brazos de

palanca de cada una de las resultantes definidas anteriormente.

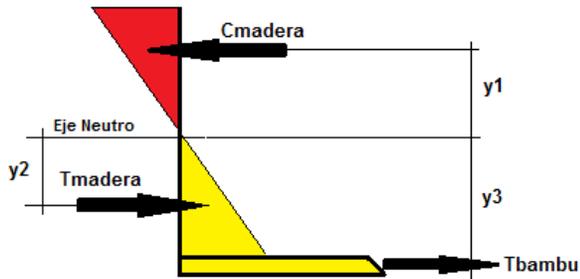


Figura 36. Esquema de los brazos de palanca de cada resultante.

Cada brazo de palanca se mide desde el eje neutro de la sección hasta el centroide de cada prisma de esfuerzos. Como se aprecia en la Figura 36 dichos prismas son dos triángulos rectángulos y un trapecio. Para el caso del trapecio se toma hasta la mitad del espesor del refuerzo (tb) con el fin de simplificar el cálculo sin que haya un gran error.

$$Y1 = \frac{2}{3} * (h + t_b - \bar{y}) \quad [\text{cm}] \quad \text{Ecuación 20}$$

$$Y2 = \frac{2}{3} * (\bar{y} - t_b) \quad [\text{cm}] \quad \text{Ecuación 21}$$

$$Y3 = \bar{y} - (t_b / 2) \quad [\text{cm}] \quad \text{Ecuación 22}$$

El momento máximo teórico resistente [kg-m] de la sección se determina sumando momentos respecto al eje neutro, esto es:

$$M_{\text{max.teo}_1} = C_{\text{madera}} * Y1 + T_{\text{madera}} * Y2 + T_{\text{bambu}} * Y3 \quad \text{Ecuación 23}$$

Se le asignó un subíndice 1 al momento para diferenciar que corresponde al caso de análisis 1.

CASO 2

Se realizó la distribución de deformaciones unitarias a partir de la deformación máxima de tensión que soporta el bambú. El análisis realizado es elástico, por lo tanto se aplica la ley de Hooke.

Deformación máxima en compresión:

$$\epsilon_{\text{max Tensión}} = \sigma_{\text{ultimo}} / E_b \quad \text{Ecuación 24}$$

Donde:

σ_{ultimo} : Esfuerzo de tensión último del bambú determinado experimentalmente

E_b : Módulo de elasticidad en tensión del bambú determinado experimentalmente

Deformación en la fibra extrema de tensión:

$$\epsilon_{\text{extrema}} = \frac{\sigma_{\text{extrema}}}{E_b} \quad \text{Ecuación 25}$$

Deformación en la superficie de contacto:

$$\epsilon_{\text{contacto}} = \frac{\sigma_{\text{contacto}}}{E_b} \quad \text{Ecuación 26}$$

La Figura 35 utilizada en el Caso 1 es aplicable. Se muestra la distribución de esfuerzos (de tensión o compresión) en la sección transversal de la viga. Nuevamente partiendo del supuesto de que se comporta elásticamente, cada deformación unitaria en la sección multiplicada por el módulo de elasticidad del correspondiente material resulta en un esfuerzo (Ley de Hooke).

A partir de lo anterior se calcularon los esfuerzos [kg/cm²] en los materiales de la siguiente forma:

$$\sigma_{\text{Compresión}} = E_m * \epsilon_{\text{Compresión}} \quad \text{Ecuación 27}$$

$$\sigma_{\text{TensiónMadera}} = E_m * \epsilon_{\text{Contacto}} \quad \text{Ecuación 28}$$

$$\sigma_{\text{TensiónBambu}} = E_b * \epsilon_{\text{Contacto}} \quad \text{Ecuación 29}$$

$$\sigma_{\text{TensiónMaxBambu}} = E_b * \epsilon_{\text{MaxTensión}} \quad \text{Ecuación 30}$$

Determinados los esfuerzos se determinan las fuerzas resultantes de tensión y compresión [kg].

$$C_{\text{madera}} = \frac{\sigma_{\text{Compresión}} * A_{\text{madera}}}{2} \quad \text{Ecuación 31}$$

$$T_{\text{madera}} = \frac{\sigma_{\text{TensiónMadera}} * A_{\text{madera}}}{2} \quad \text{Ecuación 32}$$

$$T_{\text{bambu}} = \text{-----}$$

Ecuación 33

Cada resultante define un momento respecto al eje neutro de la sección. En la siguiente figura se muestran los brazos de palanca de cada una de las resultantes definidas anteriormente.

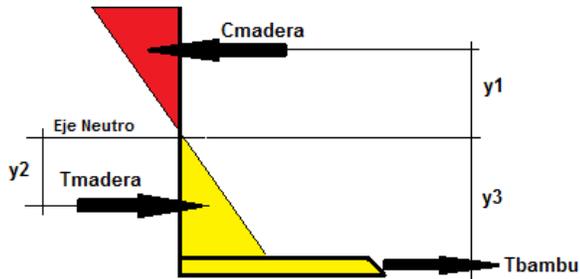


Figura 37. Esquema de los brazos de palanca de cada resultante

Cada brazo de palanca se mide desde el eje neutro de la sección hasta el centroide de cada prisma de esfuerzos. Como se aprecia en la figura dichos prismas son dos triángulos rectángulos y un trapecio. Para el caso del trapecio se toma hasta la mitad del espesor del refuerzo (t_b) con el fin de simplificar el cálculo sin que haya un gran error.

$$Y1 = \frac{2}{3} * (h + t_b - \bar{y}) \quad [\text{cm}] \quad \text{Ecuación 34}$$

$$Y2 = \frac{2}{3} * (\bar{y} - t_b) \quad [\text{cm}] \quad \text{Ecuación 35}$$

$$Y3 = \bar{y} - (t_b / 2) \quad [\text{cm}] \quad \text{Ecuación 36}$$

El momento máximo teórico resistente [kg-m] de la sección se determina sumando momentos respecto al eje neutro, esto es:

$$M_{\text{max.teo}2} = C_{\text{madera}} * Y1 + T_{\text{madera}} * Y2 + T_{\text{bambu}} * Y3 \quad \text{Ecuación 37}$$

Fue asignado un sub índice igual a 2 al momento para diferenciar que corresponde al caso de análisis 2.

4.2- Modo de falla teórico en cortante

El cortante en vigas fue de gran importancia ya que debido al adhesivo que une las distintas partes de la viga, debe ser capaz de soportar el efecto del cortante en las uniones.

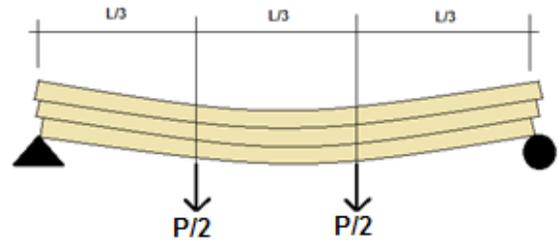


Figura 38. Deslizamiento por falla de adhesivo en una viga compuesta.

El desarrollo de las ecuaciones analíticas para obtener el esfuerzo cortante requiere de un desarrollo matemático que no se considera de relevancia en este trabajo. Basta decir que, para obtener el esfuerzo cortante aplicado en un plano longitudinal paralelo al eje neutro como se muestra en la Figura 38, se aplica la siguiente ecuación:

$$\text{-----} \quad \text{Ecuación 38}$$

Se sabe que $Q = \int y dA = A * y$

Debe recordarse que el cortante máximo se desarrolla en los tercios extremos de la viga y que tiene un valor igual a $P/2$. Por lo tanto $V = P/2$.

Donde:

- V: cortante en los tercios extremos de la viga.
- Q: primer momento de un área A respecto al eje neutro
- Y: distancia desde el eje neutro hasta el centroide de A
- t: espesor de la viga o plano considerado
- I: Momento de inercia de la sección.

4.2.1-Vigas sin refuerzo

Para el caso de las vigas de madera sin refuerzo se utilizó una simplificación de la Ecuación 38 para el caso de vigas rectangulares.

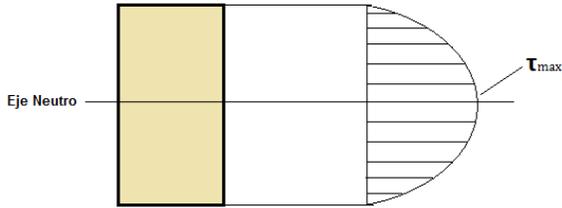


Figura 39. Distribución de esfuerzos cortantes en una viga de sección transversal rectangular.

Como se aprecia en la figura anterior el cortante máximo por flexión en una viga homogénea de sección rectangular coincide con el plano que contiene el eje neutro.

Sustituyendo en la Ecuación 38 los valores correspondientes a una sección rectangular, se obtiene la siguiente fórmula:

-- Ecuación 39

Donde:

V: cortante en un determinado punto de la viga.
A: área de la sección transversal rectangular.

La Ecuación 39 muestra que el esfuerzo cortante máximo en una viga de sección rectangular compuesta de un material homogéneo, elástico e isotrópico es 1.5 veces el cortante promedio V/A .

La carga máxima teórica considerando la capacidad a cortante se obtiene despejando la Ecuación 39 con $V=P/2$.

$P_{max,teo} = \dots$ [kg] Ecuación 40

Donde:

: esfuerzo cortante para la madera

A: área de la sección transversal

5.2.2-Vigas con refuerzo a tensión

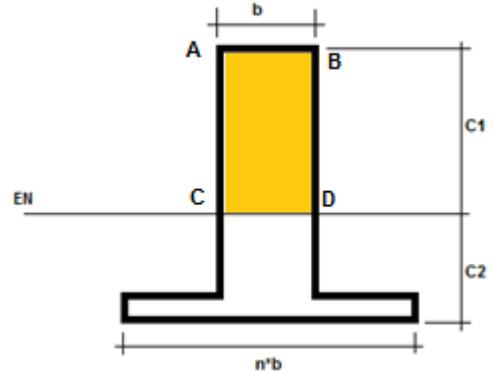


Figura 40. Cálculo del primer momento de área para la sección transformada.

El primer momento de área para A_{ABCD} :

$Q_{ABCD} = b \cdot C1 \cdot (C1/2)$ Ecuación 41

La carga máxima teórica por cortante se obtuvo despejando V de la Ecuación 38. La variable se sustituye por f_v que es el esfuerzo cortante permisible para la madera, y se debe considerar que el cortante máximo que se desarrolla en la viga es $P/2$.

$P_{max,teo} = 2 \cdot \dots$ [kg] Ecuación 42

$I = \dots$ [cm⁴] Ecuación 43

Donde:

I: momento de inercia respecto al eje neutro de la sección transformada

5.3- Deflexiones elásticas teóricas

El desarrollo teórico para establecer las ecuaciones analíticas y obtener la curva elástica para una viga, se basa en la integración directa de la expresión algebraica del momento flector y las condiciones de frontera. Se presentan las

formulas recomendadas por Popov¹⁷ para obtener las deflexiones elásticas teóricas.

Deflexión elástica teórica en el centro de la viga, cuando esta encuentra sometida a dos cargas iguales en sus tercios medios (δ_{teo}):

$$\delta_{teo} = \frac{PL^3}{48EI} \quad \text{[cm]} \quad \text{Ecuación 44}$$

En la ecuación anterior debe sustituirse el valor de P por P/2 ya que esta es la carga que transmite la máquina de ensayos en los tercios medios. Por lo tanto:

$$\delta_{teo} = \frac{PL^3}{96EI} \quad \text{[cm]} \quad \text{Ecuación 45}$$

Las deflexiones elásticas máximas estimadas con la Ecuación 45 no son comparables con la deflexión última registrada en la prueba experimental, debido a que las deflexiones experimentales no se limitan a un comportamiento elástico, por lo tanto, se obtiene la pendiente de la curva teórica de carga vs deflexión (P vs $\delta_{1,teo}$).

$$\frac{P}{\delta_{1,teo}} = \frac{96EI}{L^3} \quad \text{[kg/cm]} \quad \text{Ecuación 46}$$

Los valores de la pendiente obtenidos con la ecuación anterior se compararon con la pendiente del sector lineal de la curva experimental de carga vs deflexión de cada viga.

Donde

P: Mínimo (Capacidad modo de falla flexión,

Capacidad modo de falla cortante)

I: Inercia de la sección

E: Módulo de elasticidad

5- Marco experimental

5.1- Caracterización del bambú mediante ensayos físico-mecánicos

Es importante destacar que para el bambú utilizado en este estudio no se contó información precisa respecto a su origen ni tampoco a su edad. Además, las muestras utilizadas en los

ensayos no siguieron un proceso de muestreo en su extracción que considerara la posición en la caña (parte alta, media o baja), cantidad de cañas acorde al tamaño de la plantación, entre otros. Lo que si se conoce con certeza es que pertenece a la especie Guadua. El objetivo de realizar estos ensayos de caracterización físico – mecánica del material disponible es comparar con lo que indica la literatura.

El material fue provisto por la empresa y, previo a la utilización, se encontraba almacenado en un sitio expuesto a la intemperie y en contacto directo con el suelo. Probablemente el material sufrió ciclos de humedecimiento y secado en muchas ocasiones, por lo que pudo haber sufrido deterioro debido al periodo que estuvo bajo esas condiciones. El material se caracterizó mediante pruebas exploratorias que permitieron determinar y comparar con la literatura las propiedades físico - mecánicas de interés para esta investigación del bambú a ser utilizado.

Las pruebas de laboratorio se basaron en la norma internacional ISO/TR 22157.2.2003 “Bamboo-determination of physical and mechanical properties”; específicamente:

- Ensayo para la determinación de la densidad y el contenido de humedad
- Ensayo en tensión sobre muestras con y sin nudo
- Ensayo de compresión.

Para cada uno de los ensayos, se determinaron las dimensiones de las probetas mediante un vernier o pie de rey con precisión de $\pm 0.01\text{mm}$ (Figura 41).



Figura 41. Vernier digital.

¹⁷ Popov, E. 2000. **Mecánica del Sólido**. Pearson Education, México, Segunda edición.

5.1.1- Densidad (ρ) y Contenido de humedad (CH)

Se siguió el procedimiento establecido en la sección 6 de la norma ISO/TR 22157,2:2003.

Para su determinación se requirió de muestras de bambú con forma prismática, a las cuales se les determinó su volumen. Además se utilizó una balanza digital (Figura 42) con precisión de 0.01 g y de un horno eléctrico de secado.

Las muestras se dejaron en el horno durante 24 horas a una temperatura de 103 ± 2 °C. Posteriormente se extrajeron del horno, se dejaron enfriar y se pesaron, hasta que el peso fue constante. Las muestras fueron pesadas en más de una ocasión hasta que no se apreció un cambio importante en el peso. La norma no especifica que sea necesario presentar los resultados en función de humedad ambiental.



Figura 42. Balanza digital necesaria para determinar contenido de humedad y densidad.

Las características de las probetas utilizadas en este ensayo se muestran en el Cuadro 25.

A partir de esos datos y mediante las siguientes ecuaciones se determinó el contenido de humedad y la densidad:

$$VSA = E \cdot A \cdot H \quad \text{Ecuación 47}$$

$$CH = [(M - M_0) / M_0] \cdot 100 \quad \text{Ecuación 48}$$

$$\rho = M / VSA \quad \text{Ecuación 49}$$

Donde :

VSA: volumen seco al aire

E: espesor

A: ancho

H: altura

CH: contenido de humedad

M: masa de la muestra después del secado

M₀: masa inicial

P: densidad

Cuadro 25. Dimensiones de las probetas para la determinación de la Densidad y Contenido de Humedad				
Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Altura (mm)	Masa inicial (g)
1.00	7.60	24.78	64.14	10.26
2.00	7.59	23.51	63.71	8.27
3.00	7.68	23.06	65.82	7.52
4.00	7.95	24.80	62.93	8.88
5.00	7.54	23.69	67.35	7.86
6.00	7.79	24.44	66.34	9.34
7.00	7.62	24.67	64.40	9.28
8.00	7.44	19.28	68.11	7.59
9.00	7.64	20.32	65.88	7.50
10.00	7.94	24.48	66.39	9.21
11.00	8.06	24.40	69.51	9.49
12.00	7.82	24.22	64.77	7.92
13.00	7.77	23.90	65.46	7.94
14.00	7.88	25.09	64.96	8.75
15.00	8.04	24.44	65.22	9.43

5.2- Resistencia a la tensión paralela a la fibra

Para determinar la resistencia del bambú ante cargas de tensión, se elaboraron probetas con forma y dimensiones acordes a la sección 12 de la norma ISO/TR 22157,2:2003.

Se ensayaron muestras con y sin nudo en el centro de la probeta en una máquina de ensayos (Figura 43) mediante la cual la carga se aplicó a una velocidad de 0.01 mm/s.



Figura 43 .Máquina de ensayos. Versa Tester

Para determinar el módulo de elasticidad la norma específica que se debe utilizar una galga extensométrica. Esta es un sensor basado en el efecto de que un esfuerzo que deforma a la galga produce una variación en su resistencia eléctrica. Son sistemas electrónicos que permiten controlar deformaciones.

En este trabajo la obtención del módulo de elasticidad se realizó mediante un extensómetro analógico, por lo que la lectura de deformaciones estuvo acompañada de una alta incertidumbre.

Las dimensiones de los especímenes utilizados en ensayos de tensión sin nudo se muestran en la Figura 44. Para el caso de muestras con nudo se utilizaron muestras sin la reducción de área en el centro de la probeta, esto debido a que el nudo propicia una zona débil que garantiza la falla en esa zona. Algunas probetas utilizadas en los ensayos se muestran en la Figura 45.

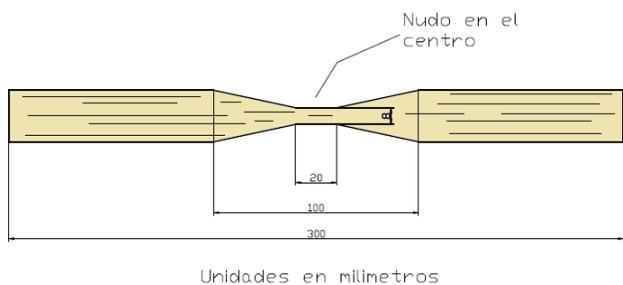


Figura 44 .Probeta para ensayos en tensión según norma ISO/TR 2215, 2:2003.

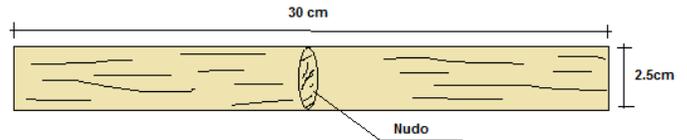


Figura 45 .Probeta para ensayos en tensión con nudo en el centro.



Figura 46. Probetas utilizadas en ensayos de tensión sin nudo.

Para cada probeta se determinó el área de la sección transversal en el estrangulamiento para el caso de las probetas sin nudo y en la sección central en el caso de probetas con nudo.

Se utilizó el promedio de tres medidas diferentes en dicha posición.

Para las probetas con estrangulamiento sin nudo en el centro se tuvo un área de sección transversal promedio de 0.64 cm².

Para las probetas sin estrangulamiento y con nudo en el centro se tuvo un área de sección transversal promedio de 1.64 cm².

La capacidad a tensión se determinó para ambos tipos de probeta (con nudo y sin nudo) de la siguiente manera:

$$\sigma_{tu} = Pu / A \quad [\text{kg/cm}^2] \quad \text{Ecuación 50}$$

Donde:

σ_{tu} : esfuerzo último en tensión

Pu: carga última en la falla
 A: área de la sección transversal en el estrangulamiento

El módulo de elasticidad en tensión fue determinado mediante un gráfico esfuerzo versus deformación unitaria. Este gráfico se obtuvo tomando lecturas de carga y deformación durante la ejecución del ensayo. El módulo de elasticidad se determinó como la pendiente entre el 20% y el 80% de σ_u . En la Figura 35 se muestran los datos requeridos para el cálculo.

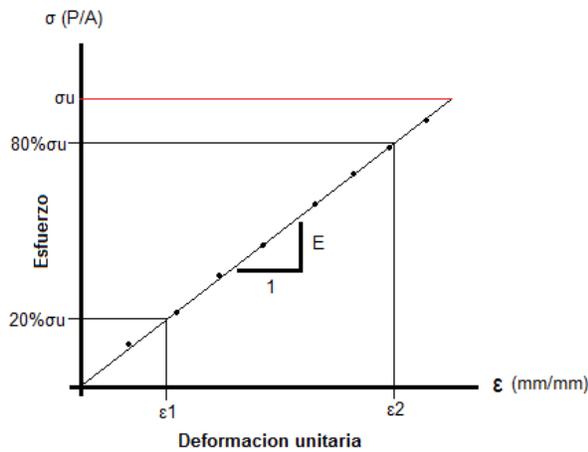


Figura 47. Curva esfuerzo versus deformación

El módulo de elasticidad [kg/cm^2] se calculó de la siguiente manera:

$$E = (80\% \sigma_u - 20\% \sigma_u) / (\epsilon_2 - \epsilon_1) \quad \text{Ecuación 51}$$

Donde:

E: módulo de elasticidad

σ_u : esfuerzo último

ϵ_1 : deformación unitaria correspondiente al 20% del esfuerzo último en tensión

ϵ_2 : deformación unitaria correspondiente al 80% del esfuerzo último en tensión

5.3-Ensayo de compresión paralelo a la fibra.

En este ensayo es requisito indispensable cuantificar la deformación unitaria de los especímenes mediante galgas extensométricas. No fue posible contar con ese equipo, por esta razón se debió variar el ensayo y adecuarlo a las condiciones con que se contaba.

Se consultó al Ing. Guillermo González Beltrán acerca de la determinación de la capacidad en compresión en láminas de Bambú Guadua.

El Ing. González recomendó unir láminas formando un prisma, esto debido a que una única lámina es muy esbelta para ser sometida a compresión sin que falle por pandeo. Por lo tanto, para determinar la capacidad a la compresión del bambú, se decidió realizar ensayos con muestras con forma prismática producto de la unión de 3 láminas de bambú (Figura 48) con adhesivo estructural. Se propuso una altura tal que la falla fuera por aplastamiento y no por esbeltez. Para dimensionar los prismas se utilizó como referencia la norma ASTM D143 "Standart Test Methods for Small Clear Specimens of Timber", principalmente en lo concerniente a la relación de aspecto que se utilizó en los prismas de manera que no fuera necesario el uso de arriostamiento lateral ($\text{Altura/Radio de giro} < 17$), la Figura 48 muestra las dimensiones de la probeta utilizada. Se utilizó una máquina universal y un deformímetro para registrar la deformación. La carga se aplicó a una velocidad de 1.3 mm / min.

Al realizar el ensayo de esta forma no hubo garantía de que los resultados obtenidos fueran satisfactorios. Debido a la dificultad para tomar la deformación axial de la probeta mediante un deformímetro analógico convencional. También fueron perjudiciales las imperfecciones que poseían las caras que fueron cargadas por la máquina de ensayos.

Las dimensiones de las probetas con y sin nudo utilizadas en esta investigación se muestran en el Cuadro 26 y 27 respectivamente.

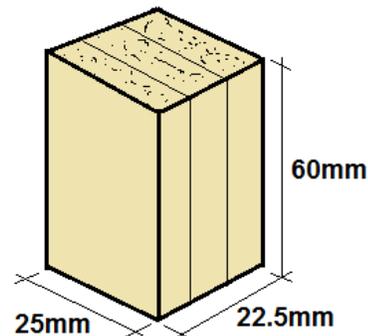


Figura 48. Dimensiones aproximadas de las probetas utilizadas en ensayos de compresión

Cuadro 26. Dimensiones de las muestras con nudo			
Muestra	Ancho (mm)	Largo (mm)	Altura (mm)
C-N-1	24.79	20.14	60.46
C-N-2	24.70	19.83	61.34
C-N-3	24.99	19.31	61.63
C-N-4	24.24	19.32	61.01
C-N-5	24.40	19.85	61.85

Cuadro 27. Dimensiones de las muestras sin nudo			
Muestra	Ancho (mm)	Largo (mm)	Altura (mm)
C-S-1	25.15	19.91	62.02
C-S-2	25.62	19.24	62.33
C-S-3	25.10	20.80	61.61
C-S-4	25.52	18.59	62.10
C-S-5	25.67	19.72	62.42
C-S-6	25.72	18.94	61.68
C-S-7	25.34	19.90	62.51
C-S-8	24.66	20.28	62.46
C-S-9	25.27	18.74	62.70
C-S-10	25.71	20.40	62.25
C-S-11	25.31	20.39	62.07
C-S-12	25.11	19.44	62.21
C-S-13	25.66	18.40	62.17
C-S-14	25.57	19.12	62.29
C-S-15	25.47	20.48	62.36

Al determinar el esfuerzo último en compresión se despreció la contribución de las líneas de cola y la capacidad en compresión se determinó de la siguiente manera:

$$\sigma_c = P_u / A \text{ [kg/cm}^2\text{]} \quad \text{Ecuación 52}$$

Donde:

P_u: carga axial última, determinada en el rango lineal.

