

JUSTIFICACIÓN

La *Guadua Angustifolia* Kunth actualmente es utilizada como material de construcción en estructuras para vivienda y puentes, entre otros. Sin embargo, debido a que es un material natural, su durabilidad puede verse afectada por el ataque biológico de insectos y hongos.



Fotografía 1. Muestras de Guadua afectadas por insectos y hongos

Además de las recomendaciones de corte, manejo en la plantación y almacenamiento, se utilizan tratamientos con soluciones químicas que previenen el deterioro biológico acelerado en la guadua y por tanto en la estructura, aumentando así la durabilidad.

Para una inmunización adecuada, el preservante se debe incorporar a la estructura del tallo, tan profunda y uniformemente como sea posible; los factores que permiten esta condición son su contenido de humedad, el tipo de la sustancia preservante y el método usado. Para lograr mayor penetración, uno de los métodos de inmunización más utilizados en Colombia consiste en sumergir la guadua en un tanque con una solución de boro (B) y/u otras sustancias. Previamente se realizan orificios en la guadua longitudinalmente con una varilla, para que el inmunizante sea aplicado en la parte interna de todos los entrenudos de la guadua, quedando todos los tabiques con una perforación de diámetro aproximado de 3/4".

Se desconoce la influencia de la perforación de los tabiques en el comportamiento de elementos solicitados a compresión y flexión. En la Universidad Nacional de Colombia, se realizó un estudio donde se ensayaron a compresión probetas de 20cm, 50cm, 1.0m, 1.50m, 2m, 2.50m y 3.0m de longitud. En este trabajo se pretende estudiar la influencia de dicha perforación en elementos solicitados a flexión.

1 OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

- Comparar la capacidad por resistencia y/o servicio de guaduas solicitadas a flexión de diferente longitud, cuando tienen perforación para inmunización, en los tabiques y cuando no la tienen.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la capacidad por resistencia y/o servicio de guaduas solicitadas a flexión sin perforación en los tabiques, para longitudes entre 0.50 m y 3.0 m de longitud.
- Determinar la capacidad por resistencia y/o servicio de guaduas solicitadas a flexión con perforación en los tabiques, para longitudes entre 0.50 m y 3.0 m de longitud.
- Analizar la influencia de las perforaciones en los tabiques, comparando la capacidad para guaduas sin perforación y con perforación.

CAPITULO 1. Generalidades

1.1 ¿Qué es Guadua Angustifolia?

La guadua es un bambú leñoso que pertenece a la familia de las gramíneas (especie de pasto gigante), subfamilia Bambusoideas y a la tribu Bambuseae Verae, taxonómicamente pertenece a la Familia Poacecae; en el mundo existen cerca de 1.000 especies, 500 de ella en América. En el siguiente cuadro se especifica las condiciones óptimas de siembra.



Fotografía 2. Guadua Angustifolia

Cuadro 1. Condiciones óptimas de siembra de Guadua Angustifolia

Hábitat		0 msnm – 2200 msnm
Precipitación		Superior a 1200 mm/año
Humedad Relativa		75 % - 85 %
Desarrollo Optimo	Altitud	900 msnm – 1600 msnm
	Precipitación	2000 mm/año – 2500 mm/año
	Temperatura	20 °C – 26 °C

Colombia tiene cuatro especies del Género guadua, la llamada Angustifolia, se destaca por tener excelentes propiedades fisico-mecánicas y por el tamaño de sus culmos (tallos) que alcanzan hasta 30m de altura y 25cm de diámetro y se encuentra en gran parte de la región Andina. En los llanos orientales, parte de Orinoquía y la costa Atlántica existe la especie Amplexifolia y en la Amazonía y la región del Pacífico se hallan Superba y weberbaueri.

Dentro de la especie de *Guadua Angustifolia*, se conocen comúnmente cinco biotipos: cebolla, macana, rayada negra, cotuda y castilla:

Cebolla: Se reconoce por sus culmos gruesos y rectos y entrenudos largos. Se utiliza para la elaboración de esterilla, fabricación de muebles y construcción de vivienda.

Macana: Generalmente tiene entrenudos cortos con distancias regulares, paredes gruesas y diámetros muy uniformes. Por su resistencia tiene un óptimo comportamiento en construcciones.

Cotuda: Se identifica por tener curvaturas alternas en sus entrenudos. Casi todos los culmos del rodal tienen estas formas, que son aprovechadas en artesanías decorativas y en la fabricación de muebles.

Rayada Negra: Se caracteriza por la coloración de sus rayas verde oscuro en sus culmos, cuando está seca las rayas se tornan de un color negro sobre ocre. Sólo se ha encontrado en el Departamento del Quindío en Colombia. Tiene valor potencial como planta ornamental.

Castilla: Sus culmos alcanzan diámetros hasta de 23cm. Tiene paredes muy gruesas y se utiliza como columnas en construcciones.

Según Ximena Londoño Pava, Presidente de la Sociedad Colombiana de Bambú¹, la *guadua angustifolia* está dotada y rodeada de condiciones que la hacen ideal para distintos campos de aprovechamiento. Señala por ejemplo, que se trata de un recurso sostenible y renovable porque se automultiplica vegetativamente, es decir, que no necesita de semilla para reproducirse como ocurre con algunas especies maderables. Tiene además alta velocidad de crecimiento, casi 11cm de altura por día en la región cafetera alcanzando en 6 meses aproximadamente su altura total, siendo ésta, una excelente característica que llama la atención en proyectos de reforestación donde otras especies utilizadas requieren mucho más tiempo para cumplir con el objetivo.

Comparado con otros recursos forestales explotados en el país, la *guadua* es un recurso abundante, lo que facilita su contribución ecológica con beneficios como la regulación de los niveles de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera, gracias a que no libera el gas retenido después de ser utilizada en construcción o artesanía, sino que éste queda fijo en las obras realizadas con ella y en el balance de caudales, debido a su habilidad de almacenar un volumen considerable de agua.

¹ Londoño Pava, Ximena. Documento 'La Guadua: Un gigante dormido' página: 4 y 5. Publicado en las Memorias 'Seminario Guadua en la Reconstrucción' Armenia Quindío. Febrero 10, 11 y 12 del 2000

Según Vélez² (2001), “*la guadua Angustifolia en el área de construcción, es un recurso inagotable, estructural y de servicios en vivienda y otros tipos de edificaciones. Superior al concreto en compresión, además admite grandes deflexiones, por lo que es un material ideal para realizar construcciones sismo resistentes, seguras y económicas.*”



Fotografía 3. Ejemplo de estructura construida con Guadua Angustifolia. Eje Cafetero.

Entre muchos otros usos, se encuentran: suplidor de mobiliario, esteras, revestimientos, pisos, tabiques, instalaciones sanitarias, techos, estructura y encofrados².

² Vélez, G. Documento: El Humilde bambú “acero vegetal”. Memorias Congreso Virtual de Arquitectura. Caracas, Venezuela. Febrero 2001.

1.2 Métodos de Inmunización

Los tallos de la Guadua son particularmente susceptibles a hongos y hupes con una humedad mayor al 18%; para gusanos y termitas entre 12 y 18 % de la humedad relativa. Este tipo de insectos y hongos dañan la estructura del tallo de la guadua, haciéndola inutilizable, en algunos casos.

Existen diferentes métodos de inmunización que se pueden agrupar en tratamientos no químicos o tradicionales y tratamientos químicos.

1.2.1 Tratamientos no químicos

Los tratamientos no químicos, son extensamente aplicados en América Latina³ y consisten en utilizar técnicas para degradar los contenidos de almidón presentes en la guadua, que representa un atractivo para hongos e insectos.

Selección del tallo: En la práctica se ha encontrado que el primer paso para obtener bajos contenidos de almidón en los tallos, es que deben ser cortados en la fase lunar de menguante y preferiblemente en horas de la noche o durante el alba; además deben estar en un estado de maduración óptima, es decir, que cumpla con características externas que lo indiquen.

Curado en la mata: Una vez se ha cortado el tallo en su base, se coloca en posición vertical apoyada contra tallos vecinos, manteniéndola aislada del suelo con un material que no le aporte humedad, para que los contenidos de almidón disminuyan de la misma manera que el contenido de humedad se reduce.

Inmersión en agua

La práctica de sumergir los tallos es adoptada para mantener la guadua fresca por un corto plazo y se mejora la resistencia contra insectos y hongos, fermentando y extrayendo los almidones y azúcares de la guadua, sin utilizar preservantes tóxicos. Este método, a largo plazo facilita el efecto de bacterias que mejoran la permeabilidad, mientras se degrada el almidón.

Método de ahumado

En éste método la preservación se realiza a partir de ácido piroleñoso, que se produce por la condensación del humo, saturado de alquitrán, es decir, se crea una capa de protección en la superficie de la guadua por adherencia de hollín; además de ser un método de inmunización es un método de secado muy utilizado. En algunos casos las guaduas son colocadas en una cámara de humo hasta que alcanzan una humedad del 10%, donde el humo cristaliza la lignina haciéndola más resistente al ataque de insectos.

³ Moran, J.,A., 2002, *Traditional Bamboo Preservation Methods in Latin America*. INBAR Techn. Rep. 25, 70 pp.



Fotografía 4. Método tradicional de ahumado

1.2.2 Tratamientos químicos

Los tratamientos químicos consisten en la aplicación de preservantes que se clasifican en dos grupos de acuerdo a su medio de disolución:

Oleosolubles: Entre ellos se encuentran la creosota alquitranada, aceite de antraceno, soluciones de cerosota, etc; para su utilización se requiere que la guadua esté secada al aire y utilizar un proceso de presión para conseguir una penetración suficiente del preservante.

Hidrosolubles: Son sales disueltas en agua y entre sus ingredientes activos están cloruro de zinc, dicromato de sodio, cloruro de cobre, cromato de zinc clorado, ácido bórico, bórax, sulfato de amonio, fluoruro de sodio y sulfato de cobre. Este tipo de preservante es el más utilizado gracias a que las sales se pueden difundir dentro de los tallos logrando una penetración completa en el tejido de la guadua.

En general, los productos de preservación deben ajustarse a las siguientes recomendaciones:

- Su composición no debe afectar los tejidos de la guadua disminuyendo sus propiedades mecánicas o afectando sus características físicas, sin embargo, deben ser suficientemente activos para impedir la vida y desarrollo de microorganismos interiores y exteriores.
- Los preservantes hidrosolubles deben utilizarse según recomendaciones del fabricante para evitar que su grado de solubilidad permita que sean lavados por la lluvia o la humedad.
- Cuando se vaya a emplear el material en elementos decorativos, el preservante no debe modificar su color.

Método de transpiración

Este tratamiento es bastante común, porque complementa el método de curado en la mata. Se sumerge el extremo inferior de la guadua, con o sin follaje, en un recipiente que contenga un preservativo (5% de DDT y talco) para la captación capilar y difusión, durante varios días.

Método de inmersión

En tablillas de bambú y esterillas, se sumerge el material en una solución concentrada de boro, aproximadamente durante 30 segundos.

Para inmunizar tallos completos, éstos se deben sumergir en un tanque (Fotografía 5), también con una solución de boro durante más de 12 horas. Para proporcionar protección al tejido del tallo interno y para facilitar la penetración deben hacerse agujeros en las paredes nodales, perforando los diafragmas con una varilla cuyo diámetro puede estar entre $\frac{3}{4}$ " y una pulgada.