A: área de la sección transversal sobre la cual se aplicó la carga.

El módulo de elasticidad en compresión se determinó mediante una gráfica de esfuerzo

versus deformación unitaria, calculando la pendiente de la recta de mejor ajuste.



Figura 37. Muestra utilizada en los ensayos de compresión.

5.4-Ensayos de flexión.

La última fase experimental consistió en determinar el aporte del bambú a la resistencia de vigas laminadas de Pino Radiata. Para ello se fallaron a flexión 10 vigas laminadas sin refuerzo y 10 vigas laminadas con refuerzo de bambú en la parte inferior (Figuras 27 y 28).

El montaje experimental fue basado en la norma ASTM-D198 "Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes". Específicamente lo referente a flexión estática, páginas 5-11 de la norma.

A continuación la terminología experimental de relevancia según la norma:

Viga de madera compuesta: elemento formado por una combinación de madera y otros materiales.

Longitud efectiva de la viga: la distancia total entre reacciones, en las cuales una viga es sostenida para soportar una carga transversal.

Peralte de la viga: dimensión de la viga perpendicular a la longitud efectiva y es paralela a la dirección en que la carga es aplicada.

Viga de madera estructural: vigas de madera sólida, laminada o miembros estructurales

compuestos, para los cuales la resistencia o rigidez, o ambos son los criterios primarios para una aplicación que normalmente usa al elemento en toda su longitud y los tamaños nominales de las secciones son mayores a 38 mm x 38 mm.

Contenido de humedad: Es la cantidad de agua contenida en la madera.

El montaje del ensayo se muestra en la Figura 50. Consistió en una estructura rígida para soportar el espécimen que permitiera la deflexión sin restricción. Además, se utilizaron bloques de carga para aplicar la fuerza sin producir altas concentraciones de esfuerzos y un dispositivo de medición de fuerza.

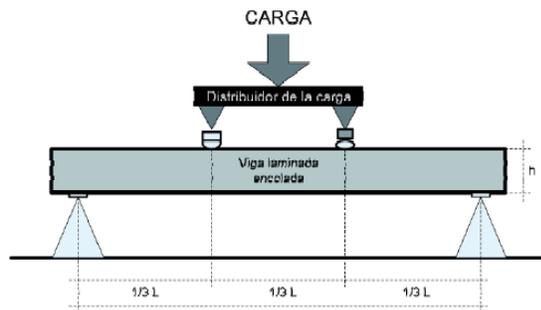


Figura 50. Ensayo de flexión estática
Fuente: ASTM D 198

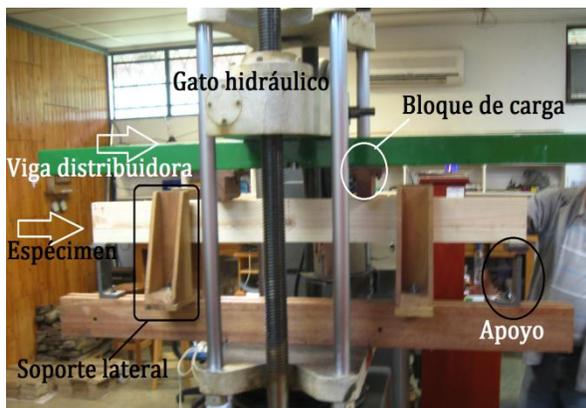


Figura 51. Montaje para los ensayos de laboratorio

Detalles del equipo:

- **Apoyos (Figura 52):** Son los soportes de la placa de reacción. Estos están restringidos longitudinalmente. Permiten

la rotación de la viga en los puntos de apoyo.



Figura 52. Detalle de uno de los apoyos

- **Placas de reacción (Figura 53):** Son placas metálicas para impedir que la probeta se dañe en el punto de contacto viga-apoyo. Permiten desplazamiento longitudinal de la viga.



Figura 53. Placa de apoyo

- **Soporte lateral (Figura 54):** Los especímenes pueden sufrir inestabilidad lateral durante el ensayo, por que se colocaron soportes laterales cerca de los puntos de aplicación de carga.



Figura 54. Soporte lateral.

- **Bloques de carga (Figura 55):** Son los dispositivos a través de los cuales se aplicó la carga a la superficie de viga. Estos deben cubrir todo el ancho de la viga para eliminar concentraciones de esfuerzos. Para este trabajo se escogió utilizar dos puntos de carga. La carga total se distribuye igualmente en dos puntos equidistantes de las reacciones.



Figura 55. Bloque de carga

- **Dispositivos de medición de deformaciones (Figura 56):** Se utilizó un dispositivo llamado LVDT “Linear Differential Variable Transformer” (Transformador lineal de diferencial de variable). Se colocó en el centro de la luz de la viga.



Figura 56. Deflectómetro (LVDT). Tinius Olsen



Figura 57. Colocación de deformímetro (LVDT).

La velocidad de carga según la norma se debe dar a una razón constante de la fibra exterior “z” para que se logre alcanzar la carga máxima en más de 10 minutos. La carga máxima no se debe alcanzar en menos de 6 minutos ni en más de 20 minutos.

Una razón constante de esfuerzo en la fibra exterior “z” de 0.001 mm/mm*min normalmente permite que las pruebas se completen en el tiempo prescrito. La razón de movimiento de los bloques de carga cuando la carga se aplica en dos puntos se puede calcular con la Ecuación 53 según ASTM D198.

Ecuación 53

Donde:

- N: razón de movimiento de los bloques de carga, en mm / min
- a: distancia desde las reacciones hasta los puntos de carga, en mm
- L: longitud efectiva de la viga, en mm
- h: altura de la viga, en mm
- z: tasa constante de esfuerzo en la fibra exterior, mm /mm /min

Como en este trabajo se ensayaron especímenes de igual longitud y altura, se calculó la velocidad aplicando la ecuación anterior. Si se cumple con los requisitos de tiempo de prueba se aplica la misma velocidad a los especímenes subsecuentes. En caso contrario se modifica la velocidad con base en el tiempo obtenido anteriormente.

El registro de lecturas de cargas y desplazamientos fue representado gráficamente mediante la curva de carga-deflexión (Figura 58).

El eje horizontal muestra el desplazamiento del eje neutro de la viga en el centro de su longitud. La carga última ($P_{\text{última experimental}}$) corresponde al punto donde se da la rotura de la viga. La carga en el límite proporcional ($P_{L,P \text{ experimental}}$) es la carga en el punto donde la curva deja de comportarse en forma lineal. Para ubicar este punto se traza una línea desde el origen, que coincide con la parte lineal de la curva, la línea se extiende más que la parte lineal de la curva y facilita la ubicación del límite proporcional.

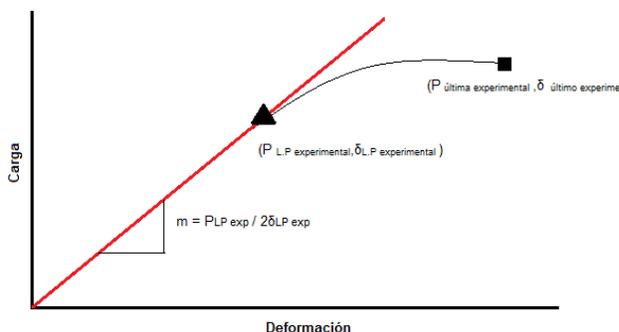


Figura 58. Ejemplo de curva carga-deflexión

Según la metodología de ensayo, las vigas se colocaron apoyadas en sus extremos y las cargas se aplican a una distancia igual a $L/3$ de los extremos. Desprecia la contribución del peso propio del elemento en la sumatoria de fuerzas debido a que su aporte es poco significativo en comparación con las fuerzas aplicadas. La Figura 47 muestra el diagrama de cuerpo libre de la viga. Las reacciones se determinan aplicando las ecuaciones de la estática (Ecuación 54) más convenientes.

Ecuación 54

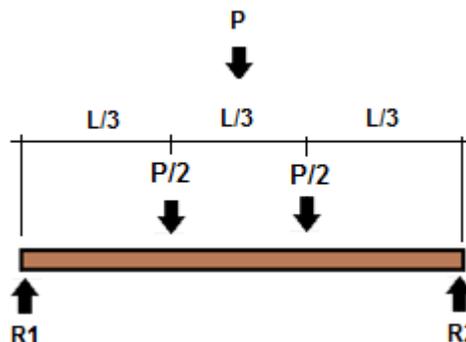


Figura 59. Diagrama de cuerpo libre.

Para obtener las reacciones, primero se aplicó la Ecuación 54 (b). Luego se aplicó la Ecuación 54 (f) en la líneas de acción de R_1 . Se obtuvo que $R_1 = R_2 = P/2$. La carga aplicada por la cabeza de carga es P .

A partir del resultado anterior se construyen los diagramas de cortante y momento de la viga (Figura 60). Las fuerzas cortantes que se generan son originadas para contrarrestar las cargas que se aplican en el plano perpendicular al eje. Como se aprecia el valor máximo de cortante es " $P/2$ ", el cual se mantiene constante en los $L/3$ extremos, en el $L/3$ central el cortante es nulo.

Para longitudes menores que $L/3$

Ecuación 55

Para longitudes entre $L/3$ y $2L/3$

-

Ecuación 56

Para longitudes mayores que $2L/3$

Ecuación 57

El diagrama de momento flector representa gráficamente los momentos internos que se generan. Estos momentos son originados para contrarrestar los momentos producidos por las fuerzas extremas que tienden a flexionar la viga en el plano de las cargas.

El momento máximo se calculó de la siguiente manera:

$$M_{\max} = P_u \cdot L / 6 \quad [\text{kg}\cdot\text{m}] \quad \text{Ecuación 58}$$

Donde:

M_{\max} : momento máximo

P_u : carga última en la falla, en kg

L : luz de la viga medida entre apoyo y apoyo, en m

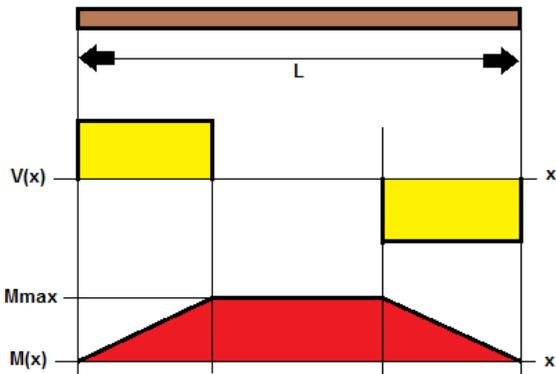


Figura 60. Diagramas de cortante y momento flector

El contenido de humedad de los especímenes en el momento del ensayo se determinó mediante un medidor eléctrico marca Timber Test, modelo FM510 como se muestra en la Figura 49. Este método está estandarizado en la norma ASTM D442 Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Base Materials.



Figura 61. Medidor de humedad eléctrico.

Resultados

Ensayos físico-mecánicos del bambú Guadua

El Cuadro 28 presenta el contenido de humedad y la densidad de 15 especímenes extraídos aleatoriamente del lote de bambú utilizado.

Cuadro 28. Contenido de Humedad y densidad del bambú utilizado.				
Probeta	P_o (g)	Peso final (g)	CH (%)	Densidad (kg/m³)
1	10.26	9.06	13.25	750.04
2	8.27	7.40	11.76	650.92
3	7.52	6.71	12.07	575.63
4	8.88	7.91	12.26	637.53
5	7.86	7.00	12.29	581.87
6	9.34	8.33	12.12	659.52
7	9.28	8.27	12.21	683.12
8	7.59	6.68	13.62	683.73
9	7.50	6.63	13.12	648.25
10	9.21	8.24	11.77	638.55
11	9.49	8.47	12.04	619.60
12	7.92	7.07	12.02	576.32
13	7.94	7.10	11.83	584.07
14	8.75	7.77	12.61	604.99
15	9.43	8.40	12.26	655.45
Promedio			12.35	636.64
Mínimo			11.76	575.63
Máximo			13.62	750.04
Desviación Estándar			0.56	48.46
Coficiente de Variación (%)			4.54	7.61

El Cuadro 29 presenta el esfuerzo último en tensión obtenido de muestras de bambú con nudo en el centro. Además se adjuntan los datos estadísticos correspondientes a los resultados

obtenidos. El valor promedio del esfuerzo de tensión es muy importante porque se utiliza posteriormente para determinar la capacidad teórica de las vigas reforzadas.

Cuadro 29. Esfuerzo ultimo en tensión experimental para muestras con nudo			
Espécimen	A (cm²)	Pmax (kg)	Esfuerzo ultimo σ (kg/cm²)
1.00	1.74	1746.00	1000.63
2.00	1.75	1756.00	1003.85
3.00	1.35	1238.00	918.34
4.00	1.27	1263.00	991.35
5.00	1.80	1482.00	822.47
6.00	1.33	1295.00	970.75
7.00	1.51	1350.00	891.53
8.00	1.82	1775.00	975.42
9.00	1.86	2025.00	1089.82
10.00	1.74	1668.00	957.98
11.00	1.48	1486.41	1003.76
12.00	1.88	1822.70	970.61
13.00	1.55	1889.00	1217.01
14.00	1.76	1863.06	1057.06
15.00	1.43	2004.00	1402.25
16.00	1.72	1378.00	803.40
17.00	1.48	1385.00	937.58
Estadísticos			
Esfuerzo promedio (kg/cm2)			1000.81
Esfuerzo Mínimo (kg/cm2)			803.40
Esfuerzo Máximo (kg/cm2)			1402.25
Desviación estándar			140.74
Coeficiente de variación (%)			14.06

El Cuadro 30 resume los valores correspondientes del módulo de elasticidad en tensión, obtenido de muestras de bambú con nudo en el centro. El reducido número de probetas utilizadas obedece a la dificultad que implicó la determinación de esta propiedad. En el

Apéndice 5 se presentan con mayor detalle los resultados experimentales y el cálculo del módulo de elasticidad en tensión del las muestras con nudo.

Cuadro 30. Módulo de Elasticidad en tensión para muestras con nudo	
Probeta	E(kg/cm²)
ME1	120213
ME2	136250
ME3	142800
ME4	104597
Estadísticos	
Promedio	125965.00
Desviación Estándar	17116.03
Coefficiente de Variación (%)	13.59

El Cuadro 31 contiene los resultados de los ensayos de tensión sobre muestras de bambú sin nudo. Se aprecia el aumento de capacidad en tensión del bambú al excluir el nudo en los ensayos. Del Cuadro 29, la resistencia a la tensión promedio del bambú considerando los

nudos es de 1000 kg/cm² y para el caso sin nudo se tiene una resistencia de 1513.47 kg/cm². Es decir la resistencia del bambú en la zona sin nudo es 1.51 veces mayor para el caso del bambú Guadua utilizado en este trabajo.

Cuadro 31. Esfuerzo ultimo en tensión experimental para muestras sin nudo.			
Espécimen	A (cm²)	Pmax (kg)	Esfuerzo ultimo σ (kg/cm²)
1	0.65	910.00	1475.17
2	0.67	900.00	1387.80
3	0.65	1025.00	1581.42
4	0.67	950.00	1456.66
5	0.65	1055.00	1693.20
6	0.59	900.00	1431.79
7	0.65	1030.00	1568.23
Estadísticos			
Esfuerzo promedio (kg/cm ²)			1513.47
Esfuerzo Mínimo (kg/cm ²)			1387.80
Esfuerzo Máximo (kg/cm ²)			1693.20
Desviación estándar			105.73
Coeficiente de variación (%)			6.99

El Cuadro 32 compara los valores del esfuerzo de tensión obtenido del estudio bibliográfico con los

resultados obtenidos experimentalmente en este estudio.

Cuadro 32. Comparación del esfuerzo de tensión (kg/cm²) paralelo a la fibra		
Autor	Nudo	Entrenudo
Arce (1993)	814.00	2758.21
Osorio et. al (2005)		1943.00
Este estudio	1000.00	1513.47

En el Cuadro 33 se resumen los resultados obtenidos de los ensayos de compresión sobre

muestras con nudo en la zona central de la misma.

Cuadro 33. Esfuerzo de compresión experimental para muestras con nudo		
Espécimen	Pmax (kg)	Esfuerzo máximo σ (kg/cm²)
C-N-1	1325	265.43
C-N-2	1380	281.79
C-N-3	1260	261.12
C-N-4	1250	266.95
C-N-5	1325	273.57
Estadísticos		
Esfuerzo promedio (kg/cm ²)		269.77
Esfuerzo Mínimo (kg/cm ²)		261.12
Esfuerzo Máximo (kg/cm ²)		281.79
Desviación estándar		8.07
Coeficiente de variación (%)		2.99

En el Cuadro 34 se presentan los resultados experimentales de los ensayos de compresión sobre muestras sin nudo. Comparando el esfuerzo promedio en compresión sin nudo con el

resultado con nudo se obtiene una relación de 1.44. Es decir 44% mayor la resistencia en compresión del bambú sin nudos.

Cuadro 34. Esfuerzo de compresión máximo experimental para muestras sin nudo		
Espécimen	Pmax (kg)	Esfuerzo máximo σ (kg/cm²)
C-S-1	2125	424.39
C-S-2	1580	320.57
C-S-3	2210	423.43
C-S-4	1770	373.11
C-S-5	2125	419.78
C-S-6	1815	372.65
C-S-7	2035	403.44
C-S-8	2025	404.9
C-S-9	1835	387.56
C-S-10	2000	381.39
C-S-11	2200	426.31
C-S-12	1900	389.29
C-S-13	1750	370.53
C-S-14	1785	365.06
C-S-15	2010	385.4
Estadísticos		
Esfuerzo promedio (kg/cm ²)		389.85
Esfuerzo Mínimo (kg/cm ²)		320.57
Esfuerzo Máximo (kg/cm ²)		426.31
Desviación estándar		28.56
Coefficiente de variación (%)		7.33

En el Cuadro 35 se comparan con otros estudios previos los resultados experimentales obtenidos en este trabajo para la resistencia a la

compresión paralela a la fibra de muestras con nudo y sin nudo.

Cuadro 35. Comparación del esfuerzo de compresión paralelo a la fibra		
Autor	Nudo	Entrenudo
Sotela. Zona Atlántica (1990)	425	420
Sotela. Zona Sur (1990)	425	414
Arce (1993)		515
Este estudio	269.77	389.85

Capacidad teórica elástica de las vigas reforzadas y sin reforzar.

El Cuadro 36 resume las capacidades de las vigas sin refuerzo y con refuerzo según el modo de falla en flexión y el modo de falla en cortante. Como se aprecia la acción más crítica es la

flexión, por ello rige en ambos casos. Para el cálculo se utilizó el procedimiento descrito en la metodología en la sección 3.

Cuadro 36. Capacidad teórica de las vigas con refuerzo y sin refuerzo según modo de falla.				
Tipo de viga	Modo de falla en flexión		Modo de falla en cortante	Modo que controla
	Mmax teórico (kg-m)	Pmax teórico (kg)	Pmax teórico (kg)	
Sin refuerzo	824.99	3299.96	7038.29	Rige modo de falla en flexión
Con refuerzo	837.15	3348.58	7129.40	Rige modo de falla en flexión

En este trabajo se estudió el efecto y el comportamiento de vigas de madera laminada a las cuales se les colocó una lámina de bambú como refuerzo en tensión. Estas láminas en promedio tenían un espesor de 0.75 cm. En el Cuadro 37 se puede observar el efecto teórico de la variación de este espesor mediante la adición de más láminas (manteniendo constante

el peralte de 12.8 cm). Se aprecia como teóricamente la capacidad de momento de la viga aumenta al agregar más láminas de refuerzo. Otro detalle que se puede observar es que al colocar más de 2 láminas la falla pasa a ser controlada por la madera (falla en compresión) y no por el bambú (falla en tensión).

Cuadro 37. Efecto de la variación del espesor de refuerzo sobre la capacidad teórica de la viga					
Viga No reforzada M máximo teórico (kg-m)	Vigas reforzadas				Relación Mmáximo (viga reforzada) / Mmáximo (viga NO reforzada)
	Numero de laminas de refuerzo	Espesor t (cm)	M máximo teórico (kg-m)	Material que controla la falla	
824.99	1	0.75	837.14	Bambú	1.02
824.99	2	1.5	974.9	Bambú	1.2
824.99	3	2.25	1114.1	Madera	1.35
824.99	4	3	1236.17	Madera	1.5
824.99	5	3.75	1357.81	Madera	1.65

La Figura 61 es una representación grafica del comportamiento teórico de la viga con la variación del espesor del refuerzo.

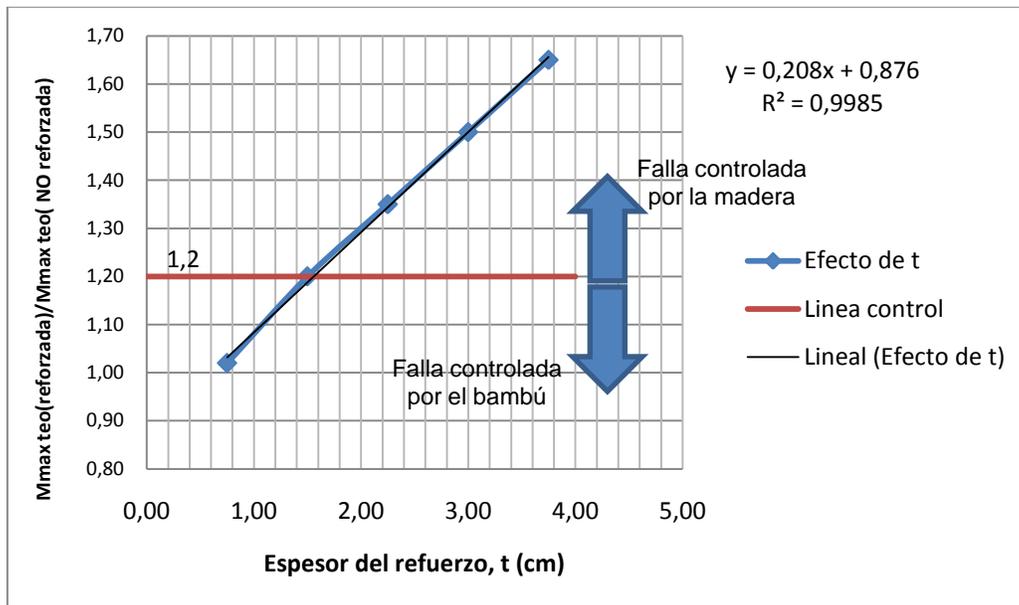


Figura 61. Efecto del espesor del refuerzo sobre la capacidad teórica de momento de la viga.

Ensayos de flexión estática sobre vigas con y sin refuerzo.

- **Vigas sin refuerzo**

El Cuadro 38 resume, para todos los especímenes, los valores correspondientes a la carga experimental en el límite proporcional y en

la falla, con la respectiva deformación en el límite proporcional en el centro de la longitud de la viga.

Cuadro 38. Carga en el límite proporcional, carga ultima y desplazamiento obtenidos para las vigas sin refuerzo					
Especimen	Carga transmitida (kg)		Momento último experimental (kg-m)	Desplazamiento en centro (cm)	Pendiente de la zona lineal (kg/cm)
	En el límite de proporcionalidad	Última		Limite de proporcionalidad	$PL.P.exp/\delta 1.LP.exp$
	PL.P.exp	Púltima.exp	Múltimo.exp	$\delta 1.LP.exp$	$mPL.P.exp/\delta 1.LP.exp$
V-S-1	1119.00	2138.80	534.70	0.97	1153.61
V-S-2	1088.00	2232.00	558.00	1.50	725.33
V-S-3	1166.00	2232.00	558.00	1.50	777.33
V-S-4	919.35	1943.80	485.95	1.02	901.32
V-S-5	1000.00	1903.40	475.85	1.30	769.23
V-S-6	1027.20	2468.40	617.10	1.17	877.95
V-S-7	1125.00	2401.00	600.25	1.24	907.26
V-S-8	1142.50	2186.00	546.50	1.04	1098.56
V-S-9	1192.00	2610.00	652.50	1.28	931.25
V-S-10	1008.40	2420.00	605.00	1.19	847.39
Estadísticos					
Promedio	1078.75	2253.54	563.39	1.22	898.92
Mínimo	919.35	1903.40	475.85	0.97	725.33
Máximo	1192.00	2610.00	652.50	1.50	1153.61
Desviación Estándar	86.64	226.05	56.51	0.18	137.71
Coeficiente de variación (%)	8.03	10.03	10.03	15.09	15.32

El Cuadro 39 presenta el modulo de ruptura de cada viga. Este fue calculado mediante la fórmula elástica M_c / I utilizando el máximo momento soportado por la viga.

Cuadro 39. Módulo de ruptura de las vigas sin refuerzo	
Espécimen	Módulo de ruptura (kg/cm²)
V-S-1	489.53
V-S-2	510.86
V-S-3	510.86
V-S-4	444.90
V-S-5	435.65
V-S-6	564.97
V-S-7	549.55
V-S-8	500.34
V-S-9	597.38
V-S-10	553.89
Estadísticos	
Promedio	515.79
Mínimo	435.65
Máximo	597.38
Desviación Estándar	51.74
Coefficiente de variación (%)	10.03

El Cuadro 40 muestra el tiempo de prueba de cada ensayo.