Fotografía 5. Tallos sumergidos en solución de boro

Si no hay tanques se apilan los tallos frescos, verticalmente, bajo cubierta, con todos los diafragmas rotos, excepto el de más abajo. La parte interna se llena con la sustancia preservante a base de boro que sirve como un depósito para la difusión a la pared⁴. La capacidad de difusión depende de la estructura de la capa de la pared interna.

Las células de la guadua absorben el bórax por osmosis. Después de sumergir los tallos, son de dos a tres veces más pesados que antes y para usarlos en la construcción es necesario volver a secarlos.

⁴ EBF: Environmental Bamboo Foundation, 2003. Vertical Soak Diffusion for Bamboo, Ed. Linda Garland, Ubub, Bali, 26 pp.

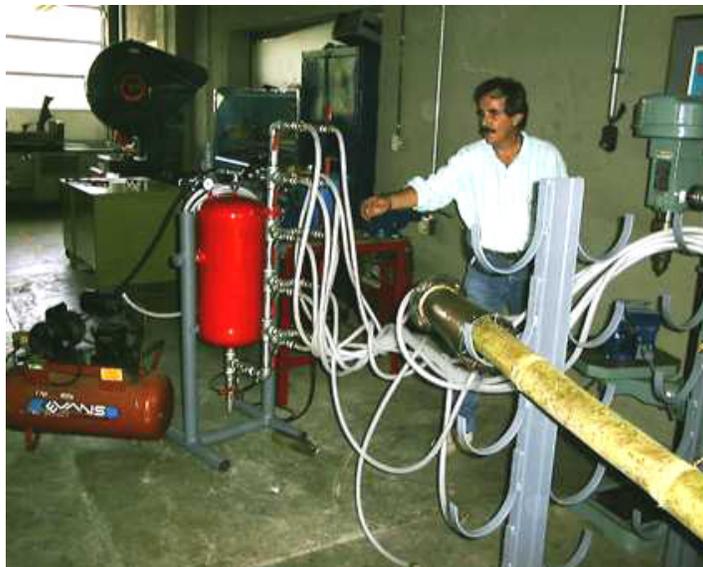
Método Boucherie simple (por gravedad)

Consiste en llenar el entrenudo superior con preservante, dejando el tallo en posición vertical hasta que el químico baje a lo largo de las paredes, ya que por acción de la gravedad empuja y desplaza la savia ocupando su lugar.

También uno de los extremos puede conectarse a un tubo de caucho que conduce el preservativo de un tanque ubicado a una altura mayor, hacia las paredes de la guadua. Es un método que puede demorarse varios días de acuerdo con las dimensiones del tallo, por lo cual es poco usado a escala comercial.

Método Boucherie modificado (por presión)

Se requiere de un compresor, un recipiente para el preservante y boquillas. Mediante aire a presión se extrae la savia del culmo y se inyecta el preservante en las paredes de los tallos recién cortados para reemplazar la savia de éstos, quedando impregnados y protegidos contra los insectos.



Fotografía 6 Método Boucherie modificado

Este método es mucho más rápido (se requieren pocas horas para culminar el proceso) y efectivo, pues hay una mayor penetración y absorción del preservativo; además se pueden tratar varias guaduas al tiempo.

Dentro de los métodos mencionados, el que ha demostrado una mayor efectividad en el control de insectos y hongos es el método de secado con humo, pero el más utilizado es el Boucherie Modificado porque aunque los métodos de presión requieren determinadas instalaciones técnicas y un manejo especial para los tallos, los hornos utilizados en el secado con humo son más costosos.

Protección adicional

Para proteger la guadua ante efectos del sol y de la humedad, se recomienda aplicar barnices transparentes o pinturas de aceite; en casos de permanecer enterradas se recomienda hacer un recubrimiento del tallo con asfalto líquido.

Además, se debe prestar atención a la protección contra la humedad constructiva (por ejemplo goteras o humedad ascendente), para extender la vida de las estructuras hechas en Guadua.

CAPITULO 2. Preparación de las probetas

Con el fin de que el material a ensayar tuviera buenas condiciones físico-mecánicas de resistencia se utilizó guadua que se encontrara en un grado de madurez óptima (con edades entre 3 a 5 años según el proveedor), libre de imperfecciones, como fisuras debido a secado, insectos y hongos.

Se seleccionaron, marcaron y cortaron 120 probetas, con luces libres de 0.50m, 1.0m, 1.50m, 2.0m, 2.50m y 3.0m, así, las longitudes de las probetas se establecieron dejando un canuto adicional en cada extremo a partir de la luz libre prevista, para evitar que la guadua se abriera después de los apoyos durante el ensayo. Se efectuaron cortes rectos con una Acolilladora marca PROTECH.

Para facilitar la comparación y disminuir el número de variables, se establecieron parejas de guadua con características similares tales como diámetro, edad y longitud, además se procuró que los espesores de pared y la distancia entre canutos fuera similar, aunque esto no fue posible en todos los casos. Para cada longitud se seleccionaron 10 probetas sin perforación, es decir, con los diafragmas en los nudos sanos y a 10 probetas se les realizó una perforación longitudinal con una varilla de $\frac{3}{4}$ " (Fotografía 7)



Fotografía 7. Perforación longitudinal

Para prever que las probetas más cortas fallaran longitudinalmente entre los apoyos y los extremos, se colocaron zunchos metálicos de $\frac{1}{2}$ pulgada de ancho en cada uno de los extremos de la guadua (Figura 1), en las probetas de 0.50m, 1.0m y 1.5m de longitud.

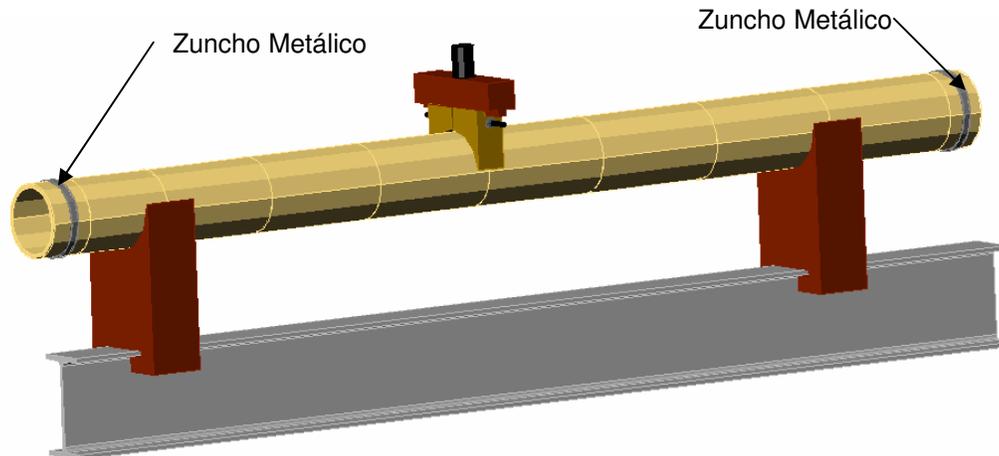


Figura 1. Ubicación de zunchos metálicos

Cada probeta se identificó con la siguiente nomenclatura: la primera letra minúscula denota la longitud entre apoyos que varía de 3.0m a 0.5m que corresponde a las letras de la a – f, respectivamente. El número puede variar de 1 a 10 parejas de ensayos y la última letra A indica que no tiene perforación longitudinal y B señala que si la tiene.

Así por ejemplo, en la Fotografía 8 se muestra una probeta de 50cm de longitud entre apoyos, hace parte de la pareja número tres entre diez y tiene perforación longitudinal.



Fotografía 8. Nomenclatura y ubicación de zuncho metálico

Para cada probeta se midieron las siguientes propiedades geométricas:

- Longitud: se realizó una medición con un flexómetro con error de 0.1cm.
- Diámetro Externo: se tomaron 2 medidas en ambos extremos de la probeta. Se utilizó un calibrador (pie de rey) marca Stainless con aproximación de 0.001cm.
- Espesor de pared: sobre cada extremo se tomaron 4 espesores, se utilizó un calibrador (pie de rey) marca Stainless con aproximación de 0.001 cm.

2.1 PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE LA GUADUA

Con el fin de caracterizar la guadua que se empleó en esta investigación, se realizaron ensayos de compresión paralela a la fibra y tracción paralela a la fibra. Se efectuaron 20 ensayos de compresión paralela a la fibra con probetas cilíndricas que tenían una altura igual a dos veces su diámetro, todas las probetas se instrumentaron con deformímetros eléctricos unidireccionales, para lograr mediciones precisas de las deformaciones y así determinar el Módulo de Elasticidad longitudinal.

Para determinar la resistencia a tensión paralela a la fibra se realizaron 20 ensayos en latas de 2.0cm de ancho y 40cm de longitud, las cuales presentaban al menos un nudo intermedio. En estos ensayos solo se tomó lectura de la carga última. Para la resistencia al corte, se tomó como valor característico el reportado por Takeuchi [2006]⁵.

Los valores mínimos y valores promedio obtenidos para la guadua empleada en esta investigación se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1 – Propiedades Físico-Mecánicas

Propiedad	Vr Promedio	Percentil 5
Compresión Paralela	49.4 Mpa	37.9 Mpa
Tracción Paralela	149.2 Mpa	118.6 Mpa
Corte	7.1 Mpa	4.8 Mpa

⁵ TAKEUCHI [2006] Resistencia al corte paralelo a la fibra en Guadua angustifolia. IAC-NOCMAT 2005 Rio. Inter. American Conference on Non-Conventional Material and Technologies in Ecological and sustainable Construction. ISBN 85-98073-05-9. ABMTENC (Brazilian Society for the science of Non conventional materials and Technologies). Noviembre 11-15, 2005. RIO DE JANEIRO, Brasil

CAPITULO 3. Descripción del Ensayo

Se empleó un Equipo de Prueba Universal N° 4-0102-KD3, marca AMSLER, tipo hidráulica, que tiene una capacidad máxima de carga de 30 ton. (Fotografía 9)

La norma ISO 22157⁶, recomienda un dispositivo para flexionar los tallos de la guadua, donde se realiza el ensayo en cuatro puntos. La carga se divide en dos, mediante una viga apropiada y para evitar el aplastamiento del culmo las mitades de las cargas se aplican mediante soportes que se adaptan a los nudos más cercanos a los tercios de la longitud. Además, dicha norma recomienda que en los apoyos, se debe permitir que la guadua rote libremente.

En este caso el ensayo a flexión, se realizó con un método de carga que consiste en dividir la fuerza que genera la máquina en dos partes por medio de una viga rígida de acero IPE 160 que se adicionó al equipo de prueba en la parte superior, sin embargo, no se adicionó ningún dispositivo para dividir nuevamente la carga.



Fotografía 9. Montaje de ensayo

Sobre las probetas de 2.0m, 2.5m y 3.0m de luz libre, se aplicaron dos cargas concentradas sobre los nudos más cercanos a los tercios de la luz, para evitar fallas por aplastamiento al aplicar cargas en la mitad de los canutos. En las probetas con luces libres de 0.5m, 1.0m y 1.5m, se aplicó una carga puntual en el nudo más cercano al centro de la luz. (Figuras 2 y 3)

⁶ ISO 22157 (International Organisation for Standardisation) "Determination of physical and mechanical properties of bamboo" Technical Committee ISO/TC 165, Timber structures, Subcommittee SC 9, Round poles, with co-operation of INBAR, International Network for Bamboo And Rattan.