Cuadro 40. Tiempo de aplicación de carga a las vigas sin refuerzo	
Vigas sin refuerzo	
Espécimen	Tiempo de prueba (m:s)
V-S-1	4 min 53 seg
V-S-2	10 min 36 seg
V-S-3	4 min 38 seg
V-S-4	7 min 57 seg
V-S-5	9 min 00 seg
V-S-6	12 min 18 seg
V-S-7	12 min 15 seg
V-S-8	8 min 41 seg
V-S-9	13 min 50 seg
V-S-10	12 min 40 seg

El Cuadro 41 resume los aspectos más relevantes de la falla de cada espécimen. El pandeo excesivo se refiere a que la viga se deformó tanto que no mostró una superficie de falla bien definida. El término frágil se aplicó cuando un espécimen perdió su capacidad estructural de forma repentina y el término dúctil si la viga falló de forma gradual. La falla que presentó el espécimen V-S-5 se clasificó como falla por cortante debido a que fue muy cerca del apoyo izquierdo pero dentro del tercio izquierdo

donde existen esfuerzos cortantes. Además esta viga presentó un nudo justo en el apoyo izquierdo y en la zona de tensión que evidentemente propició la falla (ver Apéndice 1). En el Apéndice 4 se amplía la información de las fallas. De forma muy similar, la viga V-S-10 presentó la falla en el tercio izquierdo donde se tenía 2 nudos justo en la zona de tensión. Ambas fallas se clasificaron como fallas por corte aunque se dieron prácticamente en el apoyo.

Cuadro 41. Características de las fallas de las vigas sin refuerzo				
Espécimen	Ubicación	Modo de falla	Tipo de falla	Falta de adhesión (inspección visual)
V-S-1	L/3 Central	Tensión	Frágil	No
V-S-2	L/3 Central	Pandeo excesivo	Dúctil	No
V-S-3	L/3 Central	Tensión	Frágil	No
V-S-4	L/3 Central	Tensión	Frágil	No
V-S-5	L/3 Izquierdo	Cortante	Frágil	No
V-S-6	L/3 Central	Compresión	Dúctil	No
V-S-7	L/3 Central	Tensión	Frágil	No
V-S-8	L/3 Central	Tensión	Frágil	No
V-S-9	L/3 Central	Compresión	Dúctil	No
V-S-10	L/3 Izquierdo	Cortante	Frágil	No

En la Figura 62 se puede apreciar que la mayor cantidad de fallas ocurridas se produjeron por tensión que en conjunto con el porcentaje de

fallas por compresión, refleja que predominaron las fallas por flexión como era esperado.

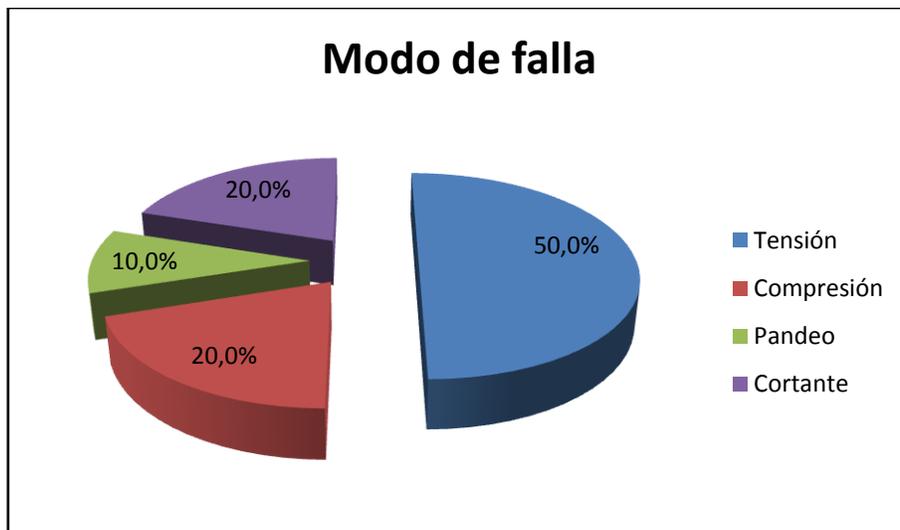


Figura 62. Recurrencia de fallas según el modo de falla para las vigas sin refuerzo.

Los resultados resumidos en la Figura 63 refleja lo comentado anteriormente, la mayoría de fallas

se dieron en el tercio central de la viga.

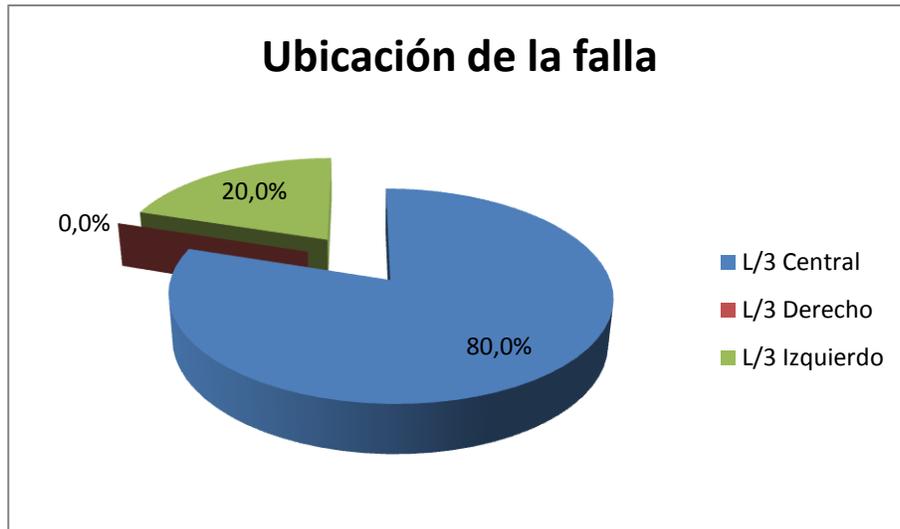


Figura 63. Recurrencia de fallas según ubicación de la falla para las vigas sin refuerzo.

La información expuesta en la Figura 64 refleja que la falla tipo frágil se presentó en la mayoría de ensayos.



Figura 64. Recurrencia de fallas según tipo de falla para las vigas sin refuerzo.

- **Vigas reforzadas**

En el Cuadro 42 se resume para todos los especímenes, los valores correspondientes a la carga experimental en el límite proporcional y en

la falla. La respectiva deformación en el límite proporcional en el centro de longitud de la viga se incluye también.

Cuadro 42. Carga en el límite proporcional, carga última y desplazamiento obtenidos para las vigas con refuerzo					
Especímen	Carga transmitida (kg)		Momento último experimental (kg-m)	Desplazamiento en el límite de proporcionalidad	Pendiente de la zona lineal (kg/cm)
	Límite de proporcionalidad	Última			PL.P.exp/δ1.LP.exp
	PL.P.exp	Púltima.exp	Múltimo.exp	δ1.LP.exp	mPL.P.exp/δ1.LP.exp
V-R-A	1130.00	2159.00	539.75	1.68	672.62
V-R-B	1435.00	1950.50	487.63	1.61	891.30
V-R-C	1176.50	2253.00	563.25	1.51	779.14
V-R-D	1573.20	2528.00	632.00	1.85	850.38
V-R-E	1119.00	2140.00	535.00	1.48	756.08
V-R-F	1540.80	2470.00	617.50	1.66	928.19
V-R-G	1264.00	2428.00	607.00	1.05	1203.81
V-R-H	1628.20	2225.00	556.25	1.47	1107.62
V-R-I	1446.10	2092.00	523.00	1.52	951.38
V-R-J	1363.40	2523.00	630.75	1.59	857.48
Estadísticos					
Promedio	1367.62	2276.85	569.21	1.54	899.80
Mínimo	1119.00	1950.50	487.63	1.05	672.62
Máximo	1628.20	2528.00	632.00	1.85	1203.81
Desviación Estándar	187.50	200.10	50.03	0.21	159.93
Coficiente de variación (%)	13.71	8.79	8.79	13.45	17.77

El Cuadro 43 muestra el tiempo de aplicación de carga en los ensayos.

Cuadro 43. Tiempo de aplicación de carga a las vigas reforzadas	
Vigas reforzadas	
Espécimen	Tiempo de prueba (m:s)
V-R-A	8 min 30 seg
V-R-B	6 min 50 seg
V-R-C	10 min 00 seg
V-R-D	7 min 28 seg
V-R-E	12 min 20 seg
V-R-F	11 min 25 seg
V-R-G	13 min 50 seg
V-R-H	7 min 20 seg
V-R-I	6 min 30 seg
V-R-J	10 min 23 seg

El Cuadro 44 presenta las características relevantes de las fallas para las vigas reforzadas. Se aprecia como todas las fallas fueron frágiles. En el Apéndice 3 se amplía la información sobre las fallas.

Cuadro 44. Características de las fallas de las vigas con refuerzo				
Espécimen	Ubicación	Modo de falla	Tipo de falla	Falta de adherencia (inspección visual)
V-R-A	L/3 Central	Compresión	Dúctil	No
V-R-B	L/3 Central	Tensión	Frágil	No
V-R-C	L/3 Central	Tensión	Frágil	No
V-R-D	L/3 Central	Tensión	Frágil	No
V-R-E	L/3 Central	Tensión	Frágil	No
V-R-F	L/3 Central	Tensión	Frágil	No
V-R-G	L/3 Central	Tensión	Frágil	No
V-R-H	L/3 Central	Tensión	Frágil	No
V-R-I	L/3 Central	Tensión	Frágil	No
V-R-J	L/3 Central	Tensión	Frágil	No

Los resultados resumidos en la Figura 65 reflejan que en el caso de las vigas reforzadas

predominaron las fallas en tensión.



Figura 65. Recurrencia de fallas según el modo de falla para las vigas sin refuerzo.

La información expuesta en la Figura 66 especifica que el 100% de las fallas ocurrieron en el tercio medio de la viga.



Figura 66. Recurrencia de fallas según ubicación de la falla para las vigas sin refuerzo.

En la Figura 67 se observa que la mayoría de las fallas fueron frágiles.



Figura 67. Recurrencia de fallas según tipo de falla para las vigas sin refuerzo.

Comparación de los resultados teóricos con los experimentales

- **Vigas sin refuerzo**

En el Cuadro 44 se compara la carga última experimental con la carga última teórica considerando la resistencia a cortante de madera. Se aprecia como en ningún caso se alcanzó la

carga teórica. El espécimen V-S-9 fue el que más se acercó con un 34% de la carga teórica por cortante.

Cuadro 44. Comparación de las estimaciones de carga máxima, siguiendo el modo de falla por cortante, con los resultados experimentales de carga última para las vigas sin refuerzo

Especimen	Carga última experimental (kg)	Tipo de falla experimental	Carga última teórica por cortante (kg)	Carga última experimental / Carga última teórica
	P última experimental		P última teórica	P última experimental / P última teórica
V-S-1	2138.80	Tensión	7038.29	0.30
V-S-2	2232.00	Pandeo excesivo	7038.29	0.32
V-S-3	2232.00	Tensión	7038.29	0.32
V-S-4	1943.80	Tensión	7038.29	0.28
V-S-5	1903.40	Cortante	7038.29	0.27
V-S-6	2468.40	Compresión	7038.29	0.35
V-S-7	2401.00	Tensión	7038.29	0.34
V-S-8	2186.00	Tensión	7038.29	0.31
V-S-9	2610.00	Compresión	7038.29	0.37
V-S-10	2420.00	Cortante	7038.29	0.34

En el Cuadro 45 se compara el momento teórico con el obtenido experimentalmente. En todos los casos la resistencia teórica es superior a la experimental. El espécimen V-S-9 alcanza un 79% de la capacidad teórica siendo la que más

resistencia presentó. Cabe notar que la carga máxima P asociada al momento teórico es de 3300 kg que comparada con la carga máxima por cortante presentada anteriormente (7038.29 kg) permite predecir una falla teórica por flexión.

Cuadro 45. Comparación de las estimaciones de momento máximo, siguiendo el modo de falla por flexión, con los resultados experimentales de momento último para las vigas sin refuerzo

Espécimen	Momento último experimental (kg-m)	Momento máximo teórico (kg-m)	Momento último experimental / Momento máximo teórico
V-S-1	534.70	825.00	0.65
V-S-2	558.00	825.00	0.68
V-S-3	558.00	825.00	0.68
V-S-4	485.95	825.00	0.59
V-S-5	475.85	825.00	0.58
V-S-6	617.10	825.00	0.75
V-S-7	600.25	825.00	0.73
V-S-8	546.50	825.00	0.66
V-S-9	652.50	825.00	0.79
V-S-10	605.00	825.00	0.73

En el Cuadro 46 se compara las pendientes teórica y experimental de la curva carga vs

deflexión. Se aprecian porcentajes de diferencia muy altos.

Cuadro 46. Comparación de las pendientes experimentales y teóricas de las curvas carga contra deflexión para las vigas sin refuerzo			
Espécimen	m_P vs $\delta_{1.teo}$ (kg/cm)	m_{PLP} vs $\delta_{1.LP.exp}$ (kg/cm)	Porcentaje de diferencia (%)
V-S-1	1105.10	1153.61	-12.58
V-S-2	1105.10	725.33	29.22
V-S-3	1105.10	777.33	24.14
V-S-4	1105.10	901.32	12.04
V-S-5	1105.10	769.23	24.93
V-S-6	1105.10	877.95	14.32
V-S-7	1105.10	907.26	11.46
V-S-8	1105.10	1098.56	-7.20
V-S-9	1105.10	931.25	9.12
V-S-10	1105.10	847.39	17.31

• Vigas reforzadas

En el Cuadro 47 se compara la carga última experimental de las vigas reforzadas con la carga máxima teórica siguiendo el modo de falla en cortante. Como se aprecia la carga experimental

es menor en todos los casos a la carga máxima teórica. Los especímenes V-R-D, V-R-F y V-R-J son los que se aproximan más a la carga teórica, a un 35% de esta.

Cuadro 47. Comparación de las estimaciones de carga máxima, siguiendo el modo de falla por cortante, con los resultados experimentales de carga última para vigas reforzadas			
Espécimen	Carga última experimental (kg)	Carga última teórica por cortante (kg)	Carga última experimental / Carga última teórica
	Púltima.exp	Púltima.teo	Púltima.exp/Púltima.teo
V-R-A	2159.00	7129.40	0.30
V-R-B	1950.50	7129.40	0.27
V-R-C	2253.00	7129.40	0.32
V-R-D	2528.00	7129.40	0.35
V-R-E	2140.00	7129.40	0.30
V-R-F	2470.00	7129.40	0.35
V-R-G	2428.00	7129.40	0.34
V-R-H	2225.00	7129.40	0.31
V-R-I	2092.00	7129.40	0.29
V-R-J	2523.00	7129.40	0.35

En el Cuadro 48 se compara la resistencia en flexión experimental contra la resistencia teórica de las vigas con refuerzo. La capacidad experimental no iguala en ningún caso a la calculada teóricamente. El espécimen V-R-D se aproxima a un 76% de la capacidad teórica

elástica. Cabe notar que la carga máxima P asociada al momento teórico es de 3348.60 kg que compara con la carga máxima por cortante presentada anteriormente (7129.40 kg) permite predecir una falla teórica por flexión.

Cuadro 48. Comparación de las estimaciones de momento máximo, siguiendo el modo de falla por flexión, con los resultados experimentales de momento último para las vigas reforzadas			
Espécimen	Momento último experimental (kg-m)	Momento máximo teórico (kg)	Momento último experimental /Momento máximo teórico
	Múltimo.exp	Mmax.teo	Múltimo.exp/Mmax.teo
V-R-A	539.75	837.15	0.65
V-R-B	487.63	837.15	0.58
V-R-C	563.25	837.15	0.67
V-R-D	632.00	837.15	0.76
V-R-E	535.00	837.15	0.64
V-R-F	617.50	837.15	0.73
V-R-G	607.00	837.15	0.72
V-R-H	556.25	837.15	0.66
V-R-I	523.00	837.15	0.62
V-R-J	630.75	837.15	0.75

En el Cuadro 49 se compara las pendientes teórica y experimental de la curva carga vs deflexión. Se aprecian porcentajes de diferencia muy altos. Como el cálculo de deformaciones está en función del módulo de elasticidad de la madera estas diferencias están fuertemente relacionadas al módulo de elasticidad obtenido de la literatura.

Cuadro 49. Comparación de las pendientes experimentales y teóricas de las curvas carga contra deflexión para las vigas reforzadas			
Espécimen	m_P vs $\delta_{1.teo}$ (kg/cm)	m_{PLP} vs $\delta_{1.LP.exp}$ (kg/cm)	Porcentaje de diferencia (%)
V-R-A	1105.10	672.62	39.13
V-R-B	1105.10	891.30	19.35
V-R-C	1105.10	779.14	29.50
V-R-D	1105.10	850.38	23.05
V-R-E	1105.10	756.08	31.58
V-R-F	1105.10	928.19	16.01
V-R-G	1105.10	1203.81	-8.93
V-R-H	1105.10	1107.62	-0.23
V-R-I	1105.10	951.38	13.91
V-R-J	1105.10	857.48	22.41

Efecto experimental y teórico del refuerzo en el comportamiento de las vigas

En el Cuadro 50 se presentan las cargas últimas y las deflexiones últimas tanto para las vigas sin refuerzo como para las vigas reforzadas. No es posible realizar una comparación mutua entre una viga sin refuerzo y otra reforzada, pero se puede apreciar que en la mayoría de los casos las cargas soportadas por las vigas reforzadas son mayores que la carga última de las vigas sin

refuerzo. Además en promedio se aprecia que la carga de una viga sin refuerzo fue de 2253.54 kg mientras que para las vigas reforzadas fue de 2276.85 kg. Por lo tanto en promedio se tuvo un leve aumento de capacidad.

También se puede ver que las vigas sufrieron deflexiones elásticas mayores que las vigas sin refuerzo.

Cuadro 50. Comparación de la carga ultima y la deflexión elástica entre vigas de madera sin reforzar y vigas de madera reforzadas con bambú					
Vigas sin refuerzo			Vigas con refuerzo		
Espécimen	Carga Ultima	Desplazamiento en centro (cm)	Espécimen	Carga Ultima	Desplazamiento en centro (cm)
		Limite de proporcionalidad			Limite de proporcionalidad
	Púltima.exp	δ1.LP.exp		Púltima.exp	δ1.LP.exp
V-S-1	2138.8	0.97	V-R-A	2159	1.68
V-S-2	2232	1.5	V-R-B	1950.5	1.61
V-S-3	2232	1.5	V-R-C	2253	1.51
V-S-4	1943.8	1.02	V-R-D	2528	1.85
V-S-5	1903.4	1.3	V-R-E	2140	1.48
V-S-6	2468.4	1.17	V-R-F	2470	1.66
V-S-7	2401	1.24	V-R-G	2428	1.05
V-S-8	2186	1.04	V-R-H	2225	1.47
V-S-9	2610	1.28	V-R-I	2092	1.52
V-S-10	2420	1.19	V-R-J	2523	1.59
Estadísticos					
Promedio	2253.54	1.22		2276.85	1.54
Mínimo	1903.4	0.97		1950.5	1.05
Máximo	2610	1.5		2528	1.85
Desviación Estándar	226.05	0.18		200.1	0.21
Coefficiente de variación (%)	10.03	15.09		8.79	13.45

El Cuadro 51 presenta la relación entre el momento resistente de la viga reforzada y el momento resistente de la viga sin reforzar, tanto a nivel teórico como a nivel experimental. Como se puede apreciar teóricamente y experimentalmente (en promedio) se obtuvo un aumento de capacidad.

Se puede observar además que el porcentaje de aumento teórico y experimental son muy parecidos, aun cuando las capacidades en cortante y momento son sobreestimadas respecto a las cargas obtenidas experimentalmente.

Los ensayos a flexión mediante los cuales se determina el módulo de ruptura que es reportado en la literatura son realizados sobre muestras de madera de tamaño reducido en comparación con un elemento estructural de gran tamaño, esto provoca que las probetas de ensayo sean libres de defectos como nudos. Del Cuadro

39 se observa que el módulo de ruptura experimental promedio para las vigas de madera lamina de Pino Radiata sin refuerzo fue de 515.79 kg/cm². Del Cuadro 24 se aprecia que en los cálculos teóricos se utilizó un módulo de ruptura de 755.30 kg/cm². Claramente se aprecia que el valor teórico utilizado es superior a lo obtenido experimentalmente, el efecto de los defectos como los nudos es crítico en la zona de tensión de la sección transversal de una viga ya que disminuye el área y por lo tanto la inercia de la sección.

Además el módulo de ruptura es un criterio de resistencia aceptado en la práctica que es calculado con la formula elástica M_c / I , pero este no es el esfuerzo realmente alcanzado por la madera en la falla. Es un valor ubicado entre el esfuerzo de compresión y el esfuerzo de tensión ($F_c < MOR < F_t$).

Cuadro 51. Efecto teórico y experimental del refuerzo de vigas de madera laminada mediante láminas de bambú sobre la capacidad de momento de la viga			
Condición	Viga CON refuerzo (kg-m)	Viga SIN refuerzo (kg-m)	Mmáximo (Reforzada) / Mmáximo (No Reforzada)
Teórico	837.14	825.00	1.0147
Experimental	569.21	563.39	1.0103

Análisis de los resultados

En este capítulo se hace un análisis de los resultados obtenidos en los ensayos sobre muestras de bambú y se comparan con los valores reportados por varios autores. Se analizan los valores de capacidad última experimental de las vigas y se comparan con las capacidades teóricas calculadas.

Ensayos de contenido de humedad y densidad

Según el Cuadro 28 se obtuvo un contenido de humedad máximo de 13.62 % y un mínimo de 11.76 %.

El promedio fue de 12.35 %, con un coeficiente de variación de 4.55 %.

Este contenido de humedad fue determinado para la condición seca al aire. La dispersión de los datos es baja, estos convergen de manera clara y esto se aprecia al observar el bajo coeficiente de variación. Esto implica una estabilidad en el contenido de humedad.

Se debe resaltar que para este ensayo no se hizo diferencia en cuanto a la ubicación de las muestras dentro del culmo (Alta, Media o Baja).

Este aspecto es importante y tiene que ver con la variabilidad de los resultados obtenidos en los ensayos, ya que las propiedades tanto físicas como mecánicas varían a lo largo del culmo de bambú.

La densidad promedio obtenida fue de 636.64 kg/m³ con un coeficiente de variación de 7.61 %.

Sotela² presentó en su trabajo una densidad promedio de 869 kg/m³ para especímenes de entrenudo provenientes de la Zona Atlántica de Costa Rica. Para muestras de nudo presentó un valor de 774 kg/m³.

Similarmente para la Zona Sur de Costa Rica presentó una densidad de 826 kg/m³ y 790 kg/m³ para muestras de entrenudo y nudo respectivamente.

Se aprecia que la densidad determinada en este trabajo es menor en todos los casos a los resultados obtenidos por Sotela². Esto podría significar un menor contenido de material leñoso en el bambú usado en este trabajo. Esto se debe a que los procedimientos seguidos no fueron los mismos o bien las condiciones del material. Este ensayo se debe realizar sobre secciones del culmo, diferenciando su ubicación dentro de este.

Sin embargo en este trabajo no fue posible considerar el efecto del nudo en densidad del material.

Sotela² concluyó que la densidad seca en general oscila en un rango de 700 a 900 kg/m³ para el bambú procedente de ambas zonas. La densidad aquí obtenida se aproxima al límite inferior de este rango.

Ensayos de tensión paralela a la fibra

Los cuadros 29, 30 y 31 resumen la información de laboratorio referente a este ensayo.

Para muestras con nudo se obtuvo un esfuerzo promedio en tensión de 1000.81 kg/cm²

(Coeficiente de variación = 14.06 %) con un módulo de elasticidad promedio de 125 965 kg/cm² (Coeficiente de variación =13.59 %)

Para muestras sin nudo se obtuvo un esfuerzo promedio en compresión de 1513.47 kg/cm² (Coeficiente de variación =6.99 %).

No fue posible determinar el módulo de elasticidad para muestras sin nudo. Esto se debió a la forma en se midieron las deformaciones. Por alguna razón el deformímetro no presentaba lectura aún cuando la máquina de ensayos tenía ya algún tiempo de estar cargando al espécimen.

En el instante en que el deformímetro comenzaba a tomar lecturas la probeta estaba cerca de la falla, por lo tanto se registraron deformaciones unitarias últimas extremadamente pequeñas. Al relacionarlas con el esfuerzo último mediante la ley de Hooke resultaban módulos de elasticidad extremadamente altos, que se alejaban muchísimo de valores reportados en la literatura y que, por lo tanto, eran evidentemente erróneos.

Arce¹ reporta un valor de tensión última para muestras con nudo de 814 kg/cm² con un módulo de elasticidad igual a 75969.42 kg/cm². También para muestras sin nudo reporta un esfuerzo en tensión último de 2758.21 kg/cm² y un módulo de elasticidad de 192 230 kg/cm².

El Cuadro 32 muestra una comparación entre los resultados promedio obtenidos en este trabajo y los reportados por varios autores.

La obtención de deformaciones en un ensayo de tensión al igual que en el ensayo de compresión es una labor muy complicada. La utilización de medios tecnológicos para esta labor es vital. Algunas máquinas de ensayos más sofisticadas miden automáticamente el desplazamiento entre cabezas de carga, este desplazamiento es reportado como la deformación de la lámina ensayada. Este valor es incorrecto debido a que el espécimen tiende a deslizarse de las prensas hidráulicas. Para controlar la deformación del espécimen, las deformaciones deben de medirse propiamente en la probeta. Para esto existen mecanismos electrónicos especialmente diseñados para ensayos de tensión.

También, la determinación de la deformación en el bambú puede volverse imprecisa debido al instrumento, ya que, al estirarse unas fibras más que otras, se puede producir un giro en el instrumento.

Estos ensayos demostraron en el caso de muestras con nudo en el centro que no es necesaria la creación de un área de falla, ya que siempre fallará en la zona nodal debido a su menor rigidez respecto a las áreas sin nudo.

Es importante recalcar que al crear esa zona de falla se fuerza al bambú a que se fracture en trayectorias que él no habría seguido naturalmente y que lo inducen a un comportamiento diferente.

Durante los ensayos se pudo escuchar el rompimiento de fibras paulatinamente. Debido a este rompimiento el área se reduce progresivamente, el esfuerzo que se registra como último es inferior al real. Para efectos prácticos no es necesario registrar este cambio de área ya que el interés primordial es el comportamiento global del material.

Un valor de esfuerzo de tensión último considerando la variación del área sería muy alto y habría que aplicarlo a toda el área completa, cuando es solamente una parte de ella la que estaría resistiendo la carga.

Cuando se ensayan muestras obtenidas del entrenado sin reducirles el área a la mitad de la probeta, se produce la falla muy cerca de la prensa de la máquina de ensayos.

Algunos autores relacionan las fallas cerca del área de las prensas con la presión generada por estas que provoca un altísimo esfuerzo cortante.

Ensayos de compresión paralela a las fibras

Los cuadros 33 y 34 resumen la información de los resultados de laboratorio referente a este ensayo.

Para muestras con nudo se obtuvo un esfuerzo promedio en compresión de 269.77 kg/cm² (Coeficiente de variación = 2.99 %).

Para muestras sin nudo se obtuvo un esfuerzo promedio en compresión de 389.85 kg/cm² (Coeficiente de variación = 7.33 %). Este ensayo particularmente no fue realizado de acuerdo a las normas establecidas internacionalmente para bambú. Un ensayo de este tipo debe realizarse sobre segmentos de la caña que incluyan el nudo.

Un esfuerzo último obtenido de esta manera sería representativo de las condiciones, por ejemplo, de una armadura, sea esta espacial

o en el plano. Donde sus elementos se modelan mediante nudos sin fricción y sin capacidad de soportar momentos.

Se hizo una distinción entre la capacidad en compresión del material y la capacidad en compresión de los culmos. En el último caso la capacidad es afectada por la geometría del espécimen (pandeo).

Para esta investigación no se utilizó el bambú en su estado natural, se usaron láminas extraídas de las paredes del culmo. Estas láminas fueron usadas como refuerzo en las vigas. Para esas condiciones las láminas se encontraban de alguna manera arriostradas por la madera de la viga y por el encolado. Además, se colocaron de tal forma que, teóricamente, solo experimentaron esfuerzos uniaxiales de tensión.

Los resultados en los cuadros en mención se obtuvieron de ensayar elementos prismáticos con una relación de espesor tal que no fuera necesario arriostrar los elementos y que teóricamente minimizara el efecto de pandeo obteniéndose un esfuerzo de aplastamiento.

Sotela² determinó en su trabajo un esfuerzo en compresión último para bambú procedente de la Zona Atlántica de 420 kg/cm^2 y 425 kg/cm^2 para muestras con nudo y sin este respectivamente. A su vez para muestras de la Zona Sur reporto 425 kg/cm^2 y 414 kg/cm^2 .

Arce¹ reportó un esfuerzo de 515 kg/cm^2 en promedio para muestras sin nudo.

En el Cuadro 35 se comparan los resultados de este trabajo con los reportados por los autores anteriormente citados

Se observa que el esfuerzo de compresión obtenido en esta investigación, ya sea con nudo o sin nudo, es inferior a los valores reportados por Sotela² y Arce¹.

La falla de las probetas fue por aplastamiento de las fibras en todos los casos.

Algunas observaciones que se realizaron durante y después de los ensayos permitieron señalar una serie de factores que afectan los resultados obtenidos en un ensayo de compresión. Las superficies de contacto con el plato de carga deben ser tan planas como sea posible, este aspecto afectó los resultados obtenidos ya que al colocar la probeta en el plato de carga esta presentaba inclinación respecto a un eje vertical imaginario. Por lo tanto cuando se aplica carga no se tiene una condición de carga axial pura, esta inclinación introdujo una excentricidad que provocó esfuerzos de flexión

en los especímenes. Este fenómeno se observó claramente en algunas de las pruebas para las cuales los prismas estuvieron a punto de girar debido a una excesiva inclinación.

La fricción entre el espécimen y la probeta es influyente en los resultados de un ensayo de este tipo. La carga axial provoca un acortamiento del elemento que por efecto de Poisson se expande provocando un estado de esfuerzos distinto al supuesto. Para esta investigación no se realizó ninguna acción que previniera este hecho.

La determinación de la deformación unitaria en un ensayo de compresión tiene una altísima dificultad. El método utilizado en esta investigación para determinar la deformación, demuestra la necesidad de utilizar medios electrónicos (Strain Gages). Ya Sotela² en su manual recomendaba su utilización y demostró que la utilización de un deformímetro convencional no conduce a resultados satisfactorios.

Capacidad elástica teórica de las vigas con y sin refuerzo

Utilizando la teoría clásica de vigas, aplicando una homogenización de la sección transversal en el caso de las vigas con refuerzo se obtuvieron las cargas de falla teóricas para los modos de falla en flexión y en cortante. Se utilizaron las propiedades mecánicas de ambos materiales y la geometría de las secciones. En el caso de la madera se utilizaron valores reportados en la literatura. Estas propiedades son reportadas para el estado verde y para un contenido de humedad del 12%. Como el contenido de humedad de las vigas fue de 17.2% se realizó una interpolación lineal, como lo recomienda Tuck³. En el Apéndice 4 se muestra con detalle todo el proceso de cálculo de las capacidades teóricas.

Los resultados de este análisis se muestran en el Cuadro 36. Se aprecia que tanto para las vigas con refuerzo como para las vigas sin refuerzo la carga máxima teórica que se puede aplicar es controlada por el modo de falla en flexión. Estos valores se calcularon utilizando propiedades mecánicas reportadas en la literatura para el caso de la madera y en el caso del bambú se utilizaron las propiedades verificadas experimentalmente en este trabajo.

Este análisis evidenció teóricamente que el comportamiento de las vigas reforzadas estaba controlado por la falla del bambú.

La carga máxima teórica para las vigas sin reforzar se estimó en 3299.96 kg y para las vigas con refuerzo se estimó en 3348.58 kg. Se puede apreciar que el cociente de la carga máxima de las vigas con refuerzo entre la carga máxima de las vigas sin refuerzo es mayor a uno (1.015) lo que representa un leve aumento de capacidad de 1.5%.

El efecto teórico del refuerzo es el de aumentar la capacidad de la viga respecto otra sin refuerzo. En el Cuadro 37 se presenta un análisis similar al presentado anteriormente, donde se varió únicamente el espesor del refuerzo. Como el refuerzo está constituido de láminas completas con espesores promedio de 0.75 cm, se realizaron cálculos colocando una, dos, tres, cuatro y cinco láminas. El resultado fue un incremento que se ajusta correctamente a una regresión del tipo lineal. Si se colocaran 5 laminas de refuerzo, partiendo del hecho de que estas son correctamente unidas a la madera, la capacidad de la viga aumentaría, teóricamente, en un 65%. Este aumento representa una gran ganancia de capacidad.

El comportamiento lineal se aprecia gráficamente en la Figura 61. Además se puede observar que cuando se colocan más de 2 láminas de refuerzo la capacidad aumenta, pero la madera pasa a controlar la falla del elemento.

Al determinar las capacidades teóricas de las vigas de las vigas se partió de supuestos que no necesariamente se cumplieron, algunos por la alta complejidad en el reforzamiento de las vigas. Al modelar ambos materiales como homogéneos, elásticos e isotrópicos se incurrió en un error previamente conocido. Cuando se asignaron propiedades mecánicas al bambú se considero a este como homogéneo, aun cuando se comprobó la diferencia de rigidez que existe entre la zona del nudo y la zona del entrenudo. Se optó por considerar el refuerzo como un material con las propiedades mecánicas de la zona del nudo por ser esta la que menor resistencia a la tensión presentó.

El área de refuerzo compuesta por dos láminas de refuerzo no fue constante en toda la longitud de la viga, esto debido a la irregularidad de cada una de las láminas de bambú.

En la mayoría de las vigas no se dio la coincidencia de dos nudos contiguos entre las dos laminas de refuerzo. Por lo tanto en muchas secciones se tenía un nudo acompañado de la zona de entrenudos de la lámina vecina. Una zona es más rígida y más resistente, esto afecta la comparación de los resultados teóricos con los experimentales.

Ensayos de flexión estática sobre vigas reforzadas y sin reforzar

• Vigas sin refuerzo

Los resultados de los ensayos de flexión de las vigas sin refuerzo se resumen en el Cuadro 38. Se pueden apreciar los valores correspondientes a la carga experimental en el límite proporcional y en la falla, con la respectiva deformación en el límite proporcional en el centro de longitud de la viga.

Se obtuvo una carga ultima promedio de 2253.54 kg con un coeficiente de variación de 10.03%. Las curvas carga vrs deformación se pueden observar en el Apéndice 2.

En cada una de las curvas se trazó una recta que indica donde la curva deja de comportarse linealmente, conocido como limite proporcional. En ese punto se obtuvo la carga y la deflexión correspondientes al límite proporcional. Se obtuvo una deflexión en el límite proporcional de 1.22 cm. Las deflexiones se midieron hasta cierto límite de carga con el fin de proteger el deformimetro ante lo explosivo de la falla durante el ensayo.

En el Cuadro 39 se tabula el módulo de ruptura de cada una de las vigas. Se obtuvo un módulo de ruptura promedio de 515.79 kg/cm² con un coeficiente de variación de 10.03%. Si se compara este valor con el utilizado en los cálculos teóricos (755.30 kg/cm² para un contenido de humedad de 17.2%) se aprecia que el valor experimental representa un 68.30% del valor teórico reportado por Tuck³. Lo anterior se puede deber a que el modulo de ruptura reportado en la literatura es un promedio de muchos ensayos realizados sobre probetas libres de defectos. La probeta utilizada según la norma ASTM D143 tiene dimensiones de 25 mm x 25 mm x 410 mm, son elementos muy pequeños que reducen la posibilidad de encontrar defectos en

ellos. En elementos de tamaño real el módulo de ruptura disminuye considerablemente por los defectos. Haciendo referencia al Apéndice 1, la viga V-S-5 presentó el menor módulo de ruptura, esta tenía dos nudos ubicados muy cerca de la fibra extrema de tensión y muy cerca de la mitad de la luz de la viga, una zona donde la teoría indica que se presentan los esfuerzos de flexión más altos. En contraparte el espécimen V-S-9 tenía muchos nudos pero todos ubicados lejos de la zona central y aun más importante ubicados en la zona de compresión de la viga, con esta características fue la viga que presentó el mayor módulo de ruptura con 597.38 kg/cm².

Se aprecia la gran influencia que tienen los defectos en las propiedades de la madera, más importante aún es ubicar la menor cantidad de defectos en el patín de tensión de una viga donde causa pérdida de área y por lo tanto una reducción en la inercia de la sección.

El Cuadro 41 resume los aspectos más relevantes de la falla de cada espécimen. El pandeo excesivo se refiere a que la viga se deformó tanto que no mostró una superficie de falla bien definida. El termino frágil se aplicó cuando un espécimen perdió su capacidad estructural de forma repentina y dúctil si la viga fallo de forma gradual. En el Apéndice 4 se amplía la información de las fallas mediante una bitácora ilustrada con fotografías de la falla de cada uno de los especímenes.

En la Figura 62 se puede apreciar que la mayor cantidad de fallas ocurridas se produjeron por tensión, que en conjunto con el porcentaje de fallas por compresión refleja que predominaron las fallas por flexión como se esperaba.

En la Figura 63 se puede observar que el 80% de las fallas se ubicaron dentro del tercio central de las vigas. Y la Figura 64 refleja que el 70% de las fallas fueron frágiles, caracterizadas por ser explosivas y repentinas. En algunos casos se tuvieron desprendimientos de trozos de madera, que fueron expulsados de la viga.

- **Vigas con refuerzo**

En el Cuadro 42 se resumen, para todos los especímenes, los valores correspondientes a la carga experimental en el límite proporcional y en la falla, con la respectiva deformación en el límite proporcional en el centro de longitud de la viga.

Se obtuvo una carga ultima promedio de 2276.85 kg con un coeficiente de variación de 8.79%. Las curvas carga vrs deformación se pueden observar en el Apéndice 2. De igual manera que las vigas sin refuerzo se determinó el desplazamiento en el límite proporcional obteniéndose un valor de 1.54cm con un coeficiente de variación de 13.45%.

El Cuadro 44 presenta las características relevantes de las fallas para las vigas reforzadas. Se aprecia como todas las fallas fueron frágiles. En el Anexo 3 se amplía la información de las fallas.

Las fallas se presentaron en zonas donde existía al menos un nudo en el refuerzo de bambú. El espécimen que presentó la carga mínima fue la viga V-R-B con 1950.5 kg. La máxima carga la alcanzo la viga V-R-D con 2528.00 kg.

De la Figura 65 se infiere que en el caso de las vigas reforzadas predominaron las fallas en tensión.

En la Figura 66 se aprecia que el 100% de las fallas ocurrieron dentro del tercio medio de la viga. Es decir todas las fallas fueron en flexión.

En la Figura 67 se observa que todas las fallas en las vigas fueron frágiles.

Comparación de los resultados teóricos con los experimentales

- **Vigas sin refuerzo**

En el Cuadro 44 se compara la carga última experimental con la carga última teórica considerando la resistencia a cortante de madera. Se aprecia que en ningún caso se alcanzó la carga teórica. El espécimen V-S-9 fue el que más se acercó con un 34% de la carga teórica por cortante.

En el Cuadro 45 se compara la resistencia a momento teórica con la obtenida experimentalmente. En todos los casos la resistencia teórica es superior a la experimental.

El espécimen V-S-9 alcanza un 79% de la capacidad teórica siendo la que más resistencia presento. Cabe notar que la carga máxima P asociada al momento teórico es de 3300 kg que compara con la carga máxima por cortante presentada anteriormente (7038.29 kg) permite predecir una falla teórica por flexión.

Esta discrepancia entre valores teóricos y experimentales se puede asociar a la presencia de defectos en las vigas y a la gran variabilidad de las propiedades mecánicas de los materiales de origen natural.

- **Vigas reforzadas**

En el Cuadro 47 se compara la carga última experimental de las vigas reforzadas con la carga máxima teórica siguiendo el modo de falla en cortante. Como se aprecia la carga experimental es menor en todos los casos a la carga máxima teórica. Los especímenes V-R-D, V-R-F y V-R-J son los que se aproximan más a la carga teórica, a un 35% de esta.

En el Cuadro 48 se compara la resistencia en flexión experimental contra la resistencia teórica de las vigas con refuerzo. La capacidad experimental no iguala en ningún caso a la calculada teóricamente. El espécimen V-R-D se aproxima a un 76% de la capacidad teórica elástica. Cabe notar que la carga máxima P asociada al momento teórico es de 3348.60 kg que compara con la carga máxima por cortante presentada anteriormente (7129.40 kg) permite predecir una falla teórica por flexión.

En el Cuadro 49 se compara las pendientes teórica y experimental de la curva carga vs deflexión. Se aprecian diferencias porcentuales porcentajes de diferencia muy altas. Esto se debe a que la fórmula teórica utilizada únicamente considera deformaciones por flexión. Entre mayor sea el cociente de la longitud al peralte de la viga mejor predice esta fórmula las deformaciones.

Efecto experimental y teórico del refuerzo en el comportamiento de las vigas

En el Cuadro 50 se presentan las cargas últimas y las deflexiones últimas tanto para las vigas sin refuerzo como para las vigas reforzadas. No es posible realizar una comparación directa entre una viga sin refuerzo y otra reforzada, pero se puede apreciar que en la mayoría de los casos las cargas soportadas por las vigas reforzadas son mayores que la carga última de las vigas sin

refuerzo. Además se aprecia que en promedio carga máxima de una viga sin refuerzo fue de 2253.54 kg mientras que para las vigas reforzadas fue de 2276.85 kg. Por lo tanto en promedio se tuvo un leve aumento de capacidad, de 1 %.

También se puede ver que las vigas sin refuerzo sufrieron deflexiones elásticas mayores que las vigas con refuerzo. Esto se debe a la mayor rigidez del bambú, que por ende tiende a rigidizar la viga.

El Cuadro 51 presenta la relación entre el momento resistente de la viga reforzada y el momento resistente de la viga sin reforzar, tanto a nivel teórico como a nivel experimental. Como se puede apreciar teórica y experimentalmente (en promedio) se obtuvo un leve aumento de capacidad.

Se puede observar además que el porcentaje de aumento teórico y experimental son semejantes, aun cuando las capacidades en cortante y momento son sobreestimadas como se observo anteriormente.

Los ensayos a flexión mediante los cuales se determina el módulo de ruptura que es reportado en la literatura son realizados sobre muestras de madera de tamaño reducido en comparación con un elemento estructural de gran tamaño, esto provoca que las probetas de ensayo sean libres de defectos como nudos. Del Cuadro 39 se observa que el módulo de ruptura experimental promedio para las vigas de madera lamina de Pino Radiata sin refuerzo fue de 515.79 kg/cm². Del Cuadro 24 se aprecia que en los cálculos teóricos se utilizó un módulo de ruptura de 755.30 kg/cm². Claramente se aprecia que el valor teórico utilizado es superior a lo obtenido experimentalmente, el efecto de los defectos como los nudos es crítico en la zona de tensión de la sección transversal de una viga ya que disminuye el área y por lo tanto la inercia de la sección.

Además el módulo de ruptura es un criterio de resistencia aceptado en la práctica que es calculado con la fórmula elástica M_c / I , pero este no es el esfuerzo realmente alcanzado por la madera en la falla. Es un valor ubicado entre el esfuerzo de compresión y el esfuerzo de tensión ($F_c < MOR < F_t$).

Por lo tanto el modelo teórico utilizado para calcular la capacidad probable de vigas estima adecuadamente el efecto del refuerzo con

bambú. Sobreestima la capacidad ya que en un modelo como este se hacen muchas suposiciones y simplificaciones de la realidad.

Conclusiones

Ensayos físico-mecánicos sobre muestras de bambú

- Los nudos son la parte más débil de las láminas de bambú utilizadas como refuerzo.
- La diferencia de resistencia entre la zona del nudo y la zona del entrenudo evidencia la gran ventaja que se tendría al utilizar esta parte del culmo de bambú. Pero existe la gran desventaja de que la sección utilizable sería muy corta.
- Cuando se utilizan secciones completas del culmo, como las láminas utilizadas en esta investigación, no es posible usar la resistencia de la zona de entrenudo porque los nudos son los factores limitantes.
- El espécimen desarrollado para determinar la resistencia a la compresión de láminas de bambú permite obtener resultados satisfactorios. Se debe garantizar una excelente fabricación de los especímenes.
- Los valores de las pruebas exploratorias (contenido de humedad, densidad, tensión y compresión) son bajos comparados con la literatura posiblemente porque el material disponible no necesariamente era de la mejor calidad y no se encontraba en condiciones óptimas de almacenamiento.

Vigas con y sin refuerzo

- Se comprobó experimentalmente que las vigas reforzadas tienen en promedio un aumento de 2% en su resistencia al momento respecto a las vigas sin reforzar.
- El porcentaje de aumento es muy bajo, por lo que se requiere de un análisis de costo-beneficio con el fin de estudiar la factibilidad del uso de este tipo de

refuerzo o un aumento de la sección transversal sin refuerzo.

- Tanto las vigas reforzadas como las vigas sin reforzar tienen un comportamiento frágil y se comportan elásticamente. Todas las fallas en tensión se caracterizaron por ser frágiles, explosivas y en la mayoría de casos propiciaron la división de la viga en dos partes.
- Los resultados experimentales son menores que los calculados analíticamente, esto es debido a que se asume que los parámetros mecánicos en el caso de la madera son el promedio de una probeta libre de defectos.
- La resistencia a la flexión de un elemento de madera de tamaño natural se ve reducida por defectos como los nudos.
- Todas las vigas reforzadas presentaron colapsos provocados por la ruptura de las láminas de bambú en la región de algún nudo.
- Los resultados experimentales son menores que los calculados analíticamente debido a que se asumen valores de resistencia a la flexión y resistencia al corte que son promedio de una probeta libre de defectos.
- El estudio teórico mostró buena concordancia con los resultados experimentales al predecir un leve aumento de resistencia en las vigas reforzadas y al predecir fallas controladas por tensión.
- El modelo teórico utilizado para calcular la capacidad probable de vigas estima adecuadamente el efecto del refuerzo con bambú. Sobreestima la capacidad ya que en un modelo como este se hacen muchas suposiciones y simplificaciones de la realidad.
- Las pendientes experimentales y teóricas de las curvas carga vs deformación no

tienen magnitudes similares, lo que es esperado tomando en cuenta que la fórmula analítica considera desplazamientos únicamente por flexión.

- Teóricamente la adición de más de una lámina de refuerzo resulta en un aumento de resistencia a la flexión. Con 5 láminas de refuerzo se lograría un aumento de 65 %.

Recomendaciones

- Ampliar esta investigación utilizando varias capas de láminas de bambú como refuerzo. Con el fin de corroborar la tendencia teórica de aumentar la resistencia de la viga de madera al aumentar el espesor del refuerzo. También utilizando laminas de bambú como refuerzo en compresión.
- Estudiar el comportamiento de vigas de sección "I" con alas conformadas de láminas de bambú y el alma de madera.
- Realizar un análisis costo-beneficio para determinar la viabilidad del uso de bambú laminado como refuerzo en vigas de madera.
- Realizar otros estudios en los cuales, en lugar de Pino Radiata, se utilicen otras especies nacionales de menor capacidad estructural con el fin de determinar si existe un mayor aporte del refuerzo de bambú a la capacidad estructural de las vigas.
- El bambú utilizado para el estudio se preparo de manera completamente artesanal, lo que limito mucho la calidad del material que se utilizo en la elaboración de las vigas y por ende influyo en los resultados. En ese sentido se recomienda el uso de bambú con un proceso de elaboración más industrializado.
- Para obtener resultados confiables se debe contar con material muestreado según las normas.
- Estudiar el comportamiento de láminas de bambú unidas a otras láminas de bambú mediante cola estructural.
- Al utilizar vigas estructurales de madera se debe de tratar de ubicar el patín con menor cantidad de defectos como patín de tensión.
- Al adherir láminas de bambú a madera se debe inspeccionar que toda la superficie del bambú quede unida por completo a la madera y entre sí.
- Cuando se realicen ensayos de tensión en láminas de bambú se deben de medir las deformaciones propiamente en el espécimen. Es recomendable la utilización de medios electrónicos como galgas extensométricas.
- Se recomienda aplicar un mayor control de los defectos y alabeos en la selección de los elementos que conforman las vigas laminadas.
- En proyectos de este tipo, en que participa una empresa interesada en los resultados, es importante mayor seguimiento por parte de alguien de la empresa, de modo que los resultados respondan a las expectativas de la empresa y también el apoyo para el estudiante en cuanto a información o material de la empresa.

Apéndices

En este apartado se incluyen los siguientes apéndices:

- 1) Defectos en las vigas.
- 2) Curvas Carga-Deflexión de las vigas.
- 3) Bitácora de los ensayos de flexión.
- 4) Determinación del módulo de elasticidad en tensión del bambú
- 5) Aplicación del desarrollo teórico.
- 6) Esquemas del equipo para el ensayo de flexión.