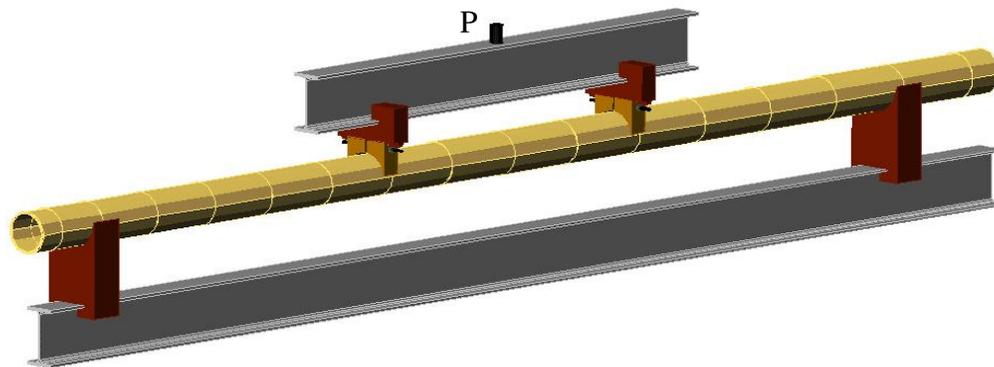


Figura 2. Disposición de elementos en ensayos de probetas largas

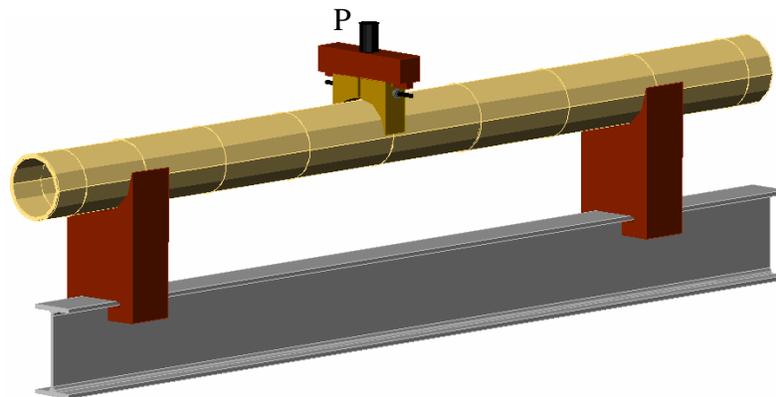


Figura 3. Disposición de elementos en ensayos de probetas cortas

Con el fin de transmitir mejor la carga vertical se utilizaron dispositivos de forma circular (Figura 4), fabricados en madera de zapan, que se acomodaban al diámetro de la guadua gracias a un sistema de tornillo que permite acomodarse al diámetro de la probeta ensayada.

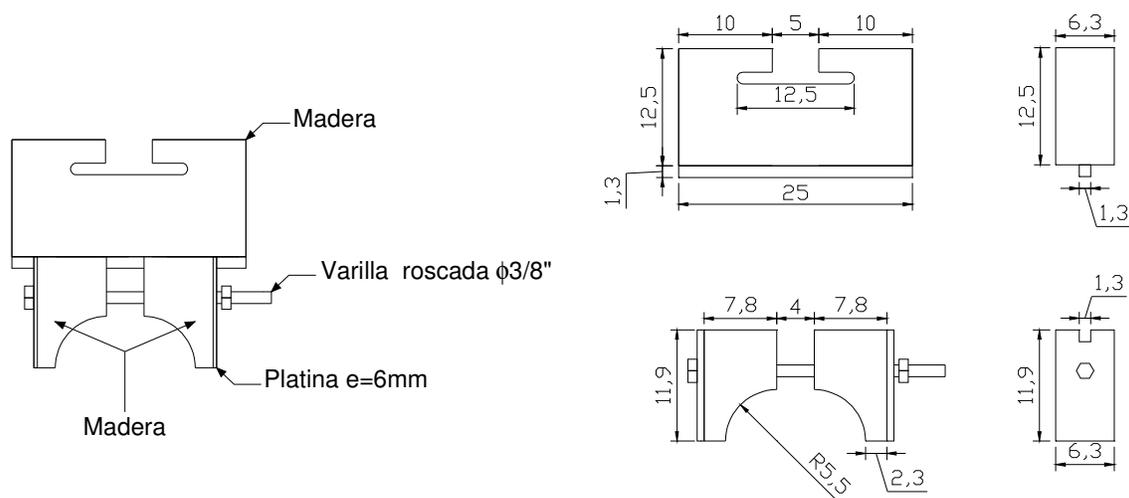


Figura 4. Dispositivos de aplicación de carga

Los apoyos en los extremos también tenían forma circular para dar confinamiento a la guadua y restringir el desplazamiento horizontal transversal. (Figura 5)

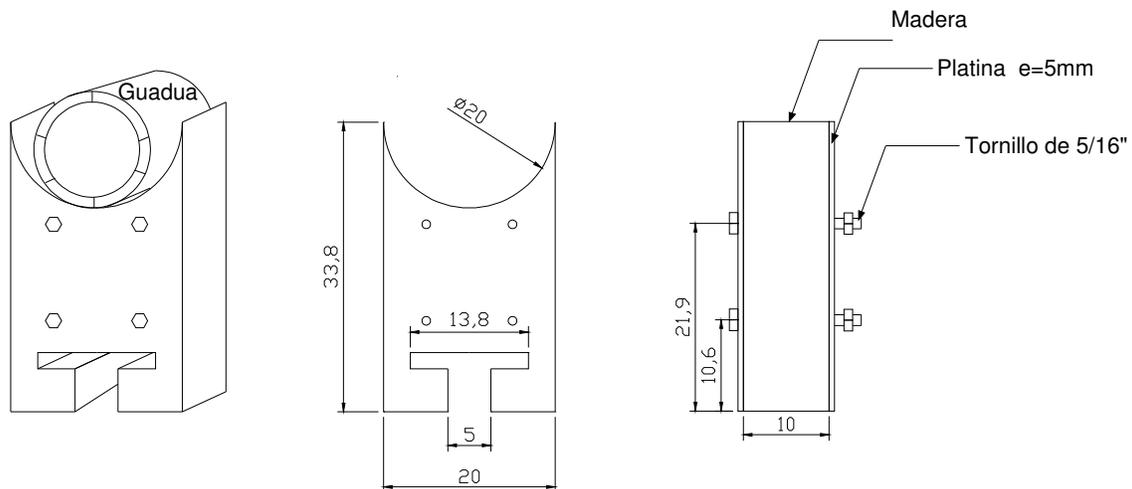


Figura 5. Dispositivos de apoyo

Inicialmente se tomaron lecturas de deflexión en el centro de la luz, con comparadores de carátula mecánicos, sin embargo se optó por utilizar cinta métrica para lograr una exactitud al milímetro dada la rapidez con que se deflectaba la guadua en los primeros ensayos.

CAPITULO 4. Cálculos

4.1. Esfuerzos normales y cortantes

El modelo de ensayo para determinar las propiedades mecánicas de la guadua sometida a esfuerzos de flexión, se caracteriza por ser una viga simplemente apoyada, es decir, se admite giro en sus extremos, se restringe el movimiento transversal al eje en los apoyos y se permite movimiento en dirección axial o longitudinal en uno de sus apoyos. Generándose reacciones verticales ante la aplicación de cargas que corresponde a una carga puntual cercana al centro de la luz para vigas cortas (de 0.5m a 1.5m de longitud entre apoyos) y a dos cargas puntuales aplicadas aproximadamente en los tercios de los elementos largos (de 2.0m a 3.0m de luz libre).

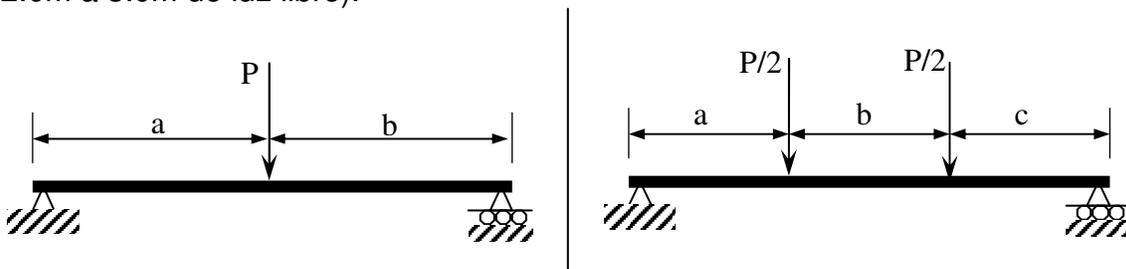


Figura 6. Modelos de vigas simplemente apoyadas

El esfuerzo de flexión provoca esfuerzos de tracción y compresión, produciéndose las máximas en las fibras inferiores y en las fibras superiores respectivamente, las cuales se calculan relacionando el momento flector y el segundo momento de inercia. En las zonas cercanas a los apoyos se producen esfuerzos cortantes o punzonamiento.

En las vigas largas la falla se presenta debido al momento de flexión constante máximo, de esta manera se logra llevar las probetas a la falla por flexión pura, en las vigas cortas, ocasionalmente la falla se presenta en los apoyos debido a los esfuerzos cortantes.

Los modelos de la Figura 6 representan vigas estáticamente determinadas, por lo que se calcularon las reacciones mostradas en la Figura 7.

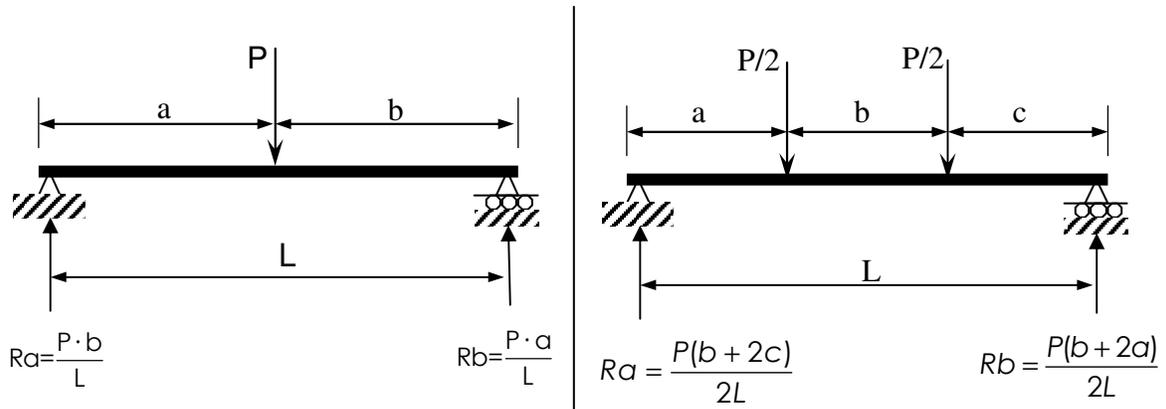


Figura 7. Reacciones

Donde:

R_a y R_b : Son respectivamente las reacciones en los apoyos de la viga.

a , b y c : Características geométricas de las cargas.

L : Luz libre entre apoyos.