Referencias

1. Hidalgo, O. 1974. **Bambú: cultivo y aplicaciones en fabricación de papel, construcción, arquitectura, ingeniería y artesanías**. ITALGRAF, Cali, Colombia. 318 p.
2. Tuk Duran, J. 2007. **Madera: Diseño y construcción**. Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica.
3. Popov, E. 2000. **Mecánica del Solido**. Pearson Education, México, Segunda edición.
4. Morales, D. 2002. **Análisis de la población y productores de bambú en Costa Rica**. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 33 p.
5. Arce, O. 1993. **Fundamentals of the design of bamboo structures**. Eindhoven: Faculteit Bouwkunde, Technische Universiteit Eindhoven.
6. Sotela Motero, J. 1990. **Determinación de propiedades físicas y mecánicas del bambú de la especie guadua de dos zonas de Costa Rica**. Informe final para el proyecto Nacional de Bambú. Universidad de Costa Rica. Laboratorio de Productos Forestales, Laboratorio de Materiales y Modelos Estructurales. 65pp
7. González Beltrán G. 2008. **Diseño de estructuras de madera**. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica.
8. Aldo Ramírez C. **Bambú y caña brava: Propiedades físicas, químicas, de secado y de combustión de siete especies de Costa Rica y Nicaragua**. Laboratorio de productos forestales, Laboratorio de materiales y modelos estructurales, Universidad de Costa Rica.
9. Jaime Sotela Montero.1990. **Manual de ensayos Físicos - Mecánicos para especímenes de bambú**. Laboratorio de productos forestales, Laboratorio de materiales y modelos estructurales, Universidad de Costa Rica.
10. Liese, W.1985. **Bamboos: Biology, silvics, properties, utilization**. GTZ.
11. Janssen.J.2000. **Designing and Bulding with Bamboo**. Technical University of Eindhoven, The Netherlands International Network for Bamboo and Rattan.
12. Montiel, M. Murillo, L.1998. **Historia ecológica y aprovechamiento del bambú**. Revista Biología Tropical, 46(3):11-18.
13. Londoño, X. 1998. **A decade of observations of a Guadua angustifolia plantations in Colombia**.En: *The Journal of the American Bamboo Society*, Vol. 12 (1), p. 37-42.
14. Ciro, H. Osorio, J. Velez, J. 2005. **Determinación de la resistencia mecánica a tensión y cizalladura de la Guadua angustifolia kunth**. Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellin, Colombia. Vol 58 ,#1. Julio

15. Moreno, L. Osorio, L. Trujillo. 2006. **Estudio de las propiedades mecánicas de haces de fibra de Guadua agustifolia**. E. Ingeniería y desarrollo #20. Julio-Diciembre, Colombia.
16. Chacón, A. I. Montiel, M. 1998. **Efecto de la edad y sección del culmo en la propagación asexual de *Guadua chacoensis* y su respuesta a la cobertura con *Pennisetum purpureum* var: King Grass (*poaceae*)**. Revista Biología Tropical 46(3):19-27
17. Londoño, X. 2001. **La Guadua, un bambú importante de América**. Revista PROCAÑA, 56:10-14.
18. Londoño X. 1999. **Evaluation of bamboo resources in Latin America**. INBAR Red Internacional del Bambú y Ratán. Ed. Cali, Colombia. 65 p.
19. Londoño, X. 1992. **Distribución, morfología, taxonomía, anatomía, silvicultura y usos de los bambúes del nuevo mundo**. INCIVA, Cali, Colombia. 56 p.
20. Shedden J. 1988. **Estudio experimental en vigas de concreto reforzadas con bambú**. Informe final para obtener el grado de licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica.
21. Fallas Fernández A. 2009. **Comportamiento estructural de vigas I de madera prefabricada producidas en Costa Rica**. Informe final para obtener el grado de licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica.
22. González Beltrán G. 1999. **Comportamiento estructural de paneles de bambú**. Informe final para obtener el grado de licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica.
23. American society of testing for materials (ASTM): **“ASTM D143-94: Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber”**.
24. American society of testing for materials (ASTM): **“ASTM D198-05. Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes”**.
25. American society of testing for materials (ASTM): **“ASTM D3737-04. Standard Practice for Establishing Allowable Properties for Structural Glued Laminated Timber (Glulam)”**.
26. **ISO/TR 22157-2. Bambo: Determination of physical and Mechanical properties —Part 2: Laboratory manual.**
27. **ISO/DIS -22156. Bamboo Structural Design.**
28. **Norma Chilena. NCh 1198-2006. Madera –Construcciones en Madera – Calculo**
29. **Norma Chilena. NCh 2165. Madera laminada-tensiones admisibles para la madera laminada encolada estructural de pino radita**
30. **Manual de especificaciones y manipulación de la madera laminada Xilolam. GrupoXilo.**

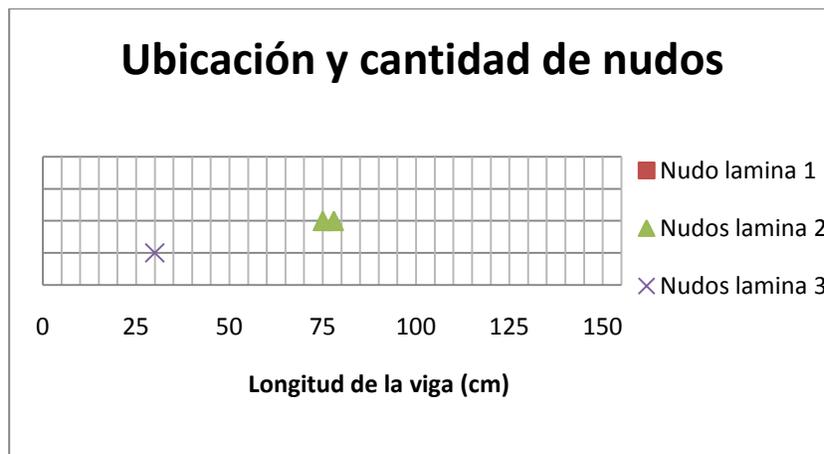
31. Lima, H. Dias, A. 2001. **Vigas mistas de madeira de reflorestamento e bambu laminado colado: análise teórica e experimental.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v5. n3. p519-524.

Apéndice 1: Defectos en las vigas

El objetivo de este apéndice es mostrar la ubicación de defectos puntuales a lo largo de las vigas con y sin refuerzo. En el caso de las vigas no reforzadas se ubican los nudos en la madera según su posición en la luz de la viga y en su peralte. Para las vigas reforzadas se ubican los nudos en el refuerzo de bambú según su posición en la luz de la viga. No se ubican nudos en la madera para las vigas reforzadas.

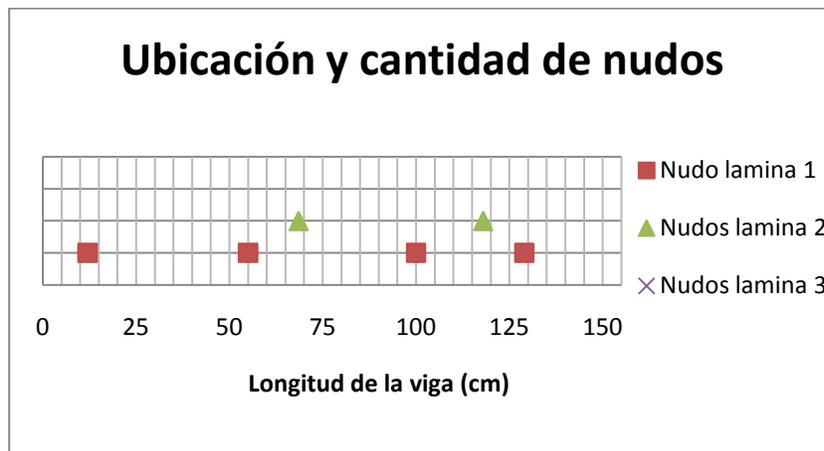
Vigas No Reforzadas

- VS1



Posición de los defectos puntuales en el espécimen VS1.

- VS2



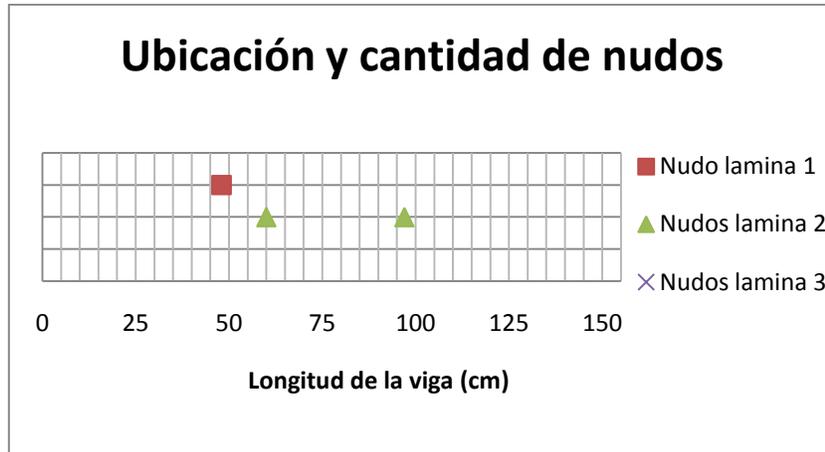
Posición de los defectos puntuales en el espécimen VS2.

- VS3



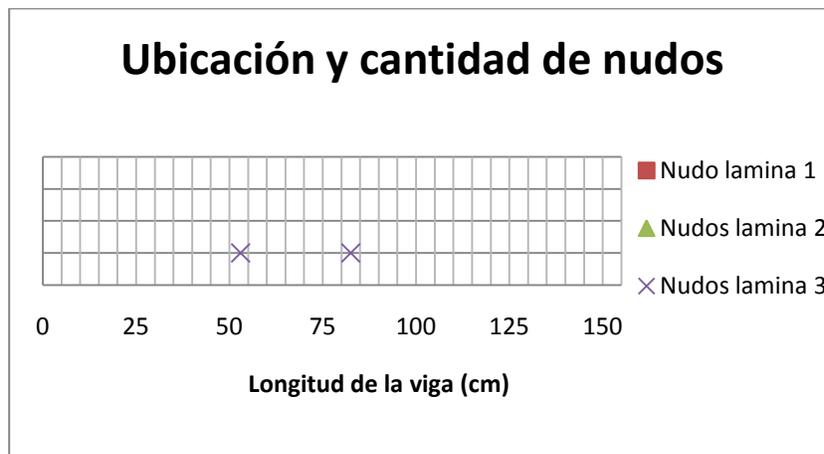
Posición de los defectos puntuales en el espécimen VS3.

- VS4



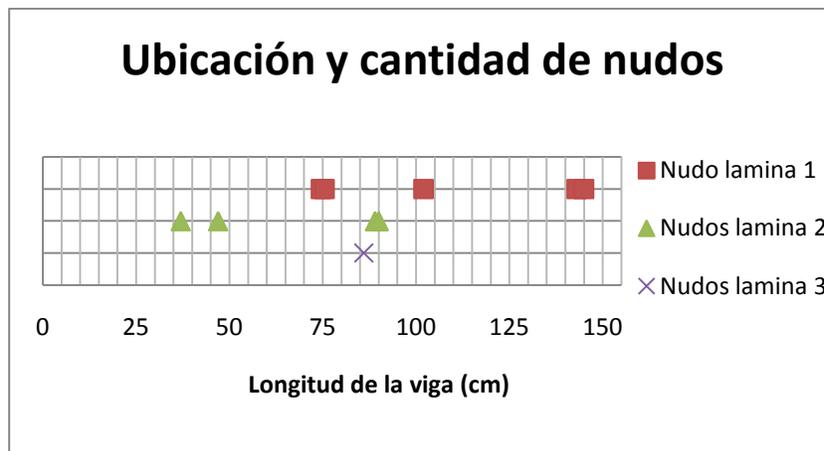
Posición de los defectos puntuales en el espécimen VS4.

- VS5



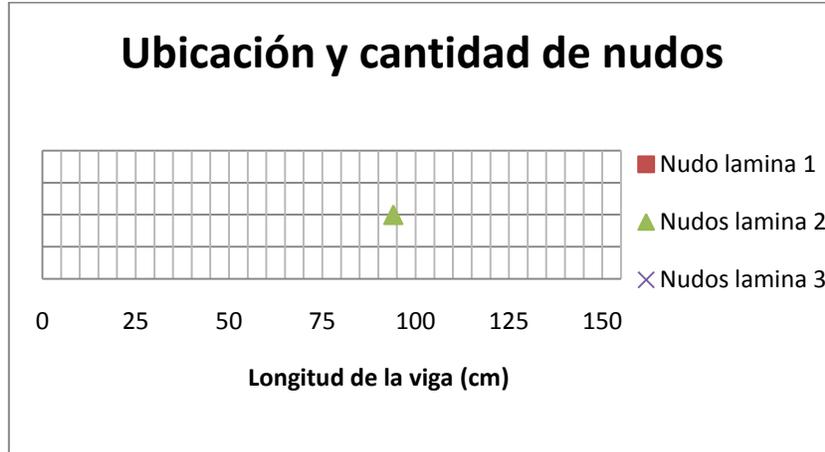
Posición de los defectos puntuales en el espécimen VS5.

- VS6



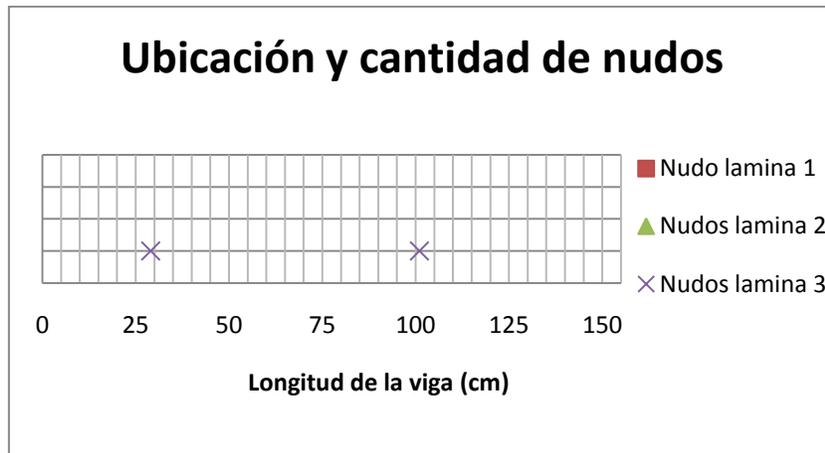
Posición de los defectos puntuales en el espécimen VS6.

- VS7



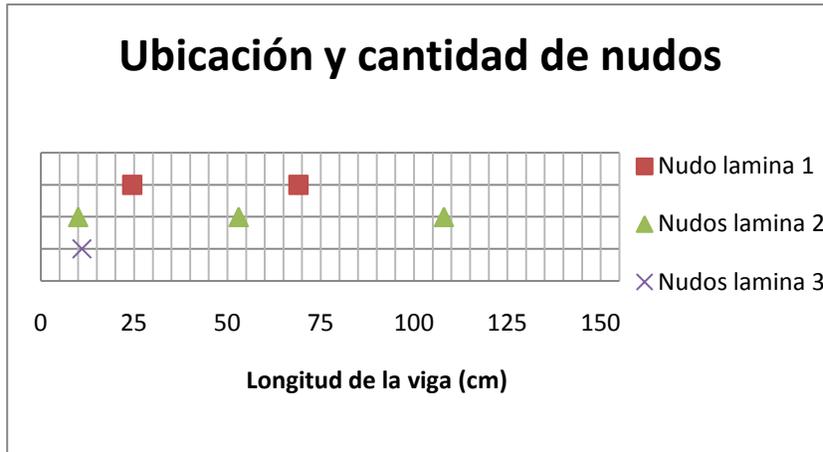
Posición de los defectos puntuales en el espécimen VS7.

- VS8



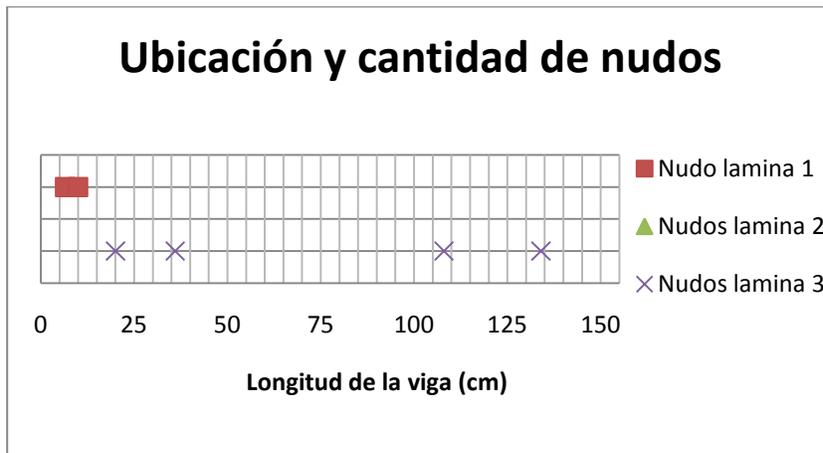
Posición de los defectos puntuales en el espécimen VS8.

- VS9



Posición de los defectos puntuales en el espécimen VS9.

- VS10



Posición de los defectos puntuales en el espécimen VS10.

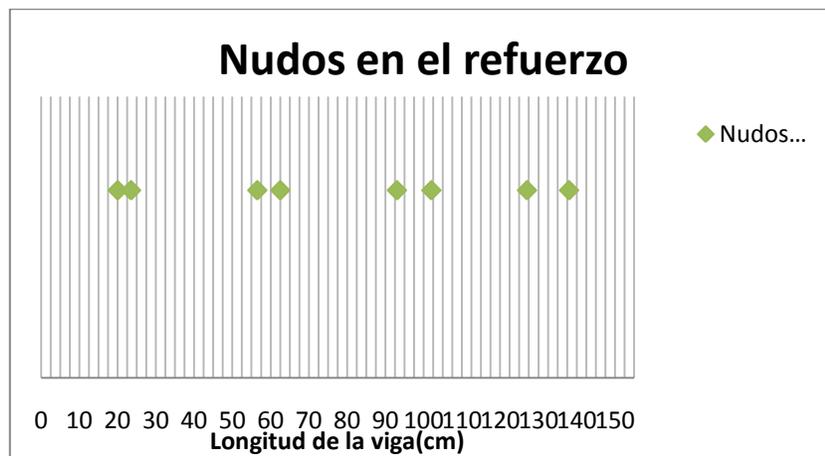
Vigas Reforzadas

- VRA



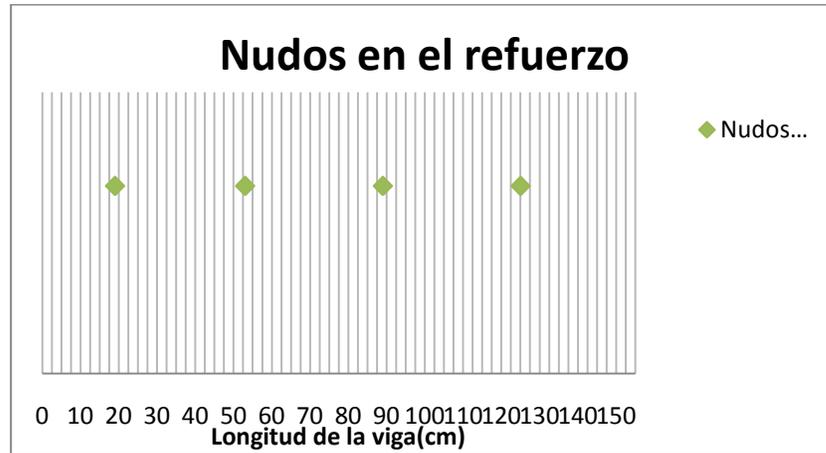
Posición de los nudos en el refuerzo para el espécimen VRA.

- VRB



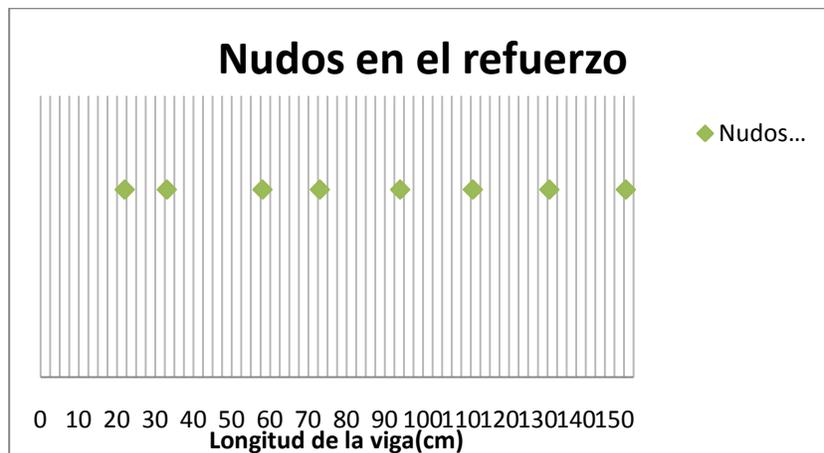
Posición de los nudos en el refuerzo para el espécimen VRB.

- VRC



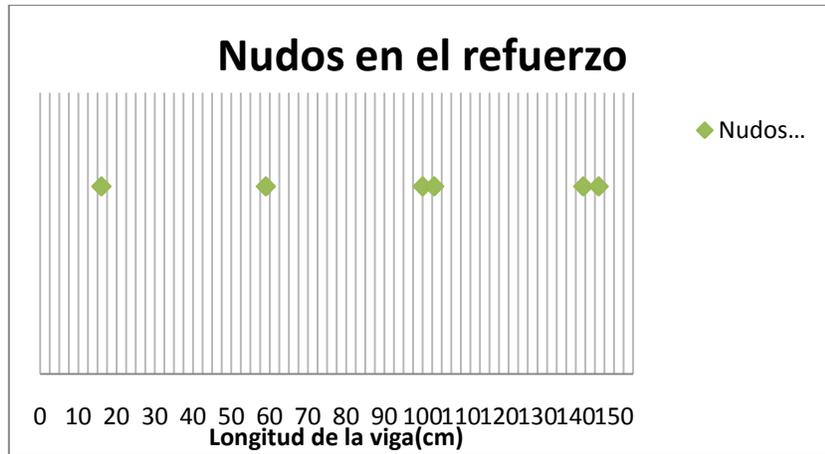
Posición de los nudos en el refuerzo para el espécimen VRC.

- VRD



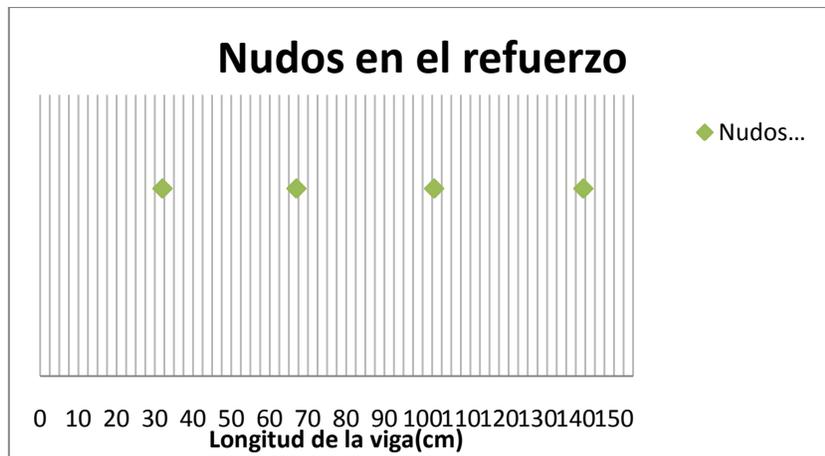
Posición de los nudos en el refuerzo para el espécimen VRD.

- VRE



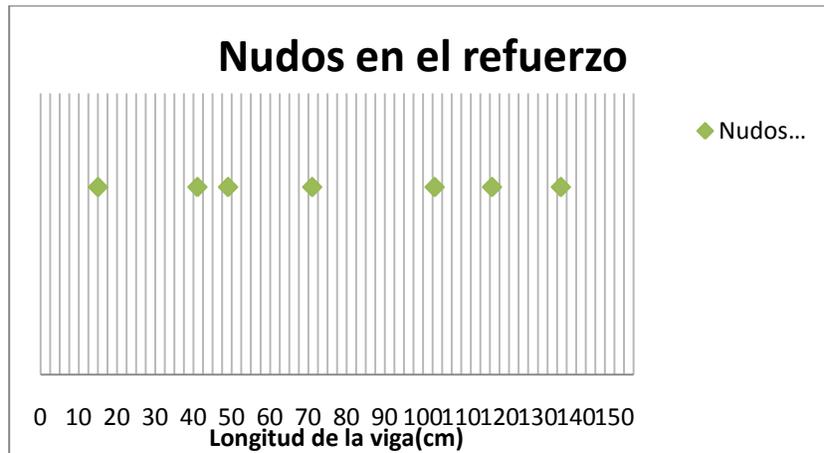
Posición de los nudos en el refuerzo para el espécimen VRE.

- VRF



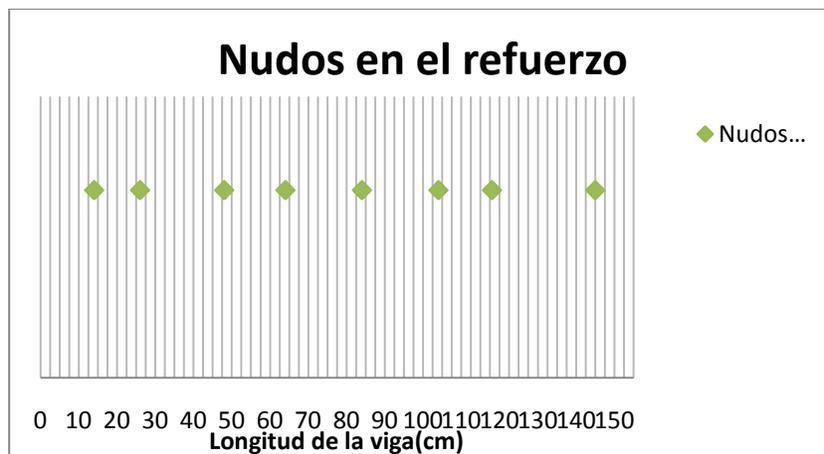
Posición de los nudos en el refuerzo para el espécimen VRF.

- VRG



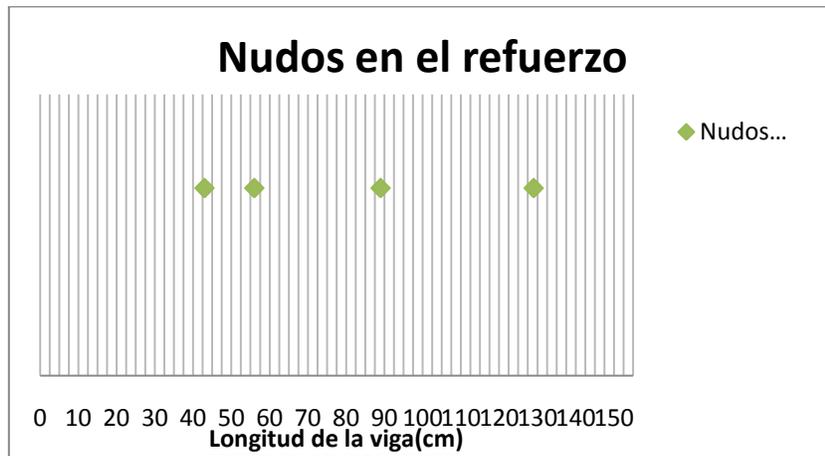
Posición de los nudos en el refuerzo para el espécimen VRG.

- VRH

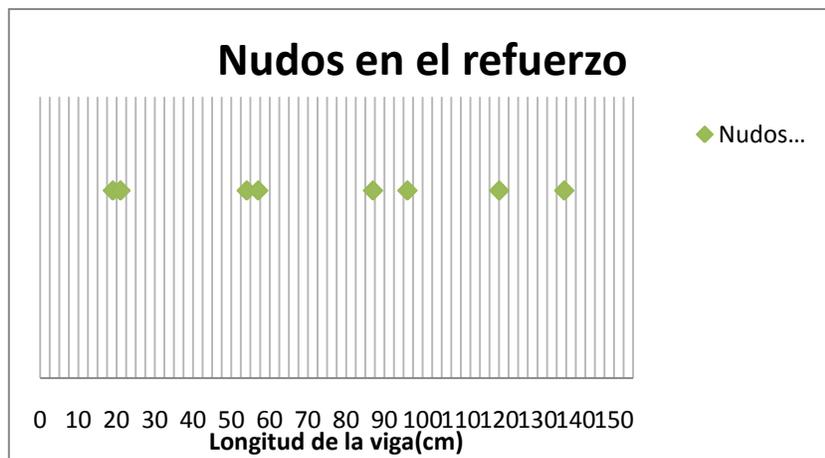


Posición de los nudos en el refuerzo para el espécimen VRH.

- VRI



Posición de los nudos en el refuerzo para el espécimen VRI.

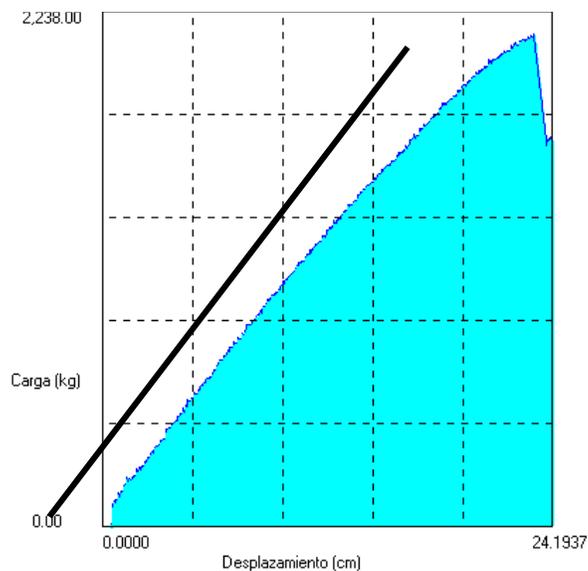


Posición de los nudos en el refuerzo para el espécimen VRJ.

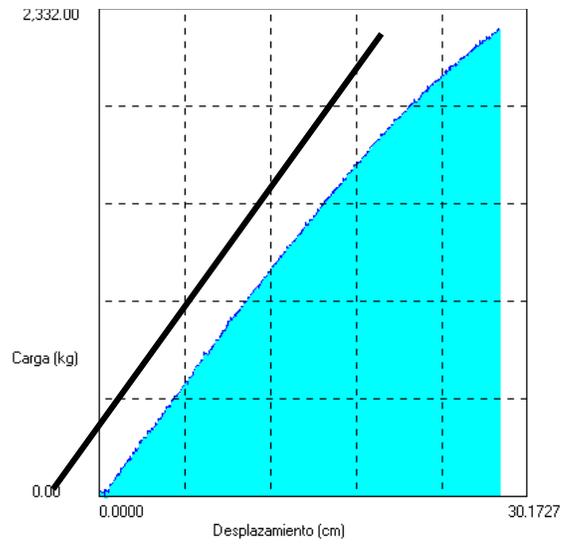
Apéndice 2: Curvas carga-deflexión de las vigas

Se muestran las curvas carga versus deflexión para cada espécimen de falla. La deflexión es medida a la mitad de la distancia entre apoyos (155cm). En cada curva se presenta la recta que representa el comportamiento lineal de la grafica hasta un punto dado (Limite Proporcional) donde deja de comportarse linealmente.

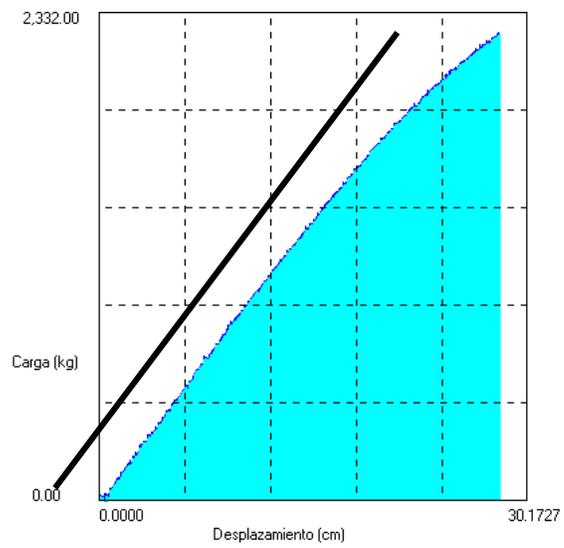
2.1-Vigas laminadas de madera de Pino Radiata



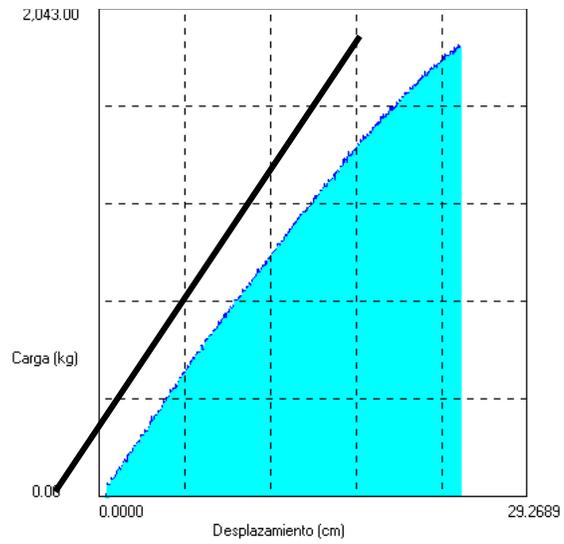
Grafica carga – deformación para el espécimen VS1



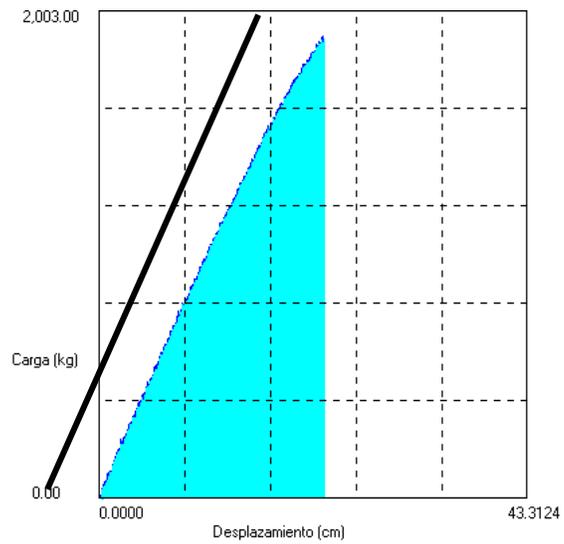
Grafica carga – deformación para el espécimen VS2



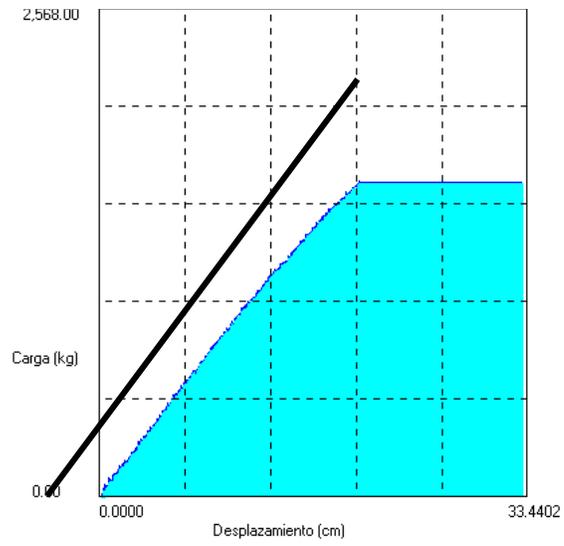
Grafica carga – deformación para el espécimen VS3



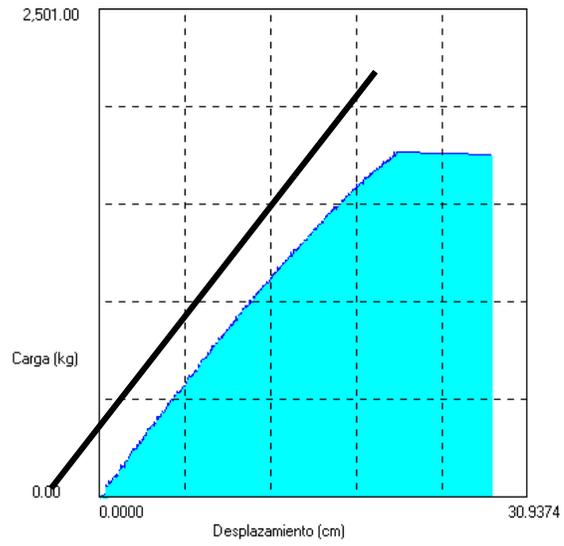
Grafica carga – deformación para el espécimen VS4



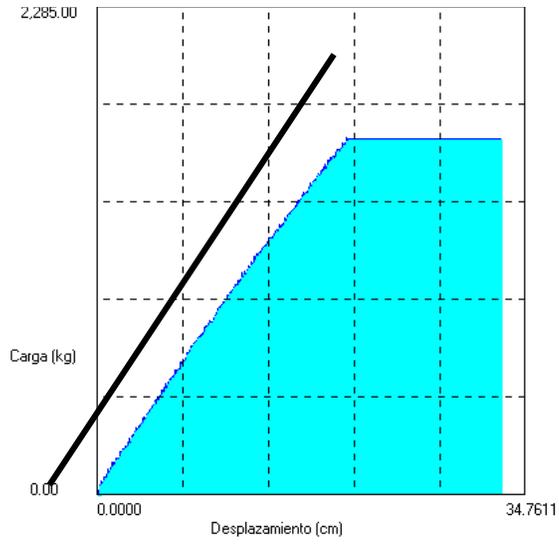
Grafica carga – deformación para el espécimen VS5



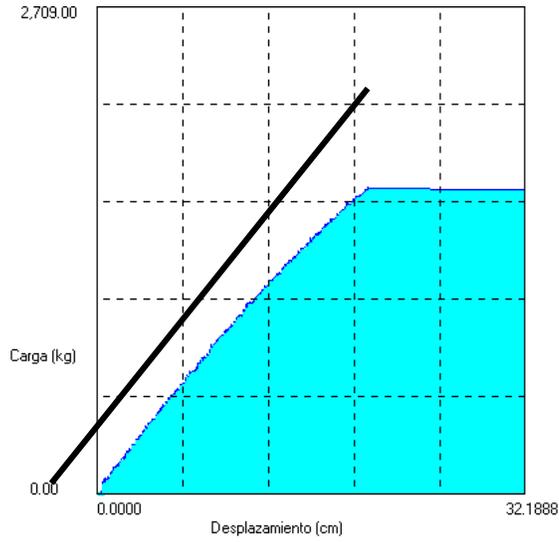
Grafica carga – deformación para el espécimen VS6



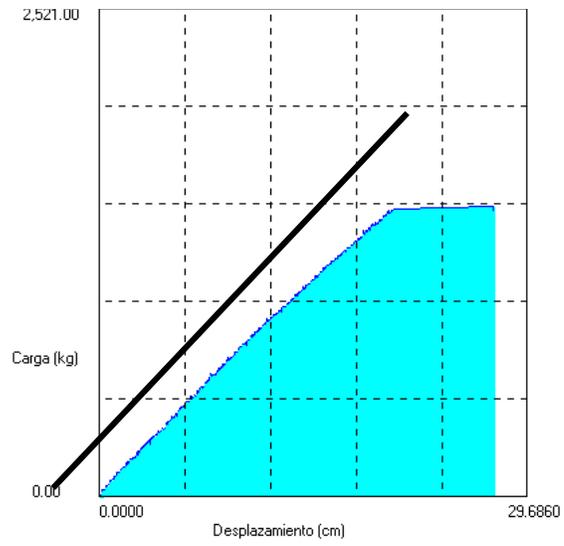
Grafica carga – deformación para el espécimen VS7



Grafica carga – deformación para el espécimen VS8

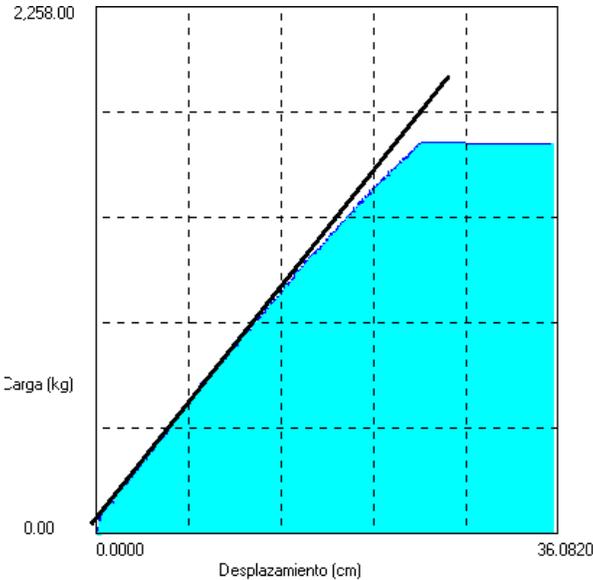


Grafica carga – deformación para el espécimen VS9

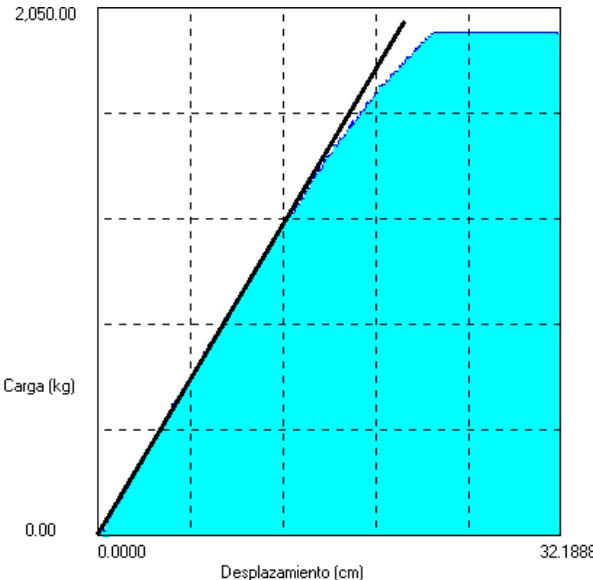


Grafica carga – deformación para el espécimen VS10

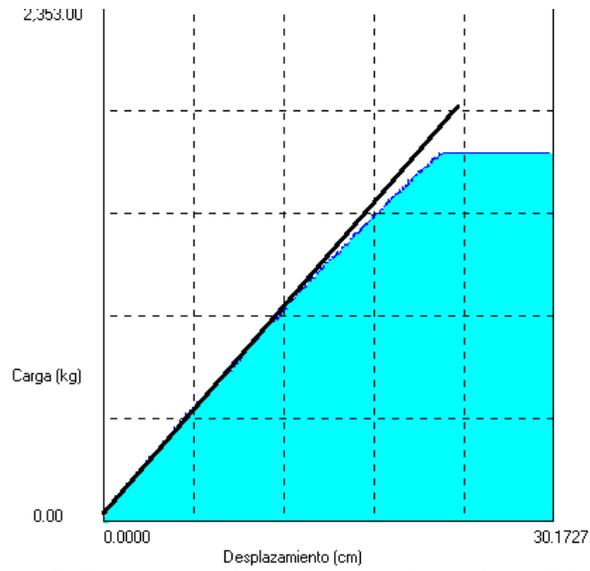
3.2-Vigas de madera reforzadas con bambú.



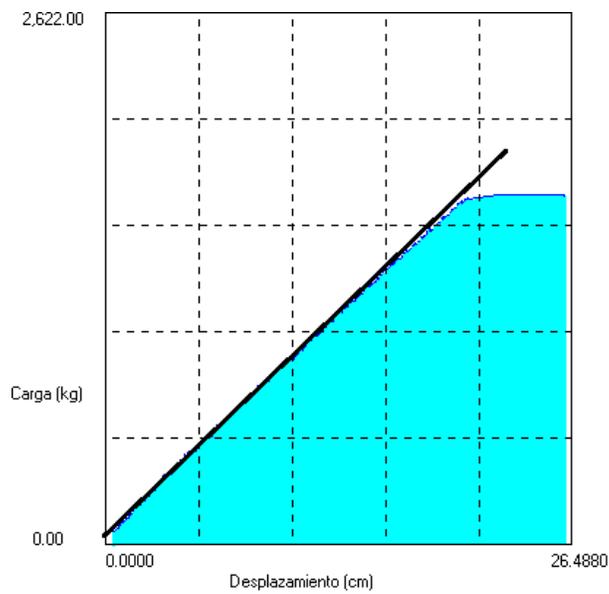
Grafica carga – deformación para el espécimen VRA



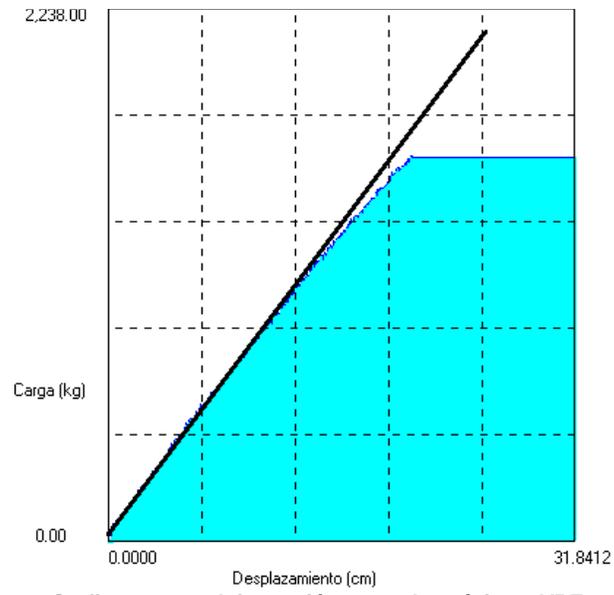
Grafica carga – deformación para el espécimen VRB



Grafica carga – deformación para el espécimen VRC



Grafica carga – deformación para el espécimen VRD



Grafica carga – deformación para el espécimen VRE

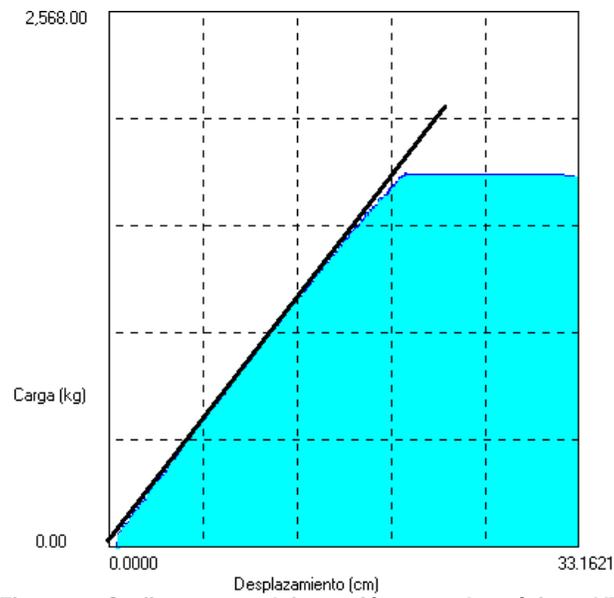
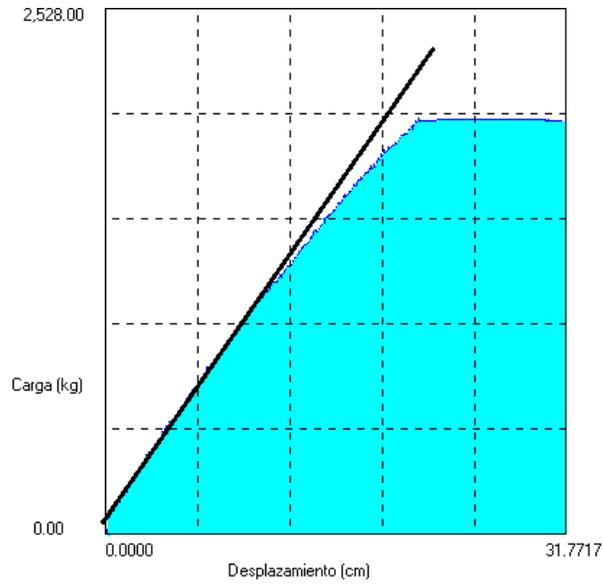
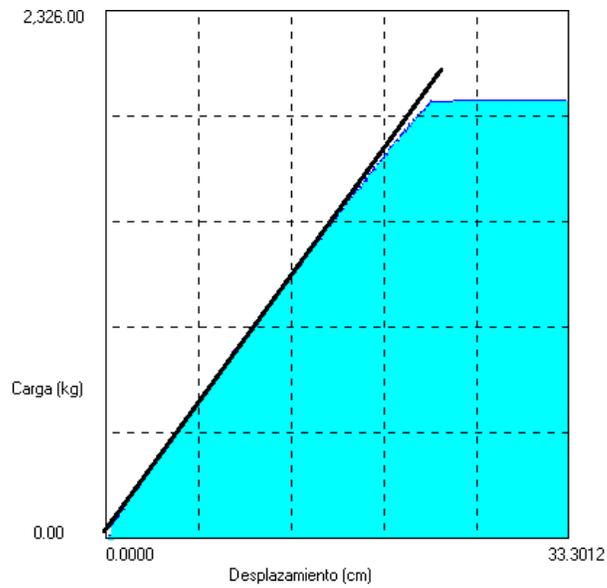


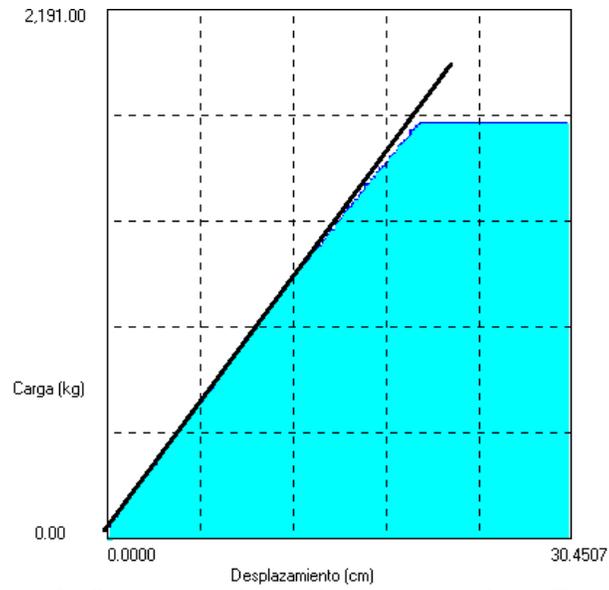
Figura xx. Grafica carga – deformación para el espécimen VRF



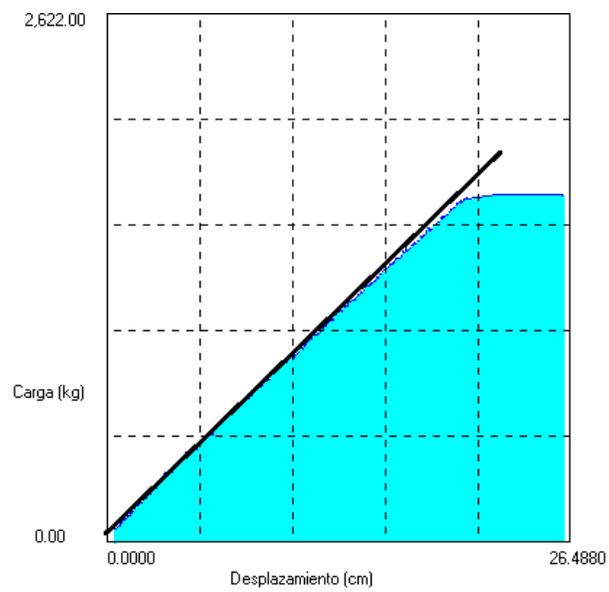
Grafica carga – deformación para el espécimen VRG



Grafica carga – deformación para el espécimen VRH



Grafica carga – deformación para el espécimen VRI



Grafica carga – deformación para el espécimen VRJ

Apéndice 3: Bitácora de los ensayos de flexión.