Las fuerzas internas producidas por las cargas y reacciones descritas se representan a continuación:

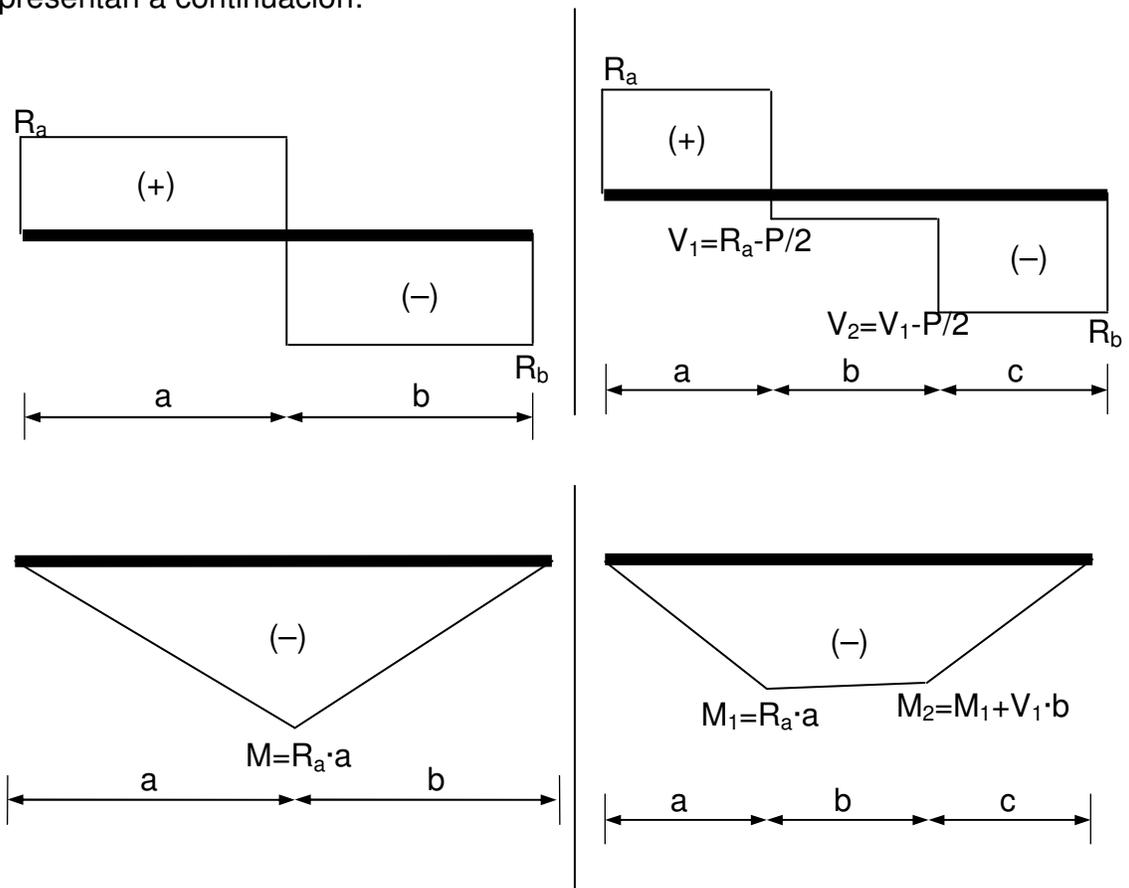


Figura 8. Diagramas teóricos de fuerza cortante y momento flector
(A la derecha, para una carga puntual cerca al centro de la luz; a la izquierda para dos cargas puntuales aproximadamente en los tercios de la luz)

Las vigas constituyen estructuras planas, es decir, que el modelo descrito representa un eje de simetría vertical, donde se aplican las cargas y todas las deflexiones se presentan en el mismo plano.

Cada fibra longitudinal de la viga está sometida a tensión o compresión (Figura 9), de esta manera, para una viga construida de material elástico con un diagrama lineal esfuerzo- deformación y teniendo en cuenta la ley de Hooke, se tiene que⁷:

$$\sigma_x = E\varepsilon = -Eky \quad (1)$$

Donde,

σ_x : Esfuerzo normal en una sección transversal del elemento.

k : Curvatura que se produce entre dos secciones rectas adyacentes.

y : Distancia al eje neutro.

E : Módulo de Elasticidad del material.

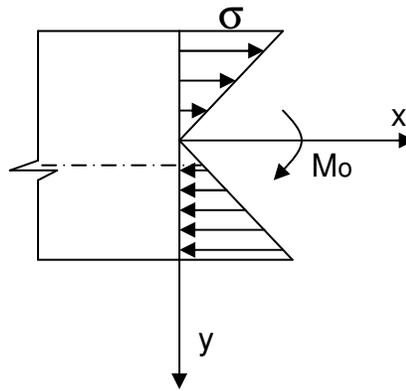


Figura 9. Distribución de esfuerzos normales σ_x

De acuerdo a la Figura 9 la resultante de los esfuerzos normales σ_x , que actúa sobre la sección transversal es una fuerza horizontal en la dirección x y un momento que actúa alrededor del eje z . Teniendo en cuenta que no se ejercen fuerzas axiales sobre la sección, se pueden solucionar dos ecuaciones de la estática: La fuerza resultante en la dirección x es igual a cero y el momento resultante es igual a M_o . Una vez evaluadas dichas resultantes, se obtiene la ecuación 2 para deflexiones pequeñas⁷; aunque en los ensayos se presentaron deflexiones grandes se adoptará este análisis como una aproximación para hallar el módulo de elasticidad de la guadua.

$$\kappa = -\frac{M}{EI} \quad (2)$$

En donde M es el momento flexionante e I es el momento del área transversal con respecto al eje neutro. Así, la curvatura del eje longitudinal de la viga es inversamente proporcional al producto EI (rigidez flexional de la viga).

⁷ Timoshenko S. P. Y Gere J. M. Mecánica de Materiales. Segunda Edición. Grupo Editorial Iberoamérica. Págs. 226 - 231

Combinando las ecuaciones 1 y 2 se obtiene la siguiente ecuación para los esfuerzos normales en la viga:

$$\sigma = \frac{My}{I} = \frac{M}{S} \quad (3)$$

S es el Módulo de sección del área transversal.

Para una viga no prismática, circular hueca de pared delgada, según la figura se tiene:

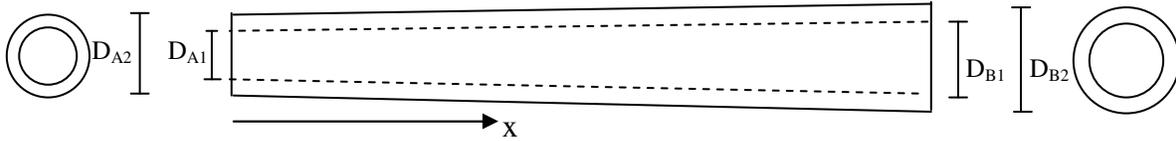


Figura 10. Nomenclatura viga no prismática, circular hueca

Distancia al eje neutro:

$$y = \frac{D_A}{2} \quad (4)$$

Inercia de la sección circular hueca:

$$\text{Sección A:} \quad I = \frac{\pi}{64} (D_{A2}^4 - D_{A1}^4) \quad (5)$$

$$\text{Sección B:} \quad I = \frac{\pi}{64} (D_{B2}^4 - D_{B1}^4)$$

Para conocer el esfuerzo normal en cualquier sección de la viga, el diámetro externo (d_e) y el diámetro interno (d_i) de la sección en función de x y de los diámetros de las secciones A y B, están dados por:

$$d_e = D_{A2} + (D_{B2} - D_{A2}) \frac{x}{L} \quad (6)$$

$$d_i = D_{A1} + (D_{B1} - D_{A1}) \frac{x}{L}$$

Así, el módulo de sección S, combinando las ecuaciones 4, 5 y 6 es:

$$S = \frac{I}{y} = \frac{\frac{\pi}{64} \left[\left(\frac{D_{A2}L + D_{B2}x - D_{A2}x}{L} \right)^4 - \left(\frac{D_{A1}L + D_{B1}x - D_{A1}x}{L} \right)^4 \right]}{\frac{D_A}{2}} \quad (7)$$

De esta manera según la ecuación 3, el esfuerzo normal para una viga no prismática, circular hueca de pared delgada es:

$$\sigma = \frac{M}{S} = \frac{32M_{m\acute{a}x}D_{A2}}{\pi \left[\left(\frac{D_{A2}L + D_{B2}x - D_{A2}x}{L} \right)^4 - \left(\frac{D_{A1}L + D_{B1}x - D_{A1}x}{L} \right)^4 \right]} \quad (8)$$

Para algunos ensayos las distancias de aplicación de la carga fueron diferentes a L/3 (para aplicar cargas donde hubiera nudos, cuando éstos no tenían refuerzo), esto generaba reacciones diferentes en los extremos y como los momentos producidos en los puntos de aplicación de la carga (M_1, M_2), también eran diferentes, se eligió el máximo entre los dos para calcular el esfuerzo para cada aplicación de carga y con la cargas últimas los esfuerzos últimos a flexión.

Como se había mencionado, debido a los altos esfuerzos de corte que se presentan en el eje neutro (en los tercios exteriores cuando la carga se apoya en los tercios medios) algunas probetas no fallan por flexión pura sino por cortante por esta razón es necesario calcular los esfuerzos máximos a cortante:

Para incluir el efecto de la altura variable que se presenta en una viga no prismática, se considerará el elemento Δx mostrado en la Figura 11.

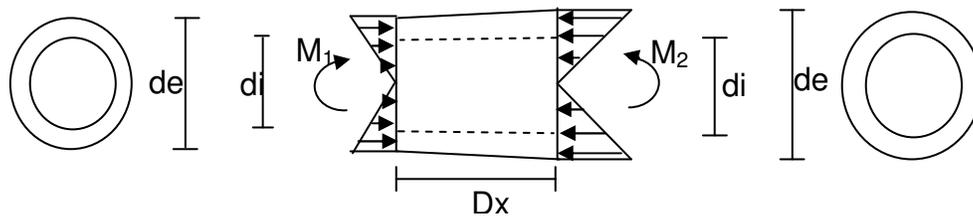


Figura 11. Elemento de longitud Δx

Desarrollando una ecuación de equilibrio estático para el elemento se obtiene:

$$\tau b \Delta x = \frac{M_2 Q_2}{I_2} - \frac{M_1 Q_1}{I_1} \quad (9)$$

Donde se calcula el esfuerzo de corte τ , para una sección con ancho promedio, b.

M_1 y M_2 : Momentos flexionantes de las caras izquierda y derecha del elemento.

Q_1 y Q_2 : Primeros momentos de las secciones izquierda y derecha del elemento respecto al eje neutro, dados por:

$$Q = \frac{1}{12} (d_e^3 - d_i^3) \quad (10)$$

d_e y d_i : Diámetros externo e interno de la sección circular hueca

I_1 e I_2 : Momento de inercia de las secciones transversales (circular hueca) izquierda y derecha del elemento, que se calcula como:

$$I = \frac{\pi}{64} (d_e^4 - d_i^4) \quad (11)$$

4.2. Módulos de Elasticidad

La mecánica de sólidos proporciona varios métodos para encontrar los desplazamientos que se producen en una viga en función de la geometría de aplicación de cargas y la rigidez de la misma, de esta manera se puede hallar el módulo de elasticidad, conociendo además la geometría de la sección transversal.