Se presenta la descripción de cada ensayo de flexión, a partir de las observaciones hechas durante cada ensayo.

Vigas sin refuerzo

Falla VS1

Velocidad del ensayo: 2.5 mm/min

Tiempo de ensayo: 4min 53s

La falla se dio en el tercio central de la viga. La misma fue por tensión frágil. La viga pierde su integridad estructural, falla explosiva. Al agrietarse la fibra extrema en tensión la grieta se propaga hasta hacer contacto con la línea de cola que une dicha lamina con la superior.



Detalle de falla por tensión en el espécimen VS1

Falla VS2

Velocidad del ensayo: 2 mm/min

Tiempo de ensayo: 10min 36s

La viga se mantiene íntegra estructuralmente. Cuando se tenían 10min 36 de ensayo el apoyo directo se desmontó. La viga presentó un elevado pandeo, este provocó que el apoyo derecho girara excesivamente. Falla dúctil.

Falla VS3

Velocidad del ensayo: 1.8 mm/min

Tiempo de ensayo: 4min 38s

Falla tipo frágil por tensión. Ubicada en el tercio central. La grieta por tensión se propaga aproximadamente a 45° hacia las láminas superiores de la viga. La viga pierde toda su capacidad estructural.



Detalle de falla por tensión en el espécimen VS3.

Falla VS4

Velocidad del ensayo: 1.8 mm/min

Tiempo de ensayo: 7min 57s

Falla tipo frágil por tensión. Ubicada en el tercio central, justo por debajo de un nudo de tamaño importante. La grieta llega al punto de ubicación del nudo. La grieta por tensión se propaga aproximadamente a 45° el apoyo derecho. La viga pierde toda su capacidad estructural.



Detalle de falla por tensión en el espécimen VS4.



***Detalle de falla por tensión en el espécimen VS4.
La grieta se propaga hacia uno de los apoyos.***

Falla VS5

Velocidad del ensayo: 1.8 mm/min

Tiempo de ensayo: 9min 00s

La falla se dio por cortante en el tercio izquierdo de la viga. Justo al lado del bloque de carga. Se produce la grieta y la misma se propaga paralela a la línea de cola hasta llegar al otro extremo de la viga. Falla frágil, explosiva y repentina. La viga pierde totalmente su capacidad estructural.



***Detalle de falla por cortante en el espécimen VS5.
La grieta se da en el tercio izquierdo.***



*Detalle de falla por cortante en el espécimen VS5.
Propagación de la grieta.*

Falla VS6

Velocidad del ensayo: 1.8 mm/min

Tiempo de ensayo: 12min 18s

Falla por compresión tipo dúctil. Se presentó en el tercio central al aplastarse las fibras superiores de la viga en ese punto. Presento alto pandeo. La viga mantiene su integridad estructural ya que la falla no es explosiva. Al descargar se aprecia una gran recuperación de deformación de la misma.



*Detalle de falla a compresión en el espécimen VS6.
Aplastamiento en la zona en compresión.*

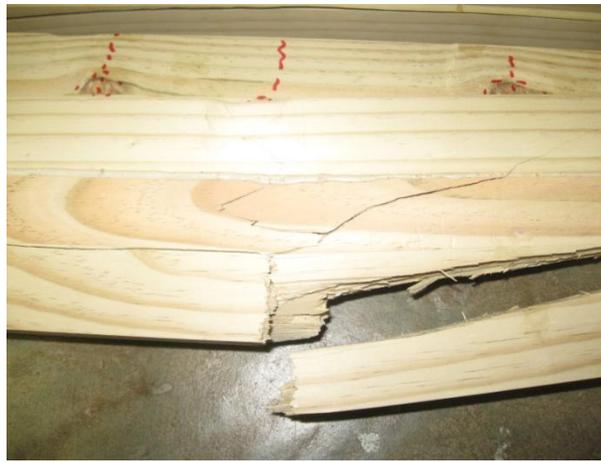


***Detalle de falla a compresión en el espécimen VS6.
Se aprecia la alta deformación y que la viga no pierde su integridad.***

Falla VS7

Velocidad del ensayo: 1.8 mm/min
Tiempo de ensayo: 12min 15s

Falla en tensión tipo frágil. Se dio en el tercio central de la viga. La falla fue explosiva. La viga pierde su integridad estructural. La grieta se presentó muy cerca de uno de los bloques de carga.



Detalle de falla a tensión en el espécimen VS7.

Falla VS8

Velocidad del ensayo: 1.8 mm/min

Tiempo de ensayo: 8min 41s

Falla en tensión tipo frágil. Sufrió alta de formación previa a la falla. Falla en el tercio central. El inicio de la falla se dio muy cerca del bloque de carga izquierda en la zona de tensión de la viga. Justo en la ubicación de un nudo de tamaño importante.



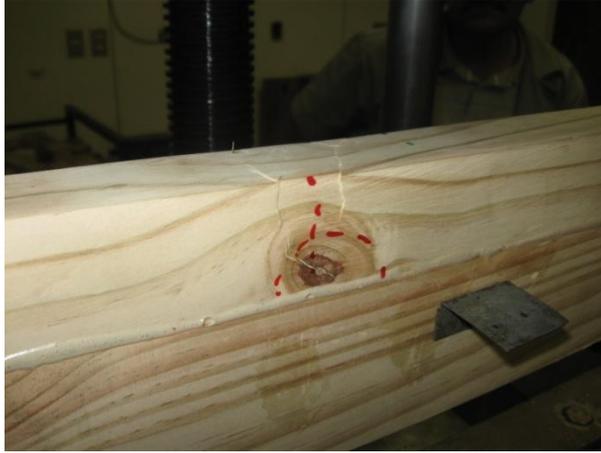
Detalle de falla a tensión en el espécimen VS8.

Falla VS9

Velocidad del ensayo: 1.8 mm/min

Tiempo de ensayo: 13min 50s

Falla en compresión tipo dúctil. Presenta alta deformación. El aplastamiento de las fibras en la zona de compresión es gradual y no repentino. La viga mantiene su integridad estructural. El aplastamiento se da en el tercio central de la viga.



*Detalle de falla en compresión del espécimen VS9.
Aplastamiento de la zona en compresión a la mitad de la viga.*



*Detalle de la alta deformación del espécimen VS9.
La viga se mantiene íntegra estructuralmente.*

Falla VS10

Velocidad del ensayo: 1.8 mm/min

Tiempo de ensayo: 12min 40s

Falla por cortante tipo frágil. Se da en el tercio izquierdo de la viga. La grieta se propaga a 45° aproximadamente, hasta el bloque de carga derecho. La viga pierde totalmente su capacidad estructural.



Detalle de la falla por cortante del espécimen VS10.



*Detalle de la falla por cortante del espécimen VS10.
La grieta se propaga hasta el bloque de carga derecho.*

Vigas reforzadas

Falla VRA

Velocidad del ensayo: 1.8 mm/min

Tiempo de ensayo: 8min 30s

La falla fue frágil, repentina y explosiva. Inicialmente se pudo observar el aplastamiento paulatino de las fibras superiores. Posteriormente fallo el refuerzo de bambú a tensión. La viga se separo en dos segmentos independientes.



Detalle de la falla por aplastamiento del espécimen VRA.



La viga VRA se segmenta en dos elementos independientes.

Falla VRB

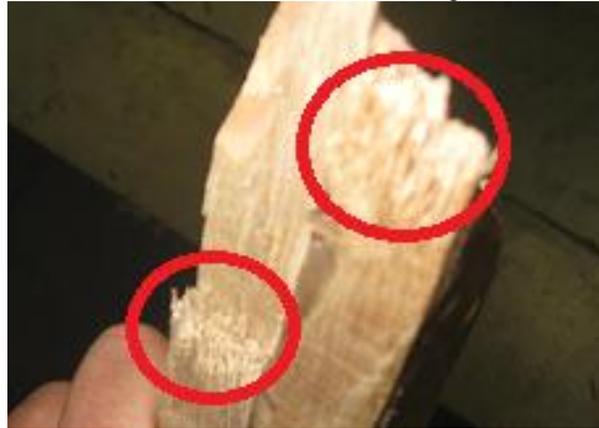
Velocidad del ensayo: 1.8 mm/min

Tiempo de ensayo: 6min 50s

La falla fue frágil e inesperada. Fue controlada por la tensión, como se muestra en la Figura xx el refuerzo fallo en uno de sus nudos. Posteriormente la madera fallo de forma explosiva.



Detalle de la falla en tensión de la viga VRB.



Falla de los nudos en el refuerzo de bambú.

Falla VRC

Velocidad del ensayo: 1.8 mm/min
Tiempo de ensayo: 10min 00s

Falla frágil y en tensión. Como en las otras vigas la falla del refuerzo se presentó en los nudos del mismo. La falla fue explosiva, la viga presentó alta deformación lo que permitió anticipar el momento de ruptura.



Detalle de la falla de la viga VRC.



Detalle de la falla en los nudos del refuerzo de bambú.

Falla VRD

Velocidad del ensayo: 1.8 mm/min

Tiempo de ensayo: 7min 28s

Como se observa en la siguiente figura, la falla inicio con la fractura del refuerzo de bambú en uno de sus nudos. Seguidamente la viga falla de manera frágil e inesperada. La falla ocurre dentro del tercio medio de la viga, por lo que se considera una falla en tensión.



Detalle de falla en la viga VRD.



Vista lateral de viga VRD posteriormente a la falla. Se aprecia el punto de origen de la fractura y la propagación de esta.

Falla VRE

Velocidad del ensayo: 1.8 mm/min

Tiempo de ensayo: 12min 20s

Falla en tensión dentro del tercio central de la viga. La falla fue explosiva y repentina, del tipo frágil. La viga presento una deformación apreciable a simple vista. Como se muestra en la figura siguiente el refuerzo fallo en tensión y posteriormente se dio la falla total del elemento.

En Figura xx se aprecia un desprendimiento de fibras en el bambú, se asocia el mismo a la baja capacidad a cortante paralelo a las fibras del bambú.



Falla del refuerzo a tensión en los nudos del mismo.



Desprendimiento de fibras en el refuerzo refuerzo

Falla VRF

Velocidad del ensayo: 1.8 mm/min

Tiempo de ensayo: 11min 25s

La falla fue por tensión, se origino en el tercio central de la viga. Se origino al fallar el refuerzo y posteriormente fallo la madera. La falla fue muy explosiva, frágil. Como se aprecia en una de las figuras la falla provoco que saliera disparado un bloque de madera.



Falla de la viga VRF



Desprendimiento de un bloque de madera producto de la falla explosiva.



Falla a tensión del refuerzo.



Detalle de la falla del bambú justo en uno de los nudos

Falla VRG

Velocidad del ensayo: 1.8 mm/min

Tiempo de ensayo: 13min 50s

Falla frágil, en tensión. Primeramente fallo el refuerzo y seguidamente la madera. La falla fue explosiva y repentina.



Falla de la viga VRG.



Falla en tensión del espécimen. Se aprecia la ruptura del refuerzo en un nudo.

Falla VRH

Velocidad del ensayo: 1.8 mm/min

Tiempo de ensayo: 7min 20s

La falla de la viga fue en tensión dentro del tercio medio de la viga. Se aprecio claramente la ruptura en tensión del refuerzo en uno de sus nudos. Falla frágil y explosiva con desprendimiento de trozos de madera.



Falla de la viga VRH.



Desprendimiento de bloques en la falla.



Falla a tensión del refuerzo.

Falla VRI

Velocidad del ensayo: 1.8 mm/min
Tiempo de ensayo: 6min 30s

La falla fue frágil, ocurrió dentro del tercio central de la viga. El refuerzo en tensión fallo en uno de sus nudos y posteriormente fallo explosivamente por completo la viga.



Falla de la viga VRI.



Falla en tensión del refuerzo.

Falla VRJ

Velocidad del ensayo: 1.8 mm/min

Tiempo de ensayo: 10min 23s

Falla tipo frágil por tensión. Ubicada en el tercio central. La grieta por tensión se propaga aproximadamente a 45° el apoyo derecho. La viga pierde toda su capacidad estructural. Se nota claramente la fractura del refuerzo en tensión en uno de sus nudos.



Falla de la viga VRJ.



Falla del refuerzo en tensión justo en uno de los nudos.

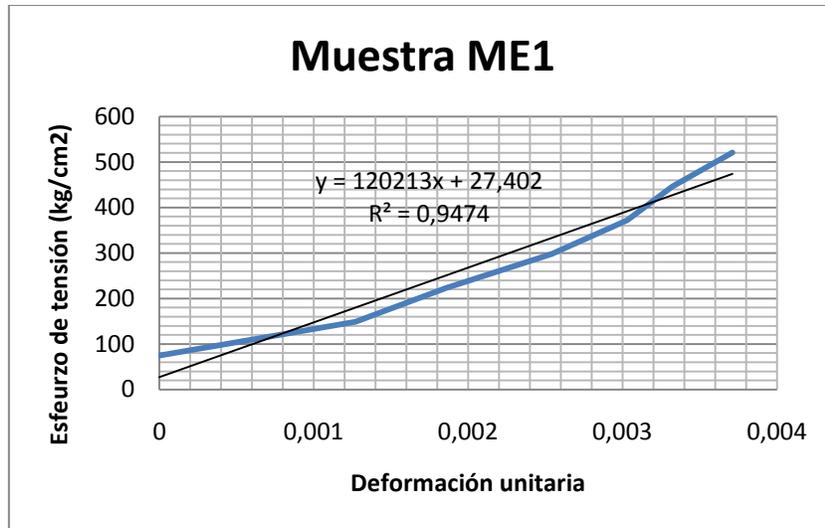


Vista lateral de la falla. Se aprecia el rompimiento

Apéndice 4: Determinación del módulo de elasticidad en tensión del bambú

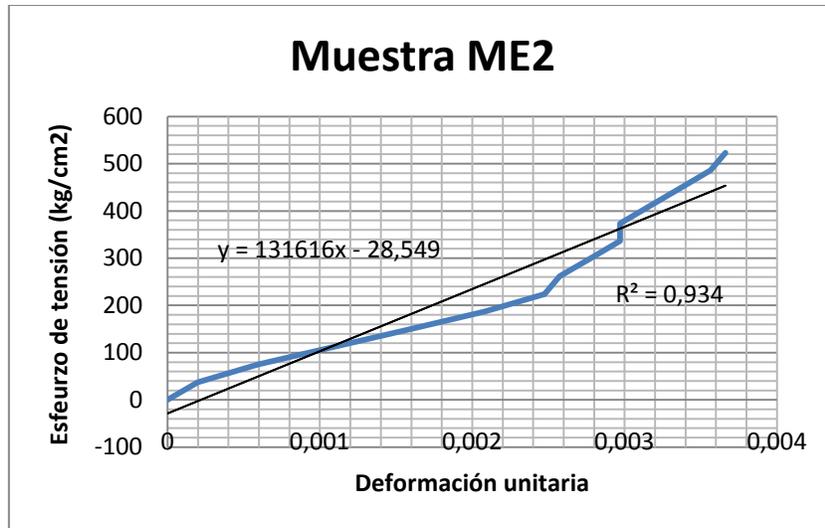
Se expone el método y los resultados obtenidos para el modulo de elasticidad en tensión del bambú Guadua utilizado en este trabajo. De los ensayos en tensión realizados, a cuatro de estos se les determino el modulo de elasticidad.

Determinación del modulo de elasticidad, espécimen ME1 (A=0.672cm²).				
Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Deformación (x 10 ⁻³ in)	Deformación (cm)	ε(cm/cm)
50	74.3777311	0	0	0
100	148.755462	6.5	0.01651	0.00127
150	223.133193	9.5	0.02413	0.00185615
200	297.510924	13	0.03302	0.00254
250	371.888656	15.5	0.03937	0.00302846
300	446.266387	17	0.04318	0.00332154
350	520.644118	19	0.04826	0.00371231
Pmax	365	kg		
σ max	542.957	kg/cm ²		
20%σ max	108.59	kg/cm ²		
80%σ max	434.37	kg/cm ²		
E	103490	kg/cm ²		

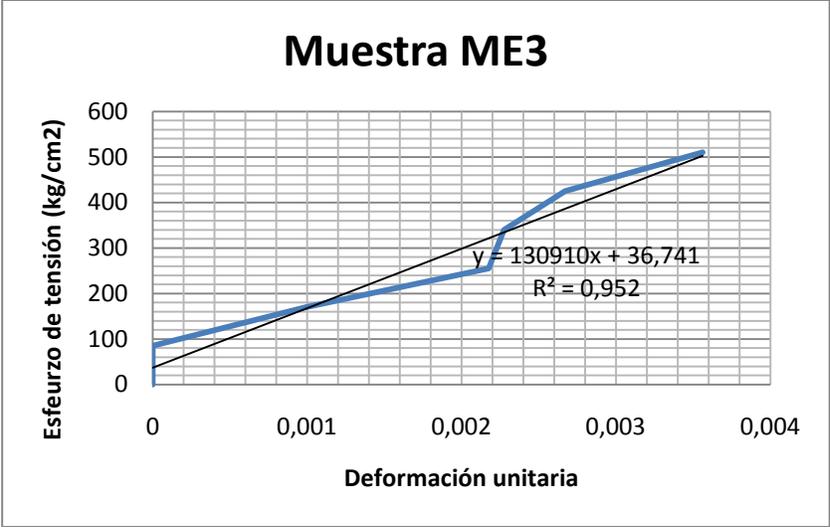


Curva esfuerzo vrs deformación para el espécimen ME1.

Determinación del modulo de elasticidad, espécimen ME2 (A=0.669cm²).				
Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Deformación (x 10 ⁻³ in)	Deformación (cm)	ε(cm/cm)
0	0	0	0	0
25	37.3637283	1	0.00254	0.00019797
50	74.7274565	3	0.00762	0.00059392
75	112.091185	5.5	0.01397	0.00108885
100	149.454913	8	0.02032	0.00158379
125	186.818641	10.5	0.02667	0.00207872
150	224.18237	12.5	0.03175	0.00247467
175	261.546098	13	0.03302	0.00257366
200	298.909826	14	0.03556	0.00277163
225	336.273554	15	0.0381	0.0029696
250	373.637283	15	0.0381	0.0029696
275	411.001011	16	0.04064	0.00316758
300	448.364739	17	0.04318	0.00336555
325	485.728467	18	0.04572	0.00356352
350	523.092196	18.5	0.04699	0.00366251
Pmax	365	kg		
σ max	545.51	kg/cm ²		
20%σ max	109.10	kg/cm ²		
80%σ max	436.40	kg/cm ²		
E	136377.60	kg/cm ²		



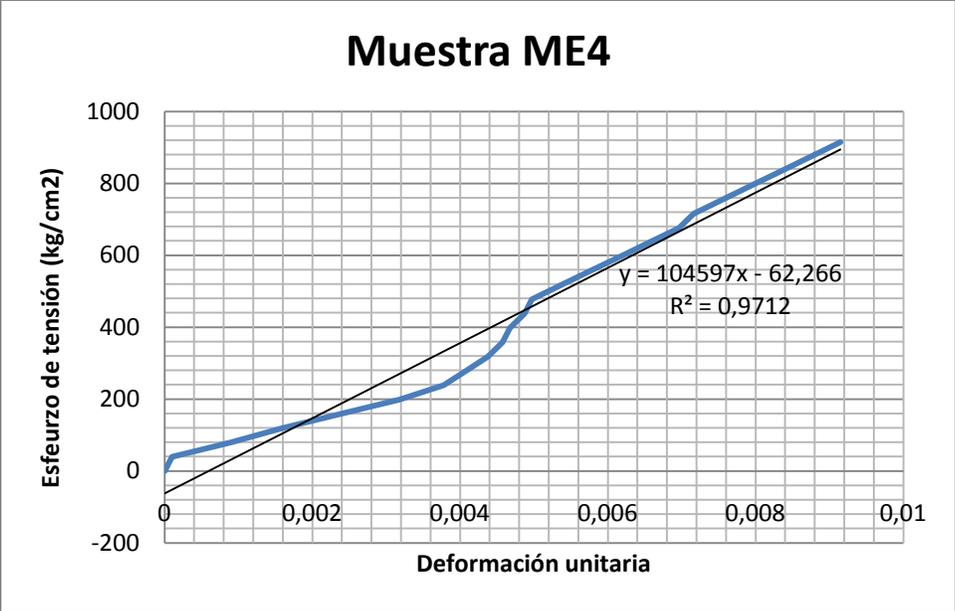
Determinación del módulo de elasticidad, espécimen ME3 (A=0.590cm ²).				
Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Deformación (x 10 ⁻³ in)	Deformación (cm)	ε(cm/cm)
0	0	0	0	0
50	85.0039442	0	0	0
100	170.007888	5	0.0127	0.0009891
150	255.011833	11	0.02794	0.00217601
200	340.015777	11.5	0.02921	0.00227492
250	425.019721	13.5	0.03429	0.00267056
300	510.023665	18	0.04572	0.00356075
Pmax	350	kg		
σ max	595.028	kg/cm ²		
20%σ max	119.005522	kg/cm ²		
80%σ max	476.022087	kg/cm ²		
E	127505.916	kg/cm ²		



Curva esfuerzo vrs deformación para el espécimen ME3.

**Determinación del modulo de elasticidad, espécimen ME4
(A=0.629cm²).**

Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Deformación (x 10 ⁻³ in)	Deformación (cm)	ε(cm/cm)
0	0	0	0	0
25	39.771981	0.5	0.00127	9.9444E-05
50	79.5439621	4.5	0.01143	0.000895
75	119.315943	8	0.02032	0.0015911
100	159.087924	12	0.03048	0.00238666
125	198.859905	16	0.04064	0.00318221
150	238.631886	19	0.04826	0.00377887
175	278.403867	20.5	0.05207	0.00407721
200	318.175848	22	0.05588	0.00437554
225	357.947829	23	0.05842	0.00457443
250	397.71981	23.5	0.05969	0.00467387
275	437.491792	24.5	0.06223	0.00487276
300	477.263773	25	0.0635	0.0049722
325	517.035754	27	0.06858	0.00536998
350	556.807735	29	0.07366	0.00576776
375	596.579716	31	0.07874	0.00616553
400	636.351697	33	0.08382	0.00656331
425	676.123678	35	0.0889	0.00696108
450	715.895659	36	0.09144	0.00715997
475	755.66764	38	0.09652	0.00755775
500	795.439621	40	0.1016	0.00795552
525	835.211602	42	0.10668	0.0083533
550	874.983583	44	0.11176	0.00875108
575	914.755564	46	0.11684	0.00914885
Pmax	575	kg		
σ max	914.75	kg/cm ²		
20%σ max	182.95	kg/cm ²		
80%σ max	731.80	kg/cm ²		
E	137213.33	kg/cm ²		



Curva esfuerzo vrs deformación para el espécimen ME4.

Anexo 5: Aplicación del desarrollo teórico

Ajuste de las propiedades de la madera a la humedad de ensayo

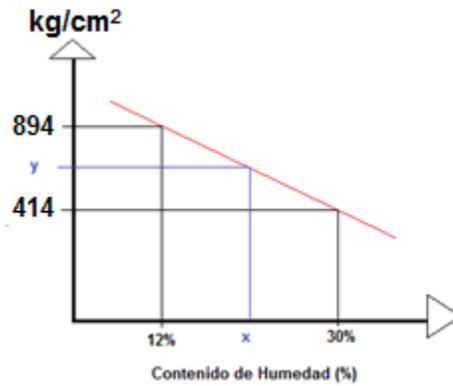
Las propiedades obtenidas de la literatura son reportadas para la condición verde y la condición seca al 12% de humedad. Las mediciones del contenido de humedad hechas a la madera utilizada en este trabajo indican en promedio un 17.2%. Se interpola linealmente para obtener las propiedades mecánicas a dicho contenido de humedad, esto con el fin de mejorar los resultados teóricos y usar parámetros mecánicos más apropiados.

Propiedades mecánicas promedio para Pino Radiata en estado verde.	
Módulo de ruptura (kg/cm²)	414
Módulo de elasticidad (kg/cm²)	65306
Esfuerzo de compresión (kg/cm²)	183
Esfuerzo de compresión ⊥ (kg/cm²)	33
Esfuerzo cortante (kg/cm²)	64

Propiedades mecánicas promedio para Pino Radiata en condición seca 12%.	
Módulo de ruptura (kg/cm²)	894
Módulo de elasticidad (kg/cm²)	96939
Esfuerzo de compresión (kg/cm²)	415
Esfuerzo de compresión ⊥ (kg/cm²)	60
Esfuerzo cortante (kg/cm²)	119

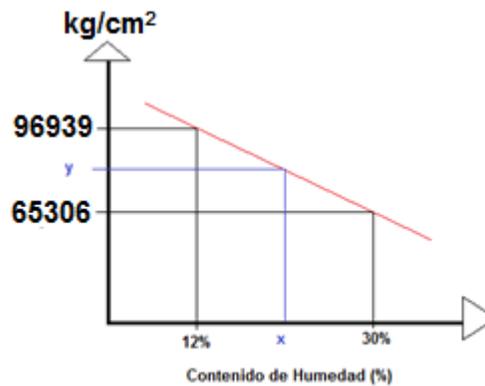
Interpolación para el Módulo de Ruptura

Interpolando para un contenido de humedad de 17.2% se tiene un módulo de ruptura de:
755.30 kg/cm²



Interpolación para el Módulo de Elasticidad

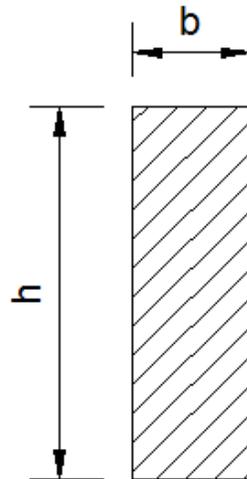
Interpolando para un contenido de humedad de 17.2% se tiene un módulo de elasticidad de:
87800.50 kg/cm²



Propiedades mecánicas de los materiales a utilizar en los cálculos teóricos.		
Pino Radiata (CH=17.2%)		Fuente
MOR (kg/cm ²)	755.30	Referencia 2
MOE (kg/cm ²)	87800.50	Referencia 2
τ (kg/cm ²)	103.10	Referencia 2
Bambú Guadua		Fuente
σ Tensión (kg/cm ²)	1000.00	El autor
MOE (kg/cm ²)	125965	El autor

Modo de falla en flexión

- Vigas sin refuerzo



Configuración de la sección transversal de las vigas sin refuerzo.

h= 12.8 cm
b= 4 cm

La capacidad en flexión de la viga mostrada anteriormente se calcula utilizando la Ecuación 4:

$$M_{max} = MOR \cdot c / I$$

Inercia de la sección:

$$I = 1/12 \cdot b \cdot h^3 = 1/12 \cdot 4 \text{cm} \cdot (12.8 \text{cm})^3 = 699.05 \text{cm}^4$$

Ecuación 5

Distancia a la fibra extrema:

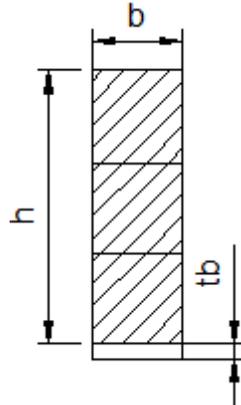
$$c=h/2 = 12.8\text{cm}/2 =6.4 \text{ cm}$$

Ecuación 6

Sustituyendo valores en la Ecuación 4 se tiene:

$$M_{\max} = \text{MOR} \cdot I / c = 755.30\text{kg/cm}^2 \cdot 699.05\text{cm}^4 / 6.4\text{cm} = 824.98 \text{ kg}\cdot\text{m}$$

- **Vigas con refuerzo a tensión**



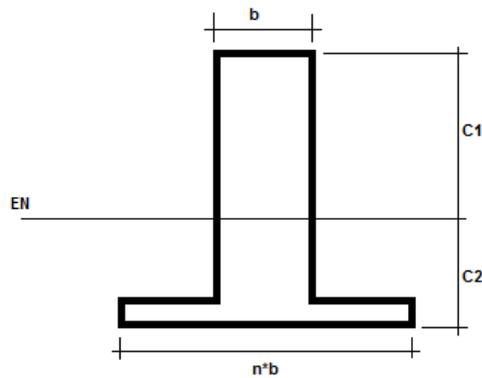
Configuración de la sección transversal de las vigas refuerzo a tensión.

$$h = 12.15\text{cm}$$

$$t_b = 0.75\text{cm}$$

$$b = 4\text{cm}$$

Utilizando el concepto de sección transformada, se obtiene una sección hipotética compuesta únicamente de un material. Esto permite ubicar el eje neutro de la sección real.



Sección transformada

Relación de módulos:

$$n = E_b / E_m = 125965 \text{ kg/cm}^2 / 87800.50 \text{ kg/cm}^2 = 1.43$$

Ecuación 7

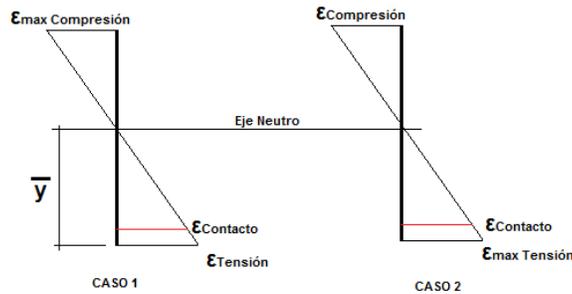
Ubicación del centroide de la sección transformada:

$$C1 = h + t_b - C2 = 12.15\text{cm} + 0.75\text{cm} - 6.27\text{cm} = 6.63\text{cm}$$

Ecuación 8

$$C1 = h + t_b - C2 = 12.15\text{cm} + 0.75\text{cm} - 6.27\text{cm} = 6.63\text{cm}$$

Ecuación 9



Distribución de deformaciones unitarias.

La distribución de deformaciones unitarias consideradas en el análisis se muestran en la figura anterior. En el Caso 1 se considera la deformación máxima en la madera (Compresión) y en el Caso 2 se considera la deformación máxima en el bambú (Tensión). En ambos casos la deformación varía linealmente a partir del principio de que secciones planas permanecen planas durante la flexión.

Se analizan ambos casos determinando la capacidad de carga teórica de la viga, registrará el valor mínimo obtenido entre los dos casos.

CASO 1

Deformación máxima en compresión:

$$\epsilon_{\text{max Compresión}} = \text{MOR} / E_m = 755.30\text{kg/cm}^2 / 87800.50 \text{ kg/cm}^2 = 0.00860246 \text{ cm/cm}$$

Ecuación 7

Donde:

- MOR: módulo de ruptura de la madera
- Em: módulo de elasticidad de la madera

Deformación en la fibra extrema de tensión:

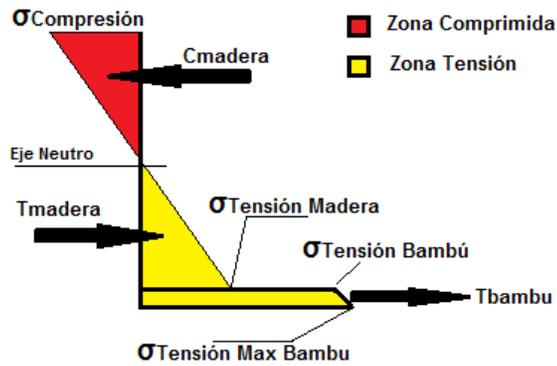
$$\epsilon_{\text{max Tensión}} = \text{MOR} / E_m$$

Ecuación 11

Deformación en la superficie de contacto:

$$\epsilon_{\text{Contacto}} = \text{MOR} / E_m$$

Ecuación 12



Distribución de esfuerzos en la sección real de la viga reforzada.

La figura anterior muestra la distribución de esfuerzos (de tensión o compresión) en la sección transversal de la viga. Nuevamente partiendo del supuesto de que se comporta elásticamente y linealmente, cada deformación unitaria en la sección multiplicada por el modulo de elasticidad del correspondiente material resulta en un esfuerzo (Ley de Hooke).

A partir de lo anterior se calculan los esfuerzos en los matariles de la siguiente forma:

$$\sigma_{\text{Compresión}} = E_m \cdot \epsilon_{\text{maxCompresión}} = 87800.50 \text{ kg/cm}^2 \cdot 0.00860246 \text{ cm/cm} = 755.30 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{Ecuación 13}$$

$$\sigma_{\text{TensiónMadera}} = E_m \cdot \epsilon_{\text{Contacto}} = 87800.50 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{cm/cm} = 634.74 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{Ecuación 14}$$

$$\sigma_{\text{TensiónBambu}} = E_b \cdot \epsilon_{\text{Contacto}} = 125965 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{cm/cm} = 910.65 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{Ecuación 15}$$

$$\sigma_{\text{TensiónMaxBambu}} = E_b \cdot \epsilon_{\text{Tensión}} = 125965 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{cm/cm} = 1034.26 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{Ecuación 16}$$

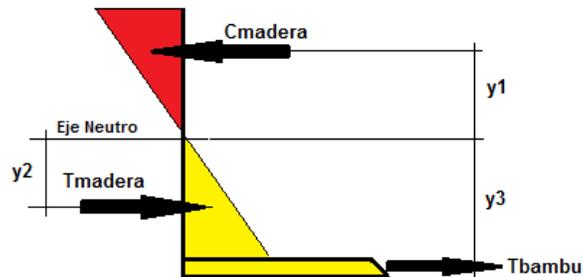
Con dichos esfuerzos determinados es posible determinar las fuerzas resultantes de tensión y compresión.

$$C_{\text{madera}} = \frac{\sigma_{\text{Compresión}} \cdot A_{\text{madera}}}{2} \quad \text{Ecuación 17}$$

$$T_{\text{madera}} = \frac{\sigma_{\text{TensiónMadera}} \cdot A_{\text{madera}}}{2} \quad \text{Ecuación 18}$$

$$T_{\text{bambu}} = \frac{\sigma_{\text{TensiónMaxBambu}} \cdot A_{\text{bambu}}}{2} \quad \text{Ecuación 19}$$

Cada resultante define un momento respecto al eje neutro de la sección. En la siguiente figura se muestran los brazos de palanca de cada una de las resultantes definidas anteriormente.



Esquema de los brazos de palanca de cada resultante.

Cada brazo de palanca se mide desde el eje neutro de la sección hasta el centroide de cada prisma de esfuerzos. Como se aprecia en la figura dichos prismas son dos triángulos rectángulos y un trapecio. Para el caso del trapecio se toma hasta la mitad del espesor del refuerzo (tb) con el fin de simplificar el cálculo sin que haya un gran error.

$$Y1 = \frac{2}{3} * (12.15\text{cm} + 0.75 -) = 4.38\text{cm} \quad \text{Ecuación 20}$$

$$Y2 = \frac{2}{3} * (- 0.75\text{cm}) = 3.68\text{cm} \quad \text{Ecuación 21}$$

$$Y3 = - (0.75\text{cm} / 2) = -5.90\text{cm} \quad \text{Ecuación 22}$$

El momento máximo teórico resistente de sección se determina sumando momentos respecto al eje neutro, esto es:

$$M_{\text{max.teo}_1} = C_{\text{madera}} * Y1 + T_{\text{madera}} * Y2 + T_{\text{bambu}} * Y3 = \quad *3.68\text{cm}$$

$$+ \quad *5.90\text{cm} = 86583.10\text{kg} * \text{cm} = 865.83\text{kg} * \text{m} \quad \text{Ecuación 23}$$

Se le asigna un subíndice 1 al momento para diferenciar que corresponde al caso de análisis 1.

CASO 2

Se realiza la distribución de deformaciones unitarias a partir de la deformación máxima de tensión que soporta el bambú. El análisis realizado es elástico, por lo tanto se puede aplicar la ley de Hooke.

Deformación máxima en compresión:

$$\epsilon_{\text{max Tensión}} = \sigma_{\text{ultimo}} / E_b = 1000\text{kg/cm}^2 / 125965 \text{ kg/cm}^2 = 0.00793871\text{cm/cm} \quad \text{Ecuación 24}$$

Donde:

σ_{ultimo} : esfuerzo de tensión ultimo del bambú determinado experimentalmente
 E_b : módulo de elasticidad en tensión del bambú determinado experimentalmente

Deformación en la fibra extrema de tensión:

$$\text{-----} \quad \text{Ecuación 25}$$

Deformación en la superficie de contacto:

$$\text{-----} \quad \text{Ecuación 26}$$

$$\sigma_{\text{Compresión}} = E_m * \epsilon_{\text{Compresión}} = 87800.5\text{kg/cm}^2 * \quad = 730.27\text{kg/cm}^2 \quad \text{Ecuación 27}$$

$$\sigma_{\text{TensiónMadera}} = E_m * \epsilon_{\text{Contacto}} = 87800.5\text{kg/cm}^2 * \quad = 613.71\text{kg/cm}^2 \quad \text{Ecuación 28}$$

$$\sigma_{\text{TensiónBambu}} = E_b * \epsilon_{\text{Contacto}} = 125965\text{kg/cm}^2 * \quad = 880.48\text{kg/cm}^2 \quad \text{Ecuación 29}$$

$$\sigma_{\text{TensiónMaxBambu}} = E_b * \epsilon_{\text{MaxTensión}} = 125965\text{kg/cm}^2 * \quad = 1000\text{kg/cm}^2 \quad \text{Ecuación 30}$$

Con dichos esfuerzos determinados se determinan las fuerzas resultantes de tensión y compresión.

$$C_{madera} = \frac{1}{2} \cdot h \cdot b \cdot \rho = \dots$$

Ecuación 31

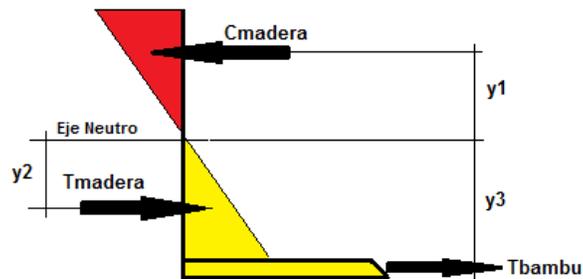
$$T_{madera} = \frac{1}{2} \cdot C_{madera} \cdot g = 6781.96 \text{ kg}$$

Ecuación 32

$$T_{bambu} = \dots$$

Ecuación 33

Cada resultante define un momento respecto al eje neutro de la sección. En la siguiente figura se muestran los brazos de palanca de cada una de las resultantes definidas anteriormente.



Esquema de los brazos de palanca de cada resultante.

$$Y1 = \frac{2}{3} \cdot (h + t_b) = \frac{2}{3} \cdot (12.15 \text{ cm} + 0.75 \text{ cm}) = 4.38 \text{ cm}$$

Ecuación 34

$$Y2 = \frac{2}{3} \cdot (t_b) = \frac{2}{3} \cdot (0.75 \text{ cm}) = 3.68 \text{ cm}$$

Ecuación 35

$$Y3 = t_b - \left(\frac{t_b}{2}\right) = 0.75 \text{ cm} - \left(\frac{0.75 \text{ cm}}{2}\right) = 5.90 \text{ cm}$$

Ecuación 36

El momento máximo teórico resistente de sección se determina sumando momentos respecto al eje neutro, esto es:

$$M_{\text{max.teo}_2} = 9602.68 \text{ kg} \cdot 4.38 \text{ cm} + 6781.96 \text{ kg} \cdot 3.68 \text{ cm} + 0.73 \text{ kg} \cdot 5.90 \text{ cm} = 83714.55 \text{ kg} \cdot \text{cm} = 837.14 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

Ecuación 37

Se le asigna un sub índice de 2 al momento para diferenciar que corresponde al caso de análisis 2.

Modo de falla teórico en cortante.

—

Ecuación 38

Se sabe que $Q = \int ydA = A*y$

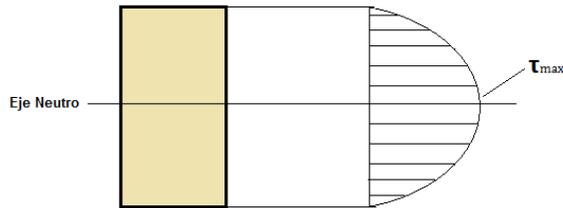
Debe recordarse que el cortante máximo se desarrolla en los tercios extremos de la viga y que tiene un valor igual a $P/2$. Por lo tanto $V=P/2$.

Donde:

- V: cortante en los tercios extremos de la viga.
- Q. primer momento de un área A respecto al eje neutro
- y: distancia desde el eje neutro hasta el centroide de A
- t: espesor de la viga o plano considerado
- I: momento de inercia de la sección.

- **Vigas sin refuerzo**

Para el caso de las vigas de madera sin refuerzo se puede utilizar una simplificación de la Ecuación 47 para el caso de vigas rectangulares.



Distribución de esfuerzos cortantes en una viga de sección transversal rectangular.

La carga máxima teórica considerando la capacidad a cortante se obtiene despejando la Ecuación 48 con $V=P/2$.

$$P_{max.teo} = \frac{2}{3} \tau_{max} A = \frac{2}{3} \tau_{max} b h$$

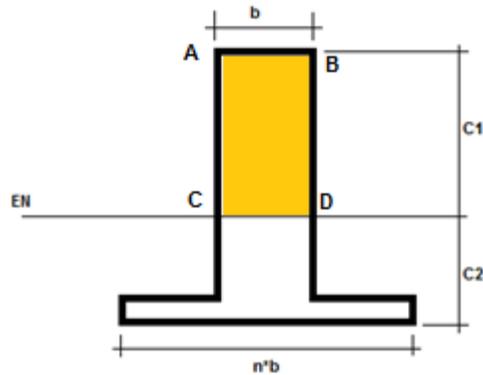
Ecuación 40

Donde:

τ_{max} : esfuerzo cortante para la madera

A : área

- Vigas con refuerzo a tensión



Calculo del primer momento de área para la sección transformada.

El primer momento de área para A_{ABCD} :

$$Q_{ABCD} = b \cdot C1 \cdot (C1/2) = 4\text{cm} \cdot 6.63\text{cm} \cdot 6.63\text{cm}/2 = 87.91\text{cm}^3 \quad \text{Ecuación 41}$$

La carga máxima teórica por cortante se obtiene despejando V de la Ecuación 38. La variable se sustituye por f_v que es el esfuerzo cortante permisible para la madera, y se debe considerar que el cortante máximo que se desarrolla en la viga es $P/2$.

$$P_{\text{max.teo}} = 2 \cdot \dots = 2 \cdot \dots = 7192.40\text{kg} \quad \text{Ecuación 42}$$

$$I = \dots \quad \text{Ecuación 43}$$

$$I = \dots = 753.88\text{cm}^4$$

Donde

I = Momento de inercia respecto al eje neutro de la sección transformada.

Deflexiones elásticas teóricas

$$\delta_{\text{teo}} = \dots \quad \text{Ecuación 44}$$

$$\dots \quad \text{Ecuación 45}$$

Donde

P : mínimo (Capacidad modo de falla flexión, Capacidad modo de falla cortante)

I : inercia de la sección

E : módulo de elasticidad

- **Vigas sin refuerzo**

$$L = 150\text{cm}$$

$$I = 1/12 * (12.8\text{cm})^3 * 4\text{cm} = 699.05\text{cm}^4$$

$$\delta_{\text{teo}} = \frac{5qL^4}{384EI} = 3.22\text{cm}$$

$$q = \frac{W}{L} = \frac{16000\text{kg}}{150\text{cm}} = 106.67\text{kg/cm}$$

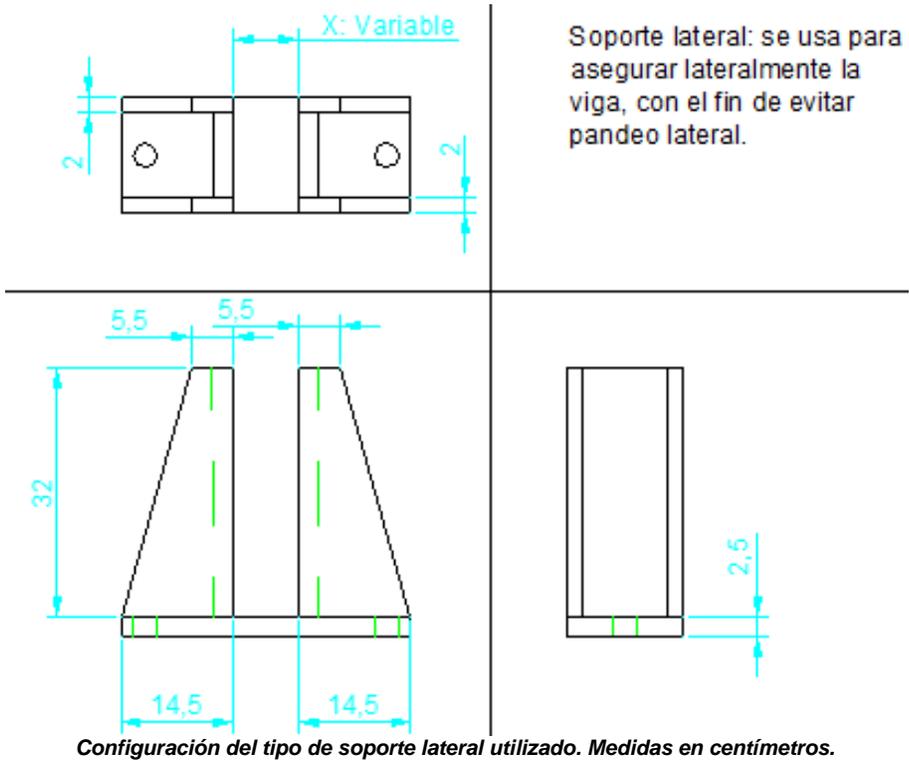
- **Vigas con refuerzo**

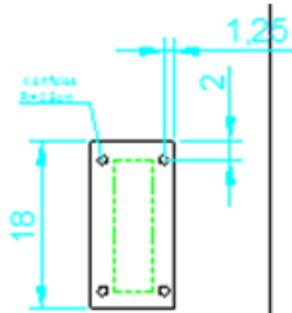
$$I = 753.88\text{cm}^4$$

$$\delta_{\text{teo}} = \frac{5qL^4}{384EI} = 3.03\text{cm}$$

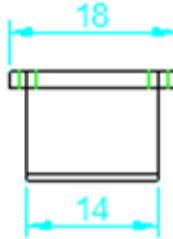
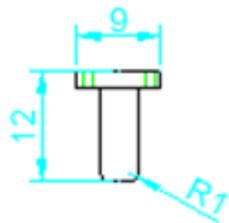
$$q = \frac{W}{L} = \frac{16000\text{kg}}{144\text{cm}} = 111.11\text{kg/cm}$$

Anexo 6: Esquemas del equipo para el ensayo a flexión.



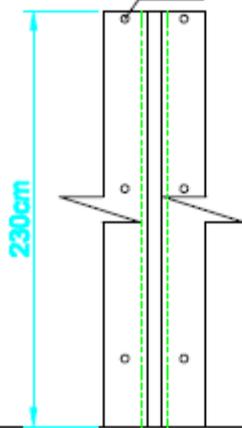


Bloque de carga: su función es transmitir la carga de la maquina de ensayos a los puntos de aplicacion de carga en el espécimen. Son hechos de madera dura.

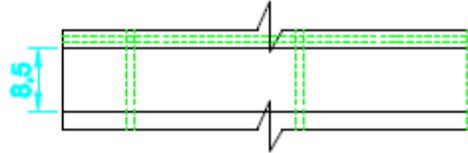
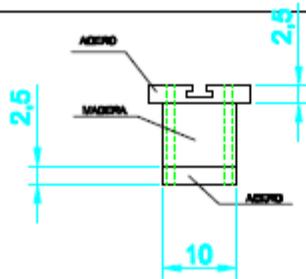


Configuración del tipo de bloque de carga utilizado. Medidas en centímetros.

Pernos ,D=1cm. @23cm centroa
centro



Viga de soporte: debe ser
suficientemente rigida, mucho
mayor que el especimen de
falla. Sobre esta se colocan los
apoyos de la viga a fallar.



Configuración del tipo de la viga de soporte utilizada. Medidas en centímetros.