Por ejemplo, al integrar la ecuación de momento flexionante una vez se hallan los ángulos de rotación en los extremos de la viga y al integrar nuevamente, se halla la ecuación de deflexión en función de la distancia x del origen; así, la ecuación diferencial de la curva deflexión de una viga es:

$$\frac{d^2U}{dx^2} = -\frac{M}{EI} \quad (12)$$

Con el fin de abreviar la notación se puede expresar ésta ecuación como:

$$EIU'' = -M \quad (13)$$

A continuación se utilizará éste método para una viga que se le aplica una carga puntual como se muestra en la Figura 12.

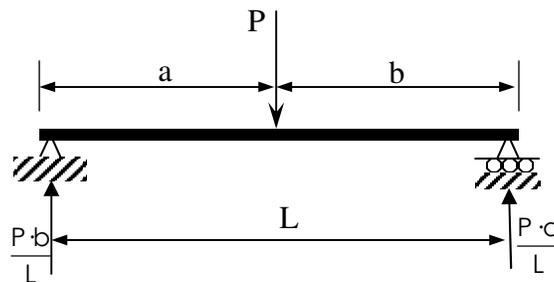


Figura 12. Esquema de viga con carga puntual

Si $0 \leq x \leq a$

$$M_1 = \frac{Pbx}{L} \quad (14)$$

Si $a \leq x \leq L$

$$M_2 = \frac{Pbx}{L} - \frac{Pb(x-a)}{L} - \frac{Pa(x-a)}{L} = \frac{Pbx}{L} - \frac{P(x-a)(b+a)}{L}$$

$$M_2 = \frac{Pbx}{L} - P(x-a) \quad (15)$$

De acuerdo a la ecuación 13 se plantean las ecuaciones de segundo orden como sigue:

$$ElU_1'' = -\frac{Pbx}{L} \quad (0 \leq x \leq a) \quad (16)$$

$$ElU_2'' = -\frac{Pbx}{L} + P(x-a) \quad (a \leq x \leq L)$$

Integrando se encuentran las expresiones para hallar los ángulos de rotación:

$$ElU_1' = -\frac{Pbx^2}{2L} + C_1 \quad (0 \leq x \leq a) \quad (17)$$

$$ElU_2' = -\frac{Pbx^2}{2L} + \frac{P(x-a)^2}{2} + C_2 \quad (a \leq x \leq L)$$

Integrando nuevamente se hallan las ecuaciones de la curva de deflexión:

$$ElU_1 = -\frac{Pbx^3}{6L} + C_1x + C_3 \quad (0 \leq x \leq a) \quad (18)$$

$$ElU_2 = -\frac{Pbx^3}{6L} + \frac{P(x-a)^3}{6} + C_2x + C_4 \quad (a \leq x \leq L)$$

Las condiciones de frontera que se utilizan para hallar las constantes de integración, se enumeran a continuación:

1. Las pendientes deben coincidir en el punto de aplicación de la carga aplicando las dos expresiones: $u_1'(a) = u_2'(a)$

$$-\frac{Pba^2}{2L} + C_1 = -\frac{Pba^2}{2L} + \frac{P(a-a)^2}{2} + C_2$$

$$C_1 = C_2$$

2. Las deflexiones deben ser iguales en el punto a.

$$u_1(a) = u_2(a)$$

$$-\frac{Pba^3}{6L} + C_1a + C_3 = -\frac{Pba^3}{6L} + \frac{P(a-a)^3}{6} + C_2a + C_4$$

$$C_3 = C_4$$

3. La deflexión es cero en $x = 0$

$$u_1(0) = 0$$

$$Elu_1(x) = -\frac{Pbx^3}{6L} + C_1x + C_3$$

$$\text{Si } x = 0 \rightarrow C_3 = 0 = C_4$$

4. La deflexión es cero en $x = L$

$$u_2(L) = 0$$

$$-\frac{PbL^3}{6L} + \frac{P(L-a)^3}{6} + C_2L = 0$$

$$C_2 = \frac{PbL^2}{6L} - \frac{Pb^3}{6L}$$

$$C_2 = C_1 = \frac{Pb(L^2 - b^2)}{6L}$$

Reemplazando los resultados de las constantes de integración en las ecuaciones 18:

$$Elu_1 = -\frac{Pbx^3}{6L} + \frac{Pbx(L^2 - b^2)}{6L} \quad (0 \leq x \leq a)$$

$$Elu_2 = -\frac{Pbx^3}{6L} + \frac{P(x-a)^3}{6} + \frac{Pbx(L^2 - b^2)}{6L} \quad (a \leq x \leq L)$$

Simplificando:

$$Elu_1 = \frac{Pbx(L^2 - b^2 - x^2)}{6L} \quad (0 \leq x \leq a)$$

$$Elu_2 = \frac{Pbx(L^2 - b^2 - x^2)}{6L} + \frac{P(x-a)^3}{6} \quad (a \leq x \leq L)$$

(19)

La deflexión en la mitad de la luz estará dada por $u_1(L/2)$:

$$u_1(L/2) = -\frac{Pb}{6LEI} \frac{L}{2} \left(L^2 - b^2 - \frac{L^2}{4} \right)$$

$$\delta_{CL} = Pb \frac{(3L^2 - 4b^2)}{48EI} \quad (20)$$

Alternativamente, se puede utilizar el principio de trabajo virtual para establecer el método de la carga unitaria, considerándose dos sistemas de carga: uno que consiste en la viga sometida a las cargas reales y otro que consiste en una carga unitaria ficticia que actúa sobre el elemento en el punto donde va a determinarse el desplazamiento (en $L/2$ ó en $b/2$), como se muestra en la Figura 13.

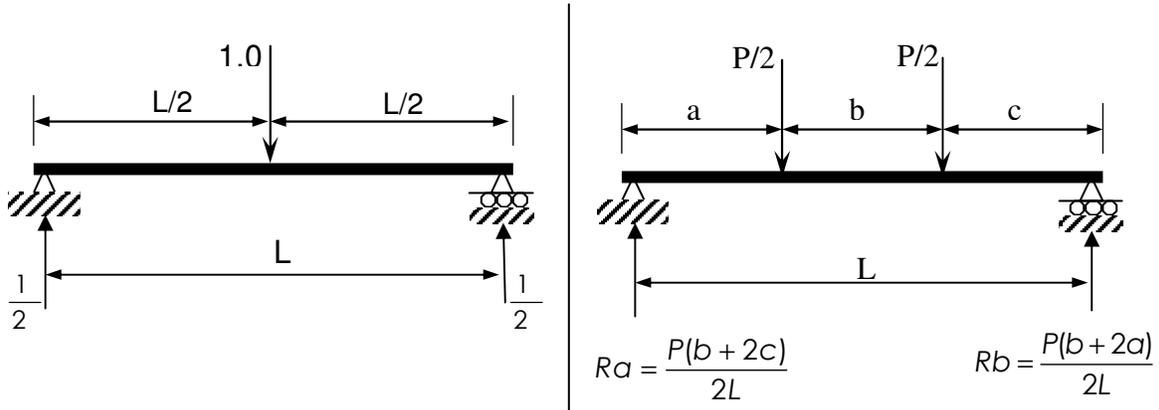


Figura 13. Sistemas de carga virtual y real

Teniendo en cuenta los sistemas de carga nombrados, el desplazamiento en la mitad de la luz estará dado por:

$$\Delta = \int \frac{M_R m_U}{EI} dx + \int \frac{V_R v_U}{GA} dx \quad (21)$$

Donde,

M_R y m_U : Momentos internos de la estructura real y virtual

V_R y v_U : Cortantes internos de la estructura real y virtual

E y G : Módulos de elasticidad a flexión y de rigidez a cortante

I : Momento de inercia de la sección transversal

A : Área modificada por cortante.

Desarrollando la ecuación 21 y simplificando, se encuentran las siguientes expresiones para el desplazamiento por flexión y por corte, respectivamente.

$$\Delta(E) = \frac{P}{LEI} \left[(c+b/2) \left(\frac{(a+b/2)^3}{3} \left(\frac{(b+2c)}{2L} - \frac{1}{2} \right) + \frac{a(a+b/2)^2}{4} - \frac{a^3}{12} \right) + (a+b/2) \left(\frac{(c+b/2)^3}{3} \left(\frac{(2a+b)}{2L} - \frac{1}{2} \right) + \frac{c(c+b/2)^2}{4} - \frac{c^3}{12} \right) \right]$$

Teniendo en cuenta que el término en paréntesis es constante puesto que sólo depende de la geometría de aplicación de las cargas, entonces la expresión se puede abreviar como sigue.

$$\Delta(E) = \frac{P}{LEI} [\alpha] \quad (22)$$

$$\Delta(G) = \frac{P}{LGKA} \left[\left(c + \frac{b}{2} \right) \left(\frac{(b+2c)(a+b/2)}{2L} - \frac{b}{4} \right) + \left(a + \frac{b}{2} \right) \left(\frac{(2a+b)c}{2L} + \frac{b(b+2c)}{4L} - \frac{b}{4} \right) \right]$$

De la misma manera, llamando β al término constante en paréntesis, se tiene:

$$\Delta(G) = \frac{P}{LGKA} [\beta] \quad (23)$$

Donde,

K = Es el factor de forma⁸ de la sección circular hueca, el cual incluye las deformaciones que sufre la sección transversal de la viga debido a los esfuerzos cortantes, en este caso K es igual a $1/2$. También se define como la relación entre el esfuerzo cortante promedio en la sección y el esfuerzo cortante en el centroide de la sección transversal.

Para hallar el módulo de elasticidad a flexión real, es decir, teniendo en cuenta tanto las deformaciones por flexión como las deformaciones por cortante, se adoptó una relación entre el módulo de elasticidad por flexión E y el módulo de rigidez a cortante G , de una investigación realizada por Luis Alberto Torres⁹ titulada: "Modelo anisótropo de elementos finitos para el análisis mecánico del bambú y su verificación experimental".

En la investigación citada, no se realizan ensayos para hallar el modulo de rigidez a cortante en *Guadua Angustifolia*, por lo que se adoptaron los resultados encontrados para Bambú Mosó extraído de Sao Paulo, Brasil; por ser una especie de bambú con características similares a la *Guadua Angustifolia*.

Modulo de Elasticidad a flexión promedio: $E = 3.4\text{GPa}$
 Modulo de Rigidez a cortante promedio: $G = 665\text{MPa}$

Relación $E/G = 5.1$

⁸ Timoshenko S. P. Y Gere J. M. Mecánica de Materiales. Segunda Edición. Grupo Editorial Iberoamérica.

⁹ Torres Cruz, Luis Alberto. "Modelo anisótropo de elementos finitos para el análisis mecánico del bambú y su verificación experimental". Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería Civil y Geomática. Enero de 2005

Seguidamente, con las relaciones de Carga Vs. Desplazamiento encontradas experimentalmente, se halló el módulo de elasticidad a flexión, de acuerdo a las expresiones 22 y 23 y teniendo en cuenta que su relación con el módulo de rigidez a cortante es aproximadamente 5.1, como sigue:

$$\Delta = \frac{P}{LEI} \alpha + \frac{P}{LGkA} \beta$$

Si E/G = 5.1

$$\Delta = \frac{P}{E} \left(\frac{\alpha}{LI} + \frac{5.1\beta}{LkA} \right)$$

Organizando la ecuación:

$$P = \Delta E \frac{1}{\left(\frac{\alpha}{LI} + \frac{5.1\beta}{LkA} \right)}$$

Llamando m, la pendiente de la recta Carga Vs. Desplazamiento, dentro del rango elástico:

$$m = E \frac{1}{\frac{\alpha}{LI} + \frac{5.1\beta}{LkA}}$$

Donde se puede despejar E:

$$E = m \left(\frac{\alpha}{LI} + \frac{5.1\beta}{LkA} \right) \quad (24)$$

La expresión en paréntesis depende de la disposición de las cargas aplicadas, la geometría de la sección transversal en el punto donde se tomaron lecturas de desplazamiento, es decir, el centro de la luz y la longitud de la probeta.

4.3. Valor Característico

De acuerdo a la norma ISO 22156¹⁰, el valor característico (R_k) de una propiedad del material, en este caso del Módulo de Elasticidad se obtiene con la siguiente ecuación:

$$R_k = R_{0.05} \left(1 - \frac{2.7 \frac{s}{m}}{\sqrt{n}} \right)$$

Donde:

$R_{0.05}$ = Percentil 5,

m = Promedio,

s = Desviación Estándar,

n = Número de ensayos.

¹⁰ ISO 22156 (International Organisation for Standardisation) "Determination of physical and mechanical properties of bamboo" Technical Committee ISO/TC 165, Timber structures, Subcommittee SC 9, Round poles, with co-operation of INBAR, International Network for Bamboo And Rattan.

CAPITULO 5. Análisis de Resultados

5.1. Características Geométricas

En el Anexo 1, se presentan las mediciones de diámetros y espesores de pared, realizadas en cada extremo de cada probeta, así como su longitud y número de nudos.

En términos generales, los diámetros externos de las probetas varían entre 9.0cm y 13,7cm y los espesores de pared varían entre 0.8cm y 3.2cm.

5.2. Esfuerzos de Rotura

En el Anexo 2, se presentan los cálculos de las reacciones, esfuerzos de corte y momento flector que se hallaron según la geometría de aplicación de cargas y los cálculos de los esfuerzos máximos.

Para determinar las diferencias de los esfuerzos máximos o esfuerzos de rotura entre las probetas con y sin perforación, se calcularon los esfuerzos máximos a flexión para las probetas largas según la expresión 8 y los esfuerzos máximos a cortante para las probetas cortas según la expresión 9. Los valores promedio se muestran en las tablas 2 y 3.

Tabla 2 – Esfuerzos Máximos a Flexión

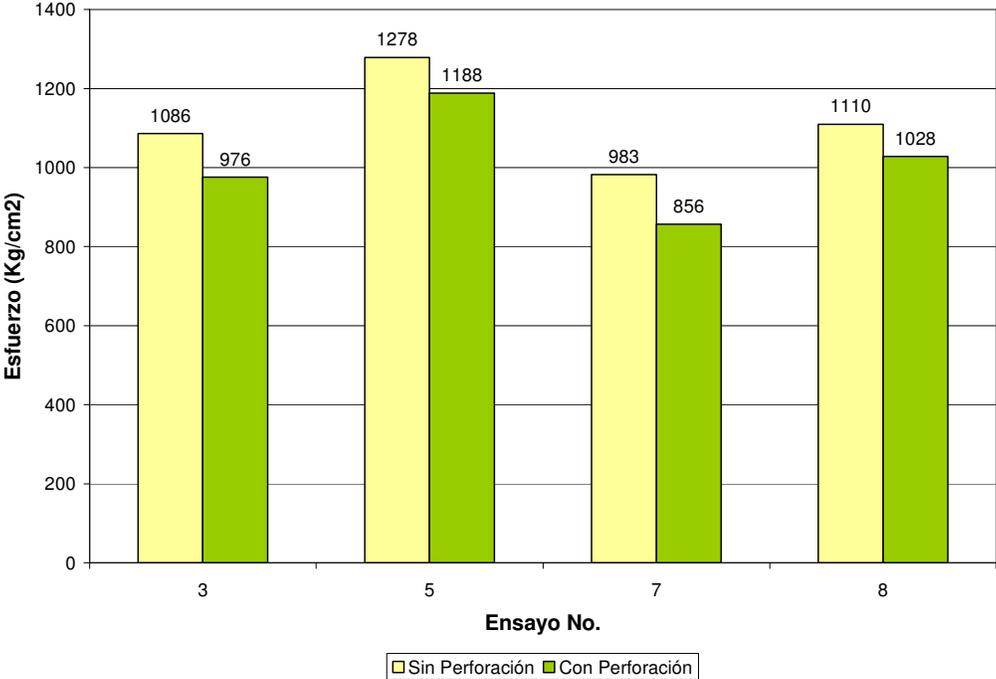
σ (Kg/cm ²)			
Longitud (m)	3,0	2,5	2,0
Sin Perforación	1117,12	1159,61	1111,65
Con Perforación	1177,95	1054,35	1014,21

Tabla 3 – Esfuerzos Máximos a Cortante

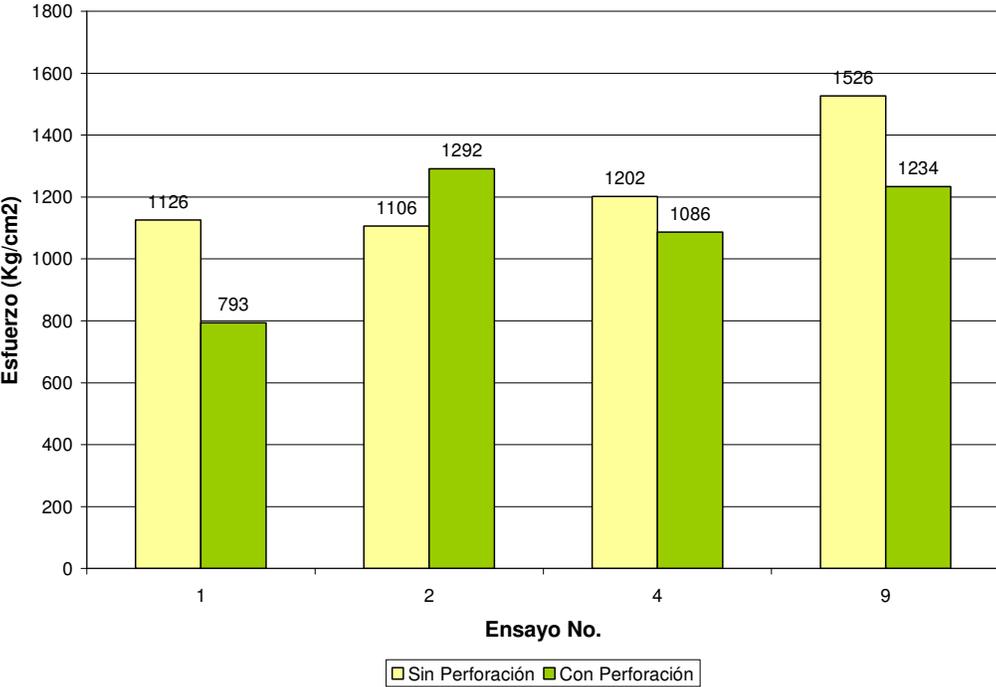
τ máx (Kg/cm ²)			
Longitud (m)	1,5	1,0	0,5
Sin Perforación	69,78	94,34	138,70
Con Perforación	64,76	95,06	118,59

Estos valores promedio representan un análisis numérico, donde se puede inferir que en la mayoría de probetas se logran mayores esfuerzos de rotura en las probetas que no se les realizó perforación a sus tabiques, sin embargo, la comparación entre las probetas con y sin perforación se realizó de acuerdo al tipo de falla que se presentó en cada caso.

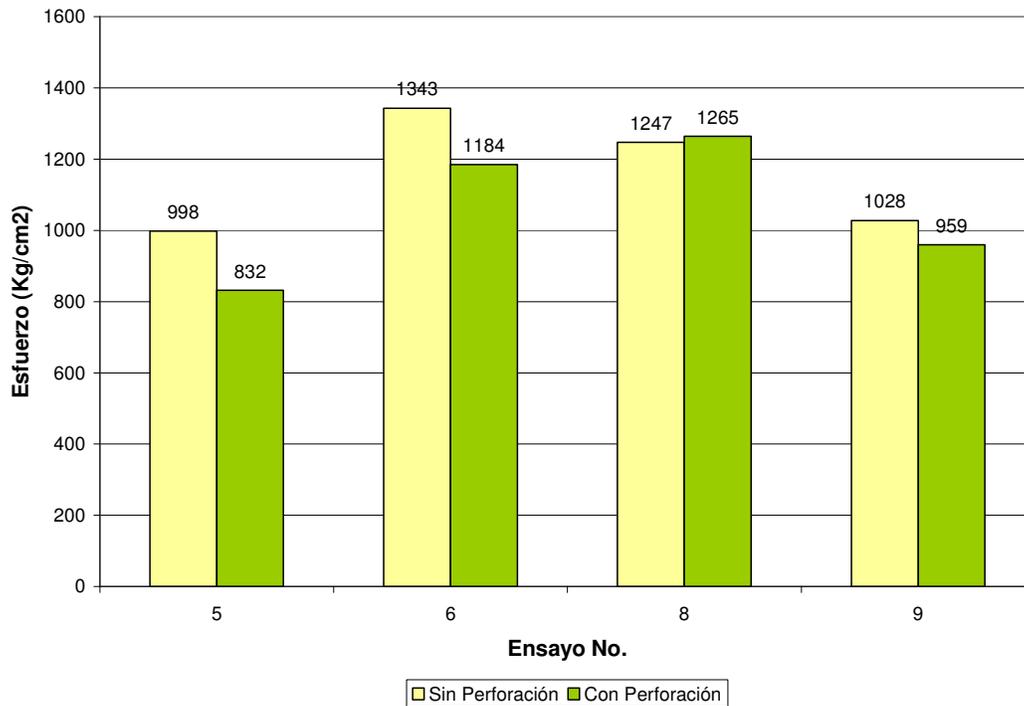
De esta manera, en las gráficas 1 a 3, se muestra la comparación de los esfuerzos de rotura para las probetas largas que no presentaron fallas por corte o aplastamiento en los puntos de aplicación de la carga y por lo tanto se concluyó que la máxima carga resistida correspondió al esfuerzo máximo a flexión.



Gráfica 1. Esfuerzos Máximos a Flexión. Probetas de luz libre = 3.0m



Gráfica 2. Esfuerzos Máximos a Flexión. Probetas de luz libre = 2.5m

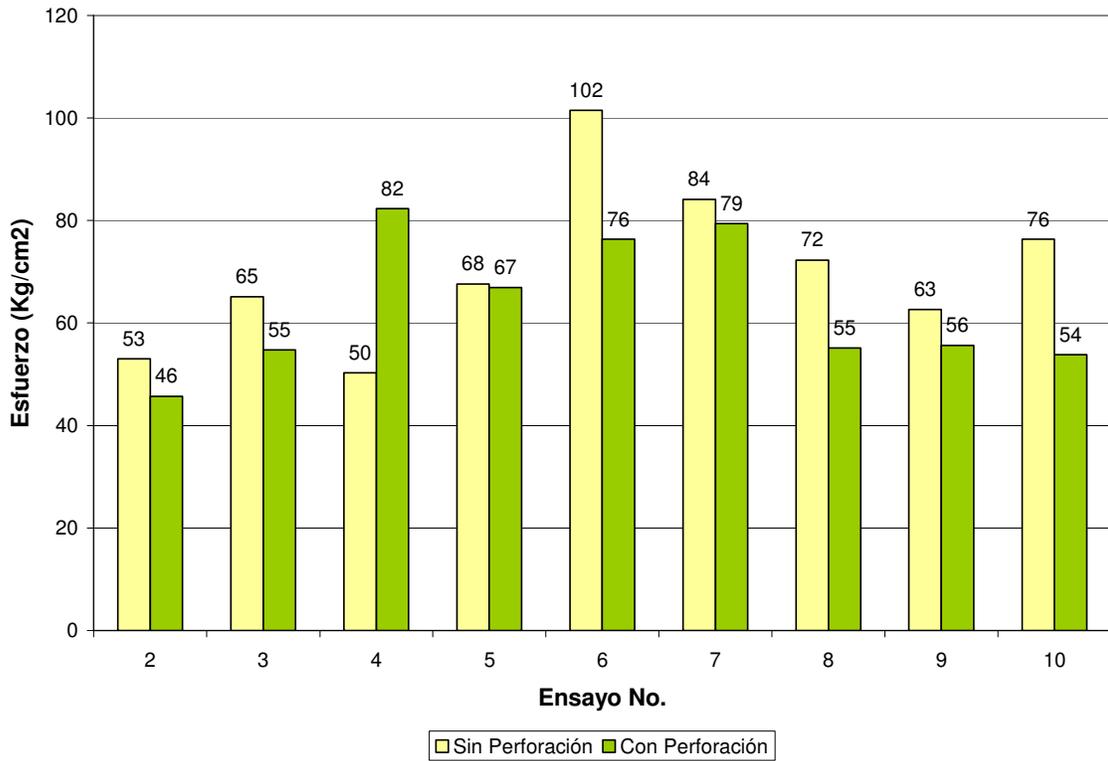


Gráfica 3. Esfuerzos Máximos a Flexión. Probetas de luz libre = 2.0m

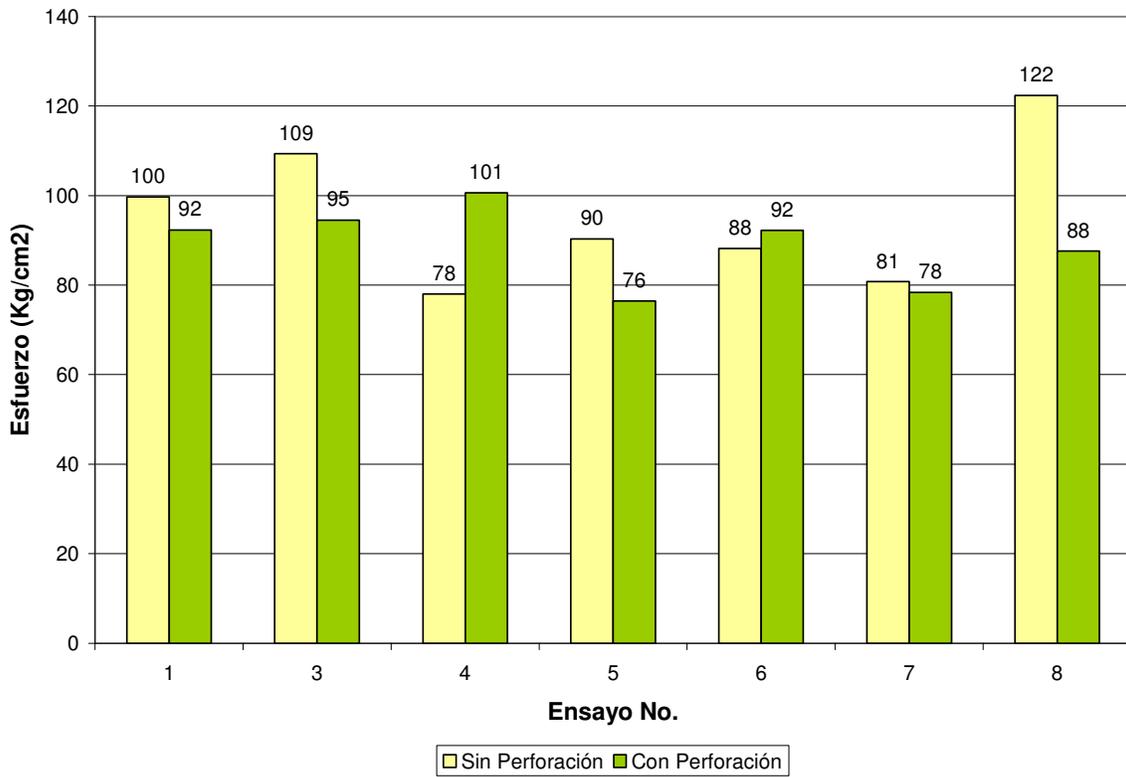
En las probetas largas, los mayores esfuerzos de rotura se encontraron en las probetas sin perforación, presentándose diferencias entre 7% y 25%

En las gráficas 4 a 6, se muestra la comparación de esfuerzos máximos para probetas cortas que presentaron fallas por corte en el punto de aplicación de la carga. Este tipo de falla se atribuye a que un porcentaje de los altos esfuerzos cortantes que se generan en los apoyos son resistidos por los zunchos metálicos colocados en los extremos de la probeta. Sería interesante saber con precisión la magnitud de este esfuerzo producido en cada zuncho; este tema se recomienda para una investigación posterior.

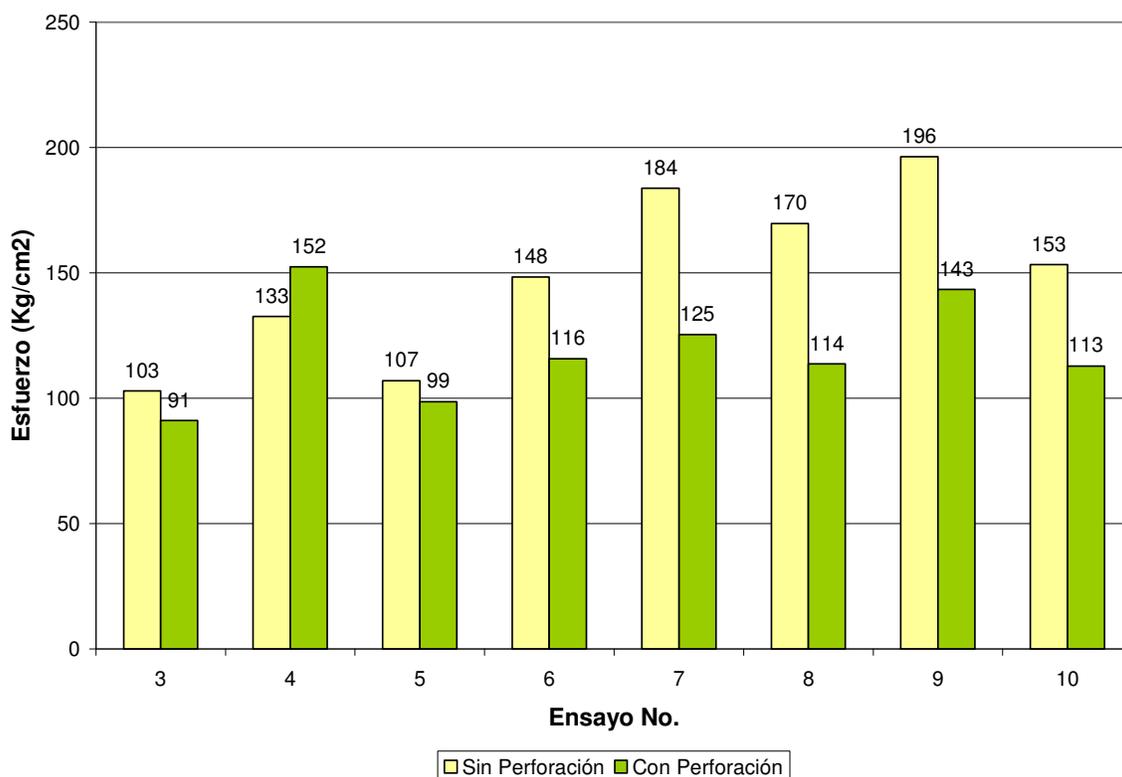
En las probetas cortas, los mayores esfuerzos de rotura debidos a fallas por corte, se encontraron en las probetas sin perforación, presentándose diferencias entre 7% y 30%



Gráfica 4. Esfuerzos de Máximos a Corte. Probetas de luz libre = 1.5m



Gráfica 5. Esfuerzos de Máximos a Corte. Probetas de luz libre = 1.0m



Gráfica 6. Esfuerzos de Máximos a Corte. Probetas de luz libre = 0.5m

5.3. Módulo de Elasticidad a Flexión

En el Anexo 3 se resumen los cálculos realizados para hallar el módulo de elasticidad a flexión para cada una de las probetas largas y se halla el valor característico y el valor promedio para cada longitud libre similar. Estos resultados se muestran como resumen, en la tabla 4.

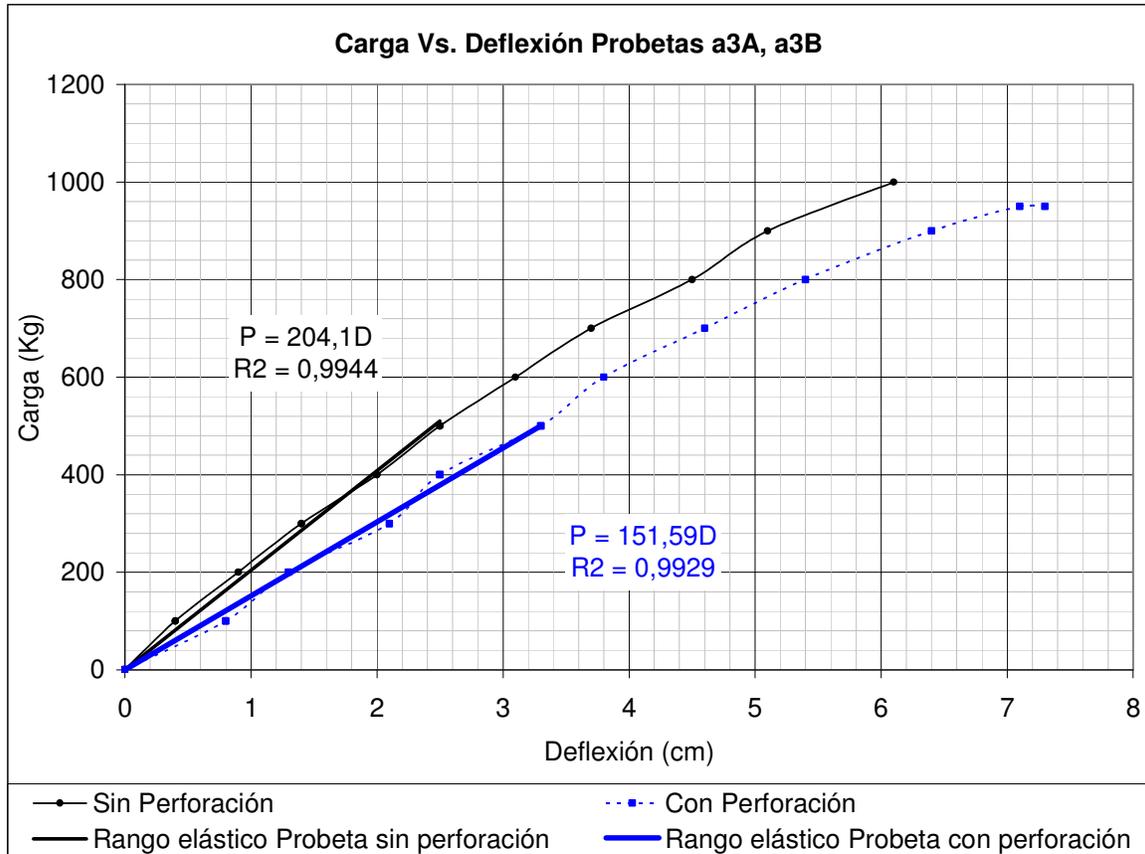
Tabla 4 – Módulo de Elasticidad

Valores Promedio del Módulo de Elasticidad			
Longitud (m)	3,0	2,5	2,0
Sin Perforación	154501,8	152727,7	165322,0
Con Perforación	154397,5	122618,0	140138,3

Valores Característicos del Módulo de Elasticidad			
Longitud (m)	3,0	2,5	2,0
Sin Perforación	102714,7	104772,0	89828,4
Con Perforación	105683,5	80585,7	104740,7

Se presentaron diferencias en los módulos de elasticidad encontrados para las probetas con y sin perforación entre el 1% y el 20%.

La segunda parte del Anexo 3 contiene las gráficas utilizadas para hallar la pendiente de la curva Carga Vs. Desplazamiento en el rango elástico de cada probeta. A continuación se presenta un ejemplo de dos probetas de 3.0m de longitud.



Gráfica 7. Ejemplo para hallar el Módulo de Elasticidad

De acuerdo a las ecuaciones 10 y 11 se calculó un módulo de elasticidad de $230700,1\text{Kg/cm}^2$ para la probeta sin perforación longitudinal y de $115264,6\text{Kg/cm}^2$ para la probeta con perforación longitudinal.

La deflexión debido a los esfuerzos cortantes en las probetas con longitudes entre 0.5m y 1.5m representaron aproximadamente el 10% de la deflexión total, mientras que en los especímenes con longitudes entre 2.0m y 3.0m representaron entre el 1% y el 4%.

CONCLUSIONES

- En las probetas largas, los mayores esfuerzos de rotura se encontraron en las probetas sin perforación, presentándose diferencias entre 7% y 25%
- En las probetas cortas, los mayores esfuerzos de rotura debidos a fallas por corte, se encontraron en las probetas sin perforación, presentándose diferencias entre 7% y 30%
- Se presentaron diferencias en los módulos de elasticidad encontrados para las probetas con y sin perforación entre el 1% y el 20% y su magnitud fue menor para las probetas con perforación longitudinal que para los especimenes sin perforación.
- La deflexión por cortante representa aproximadamente el 10% de la deflexión total en las probetas cortas, mientras que en las probetas largas constituye entre el 1% y el 4%.
- El método de inmunización por inmersión, al requerir la rotura de los diafragmas internos de la guadua, sugiere una disminución de la resistencia última y una disminución en el módulo de elasticidad previsto para la guadua; por lo que su comportamiento mecánico será menos eficiente en comparación con guadua inmunizada con otro método que no requiera la rotura interna de los nudos.

BIBLIOGRAFÍA

EBF: Environmental Bamboo Foundation, 2003. Vertical Soak Diffusion for Bamboo, Ed. Linda Garland, Ubub, Bali, 26 pp.

ISO 22156, ISO 22157 (International Organisation for Standardisation) "Determination of physical and mechanical properties of bamboo" Technical Committee ISO/TC 165, Timber structures, Subcommittee SC 9, Round poles, with co-operation of INBAR, International Network for Bamboo And Rattan.

LONDOÑO Pava, Ximena. Documento 'La Guadua: Un gigante dormido' página: 4 y 5. Publicado en las Memorias 'Seminario Guadua en la Reconstrucción' Armenia Quindío. Febrero 10, 11 y 12 del 2000

MANUAL DE DISEÑO PARA MADERAS DEL GRUPO ANDINO. Editado por la Junta del Acuerdo de Cartagena. Lima – Perú, 1984.

MORAN, J.,A., 2002, Traditional Bamboo Preservation Methods in Latin America. INBAR. Techn. Rep. 25, 70 pp.

TIMOSHENKO S. P. Y Gere J. M. Mecánica de Materiales. Segunda Edición. Grupo Editorial Iberoamérica.

TORRES CRUZ, Luis Alberto. "Modelo anisótropo de elementos finitos para el análisis mecánico del bambú y su verificación experimental". Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería Civil y Geomática. Enero de 2005

TAKEUCHI [2006] Resistencia al corte paralelo a la fibra en Guadua angustifolia. IAC-NOCMAT 2005 Rio. Inter. American Conference on Non-Conventional Material and Technologies in Ecological and sustainable Construction. ISBN 85-98073-05-9. ABMTENC (Brazilian Society for the science of Non conventional materials and Technologies). Noviembre 11-15, 2005. RIO DE JANEIRO, Brasil

VÉLEZ, G. Documento: El Humilde bambú "acero vegetal". Memorias Congreso Virtual de Arquitectura. Caracas, Venezuela. Febrero 2001.

ANEXOS

INFLUENCIA DE LA PERFORACIÓN, PARA INMUNIZACIÓN, EN LOS
TABIQUES EN EL COMPORTAMIENTO DE ELEMENTOS SOLICITADOS A
FLEXION DE GUADUA ANGUSTIFOLIA

MELISSA RUSINQUE GUATIBONZA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
AREA DE ESTRUCTURAS
BOGOTÁ
2007

INFLUENCIA DE LA PERFORACIÓN, PARA INMUNIZACIÓN EN LOS
TABIQUES, EN EL COMPORTAMIENTO DE ELEMENTOS SOLICITADOS A
FLEXION DE GUADUA ANGUSTIFOLIA

MELISSA RUSINQUE GUATIBONZA

Tesis de Grado para optar al título de
Ingeniero Civil

Director
Msc. CAORI PATRICIA TAKEUCHI TAM
Ingeniera Civil

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
AREA DE ESTRUCTURAS
BOGOTÁ
2007

Nota de Aceptación:

Msc. Caori Patricia Takeuchi
Directora

Bogotá, Agosto de 2007

AGRADECIMIENTOS

Aunque en la portada de este documento sólo repose mi nombre y el de mi directora de tesis, es indudable que es el resultado de un trabajo conjunto, una suma de colaboraciones y esfuerzos; he aquí una hoja para nombrar algunas de esas personas que me acompañaron.

Caori Takeuchi Tam, Ingeniera Civil, Magíster en Estructuras. Profesora asociada de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, directora del proyecto de grado, gracias por su confianza, asesorías y recomendaciones.

Guillermo Torres y Pastor Riaño, laboratoristas del Instituto de Ensayos e Investigaciones I.E.I. de la Universidad Nacional, gracias por su amabilidad, colaboración e indicaciones en los ensayos.

Fabián Augusto Lamus, Ingeniero Civil, Universidad Industrial de Santander y Juan Carlos Herrera, Ingeniero Civil, Universidad de Cartagena, aspirantes a Magíster en Estructuras de la Universidad Nacional, gracias por su irremplazable amistad, oportunos consejos y ayuda incondicional sin importar el horario.

Chiala Hernández, Carlos Arturo Rey y John Trujillo; estudiantes de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional, gracias por su tiempo y compañía.

Rodrigo Rusinque y Luz Marina Guatibonza, mi papá y mi mamá, gracias porque siempre han sido mis amigos, mi orgullo y mi ejemplo.

Camilo Andrés Rusinque, Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Colombia, aspirante a Magíster en Estructuras de la Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro, gracias por ser mi razón, mi lámpara constantemente encendida en mi camino.

TABLA DE CONTENIDO

JUSTIFICACIÓN	1
1 OBJETIVOS	2
1.1 OBJETIVO GENERAL	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
CAPITULO 1. GENERALIDADES	3
1.1 ¿QUÉ ES GUADUA ANGUSTIFOLIA?	3
1.2 MÉTODOS DE INMUNIZACIÓN.....	6
1.2.1 <i>Tratamientos no químicos</i>	6
<u>Inmersión en agua</u>	6
<u>Método de ahumado</u>	6
1.2.2 <i>Tratamientos químicos</i>	7
<u>Método de transpiración</u>	8
<u>Método de inmersión</u>	8
<u>Método Boucherie simple</u> (por gravedad).....	9
<u>Método Boucherie modificado</u> (por presión).....	9
<u>Protección adicional</u>	10
CAPITULO 2. PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS	11
2.1 PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE LA GUADUA	13
CAPITULO 3. DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO	14
CAPITULO 4. CÁLCULOS	17
4.1. ESFUERZOS NORMALES Y CORTANTES.....	17
4.2. MÓDULOS DE ELASTICIDAD.....	22
4.3. VALOR CARACTERÍSTICO	27
CAPITULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	28
5.1. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS.....	28
5.2. ESFUERZOS DE ROTURA.....	28
5.3. MÓDULO DE ELASTICIDAD A FLEXIÓN	32
CONCLUSIONES	34
BIBLIOGRAFÍA	35
ANEXOS	36

TABLA DE ILUSTRACIONES

FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Muestras de Guadua afectadas por insectos y hongos.....	1
Fotografía 2. Guadua Angustifolia	3
Fotografía 3. Ejemplo de estructura construida con Guadua Angustifolia. Eje Cafetero....	5
Fotografía 4. Método tradicional de ahumado.....	7
Fotografía 5. Tallos sumergidos en solución de boro.....	8
Fotografía 6 Método Boucherie modificado	9
Fotografía 7. Perforación longitudinal	11
Fotografía 8. Nomenclatura y ubicación de zuncho metálico	12
Fotografía 9. Montaje de ensayo	14

FIGURAS

Figura 1. Ubicación de zunchos metálicos	12
Figura 2. Disposición de elementos en ensayos de probetas largas	15
Figura 3. Disposición de elementos en ensayos de probetas cortas	15
Figura 4. Dispositivos de aplicación de carga.....	15
Figura 5. Dispositivos de apoyo	16
Figura 6. Modelos de vigas simplemente apoyadas.....	17
Figura 7. Reacciones	18
Figura 8. Diagramas teóricos de fuerza cortante y momento flector.....	18
Figura 9. Distribución de esfuerzos normales σ_x	19
Figura 10. Nomenclatura viga no prismática, circular hueca	20
Figura 11. Elemento de longitud Δx	21
Figura 12. Esquema de viga con carga puntual	22
Figura 13. Sistemas de carga virtual y real	25

GRÁFICAS

Gráfica 1. Esfuerzos Máximos a Flexión. Probetas de luz libre = 3.0m	29
Gráfica 2. Esfuerzos Máximos a Flexión. Probetas de luz libre = 2.5m	29
Gráfica 3. Esfuerzos Máximos a Flexión. Probetas de luz libre = 2.0m	30
Gráfica 4. Esfuerzos de Máximos a Corte. Probetas de luz libre = 1.5m	31
Gráfica 5. Esfuerzos de Máximos a Corte. Probetas de luz libre = 1.0m	31
Gráfica 6. Esfuerzos de Máximos a Corte. Probetas de luz libre = 0.5m	32
Gráfica 7. Ejemplo para hallar el Módulo de Elasticidad.....	33