

Comparación del bambú con el acero como material de refuerzo a flexión en concreto



Abstract

This project will conduct the study on the use of bamboo as reinforcement in concrete elements, in comparison with steel, which is currently the most commonly used material in reinforced concrete.

Bamboo tablets are the core of this study. They consist in a rectangular shape that is extracted from bamboo cane. This way, the bamboo will be combined with concrete to observe their behavior while working with concrete.

In order to be able to use this –bamboo– the study will enhance or characterize the physical components of the specimens used as well the mechanical properties of this material. This is essential for good reinforced concrete design.

Besides enhancing the characteristic of bamboo, one should analyze the behavior of bamboo while working with concrete. It is also the objective of the present project to determine the existing adherence of both materials when combined. At the same time the aim of the project is to establish the resistance of reinforced concrete with bamboo and compare the resistance of reinforced concrete with steel.

The feasibility of using bamboo for this purpose shall be determined by the results generated in this study, and also should indicate what types of components can be used with this material as a reinforcement.

Keywords: bamboo, reinforced concrete, adherence, knot, fibers, tensile strength.

Resumen

En el presente proyecto se realizará el estudio sobre la utilización del bambú como material de refuerzo en elementos de concreto, y la comparación del mismo con el acero, el cual es material usado actualmente en el concreto reforzado.

El bambú usado en este estudio se encuentra en forma de tablillas; es decir, elementos de sección rectangular que son extraídos de la caña entera del bambú. Es en esta forma que el bambú se combinará con el concreto para observar su comportamiento en conjunto.

Para poder usar el bambú se tiene como objetivo caracterizar el mismo, tanto los componentes físicos de las probetas usadas como las características mecánicas de este material. Esto es indispensable para realizar diseños de elementos de concreto reforzado.

Además de la caracterización del bambú, se debe analizar el comportamiento del bambú al usarse en conjunto con el concreto. Es por esto que también se tiene como objetivo establecer la adherencia que existe entre ambos materiales al combinarse y además se busca establecer la resistencia de elementos de concreto reforzados con este material y compararlos con la resistencia de elementos de concreto reforzados con acero.

La viabilidad para usar el bambú con este fin se determinará según los resultados generados del presente estudio, y también indicará que tipos de componentes pueden ser usados con este material como refuerzo.

Palabras clave: bambú, concreto reforzado, adherencia, nudo, fibras, resistencia a la tracción.

Comparación del bambú con el acero como material de refuerzo a flexión en concreto

William Alonso Poveda Montoya

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

Noviembre del 2011

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

PREFACIO.....	1
RESUMEN EJECUTIVO.....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
MARCO TEÓRICO.....	6
METODOLOGÍA.....	11
RESULTADOS.....	18
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	32
CONCLUSIONES.....	44
RECOMENDACIONES.....	46
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47

Prefacio

El proyecto a desarrollar se realizará en la empresa HOLCIM, más específicamente en la planta de productos de concreto ubicada en San Rafael de Alajuela. Dicha empresa se caracteriza por ser productora de cemento, concreto premezclado, agregados y productos de concreto. Entre los productos de concreto que se elaboran en HOLCIM podemos mencionar bloques de concreto, losas de concreto, tubos de concreto y productos prefabricados de concreto, entre otros.

Puesto que el país no cuenta con fuentes de materia prima para producir acero, se a que el mismo sea importado de otros países, lo que ocasiona que tenga un costo considerable. En cambio, sí se cuentan con los medios necesarios a nivel nacional para la producción de bambú, lo que facilitaría la utilización del mismo en elementos de concreto y a su vez se estarían disminuyendo los costos productivos.

Además, tanto el país como la empresa HOLCIM se han comprometido a conservar el ambiente, por lo cual se debe disminuir la huella ecológica que se genera por su constante funcionamiento. Es por esto que se ha buscado trabajar con materias que no dañen el ambiente, y el bambú no solo no daña, sino que estaría contribuyendo con la preservación ambiental, ya que este material tiene una gran capacidad para la absorción de dióxido de carbono (CO₂) y generación de oxígeno.

Es por estas razones que se analizará la viabilidad para la utilización de esta planta en conjunto con el concreto. Es así que el objetivo primordial de este estudio es establecer la capacidad del bambú para desempeñarse como material de refuerzo en elementos de concreto. Esta combinación de materiales debe cumplir con los requerimientos solicitados para elementos reforzados, los cuales se cumplen actualmente con el uso del acero.

La elaboración del presente proyecto se logró no solo con base en el esfuerzo personal, sino también gracias a la colaboración de instituciones como Holcim y el laboratorio del Cetec, Xilo Químicas y el Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción del Tecnológico de Costa Rica.

En cada una de estas instituciones laboran personas que siempre estuvieron anuentes a colaborar en la ejecución de este proyecto. Es por esto que le debo agradecer al ingeniero Carlos Wiessel y al arquitecto Edgardo Barrenichea de E&E Promotores, quienes facilitaron el uso del bambú. A los técnicos Andrés Obando Chaves, William Montero Villalobos y Eduardo Artavia Calderón, quienes colaboraron en los ensayos realizados en el CETEC. Debo agradecer también a los técnicos del CIVCO, Vicente Villalta, Eduardo Arce, Juan Carlos Coto y Heiner Navarro, que de igual manera ayudaron en los ensayos necesarios.

Agradezco también a los profesores y funcionarios de la Escuela de Ingeniería en Construcción Sonia Vargas Calderón, Rolando Fournier Zepeda y Gustavo Rojas Moya por su oportuna guía en el momento adecuado, además a la señora Andrea Contreras Alvarado por su apoyo absoluto hacia mí persona.

Debo resaltar mi gratitud al ingeniero Minor Murillo de Holcim por su colaboración y asesoría en la elaboración de esta investigación. Por supuesto, debo mencionar a mi profesor guía, ingeniero Mauricio Araya Rodríguez. A él le agradezco además de su guía, su paciencia hacia mi persona.

Por último, pero no menos importante agradezco a mi familia por apoyarme completamente, especialmente a mi madre por su sabio consejo e infinita sabiduría. Y para finalizar, gracias a DIOS, quien me dio lo necesario para lograr esta meta.

Resumen ejecutivo

El presente estudio trató de evaluar la capacidad del bambú para ser utilizado como refuerzo en elementos de concreto. Este material, de origen natural, se procesó industrialmente para obtener de la caña tablillas de diferentes dimensiones, las cuales fueron probadas en ensayos por separado para determinar sus características físicas y mecánicas. Además de dichos análisis, se debió realizar una comparación entre el acero y el bambú como refuerzo al trabajar en conjunto con el concreto.

La importancia de determinar la posibilidad del uso del bambú en conjunto con el concreto radica en que la producción de acero causa un impacto ambiental dañino, además de que el país debe importar este material para su uso; mientras que el bambú, al igual que cualquier planta, contribuye a la mitigación de este daño, además de que la producción del bambú es posible a nivel nacional. Por esto, al lograr su utilización en algún campo se promovería su siembra y así se contribuiría a disminuir el daño ambiental que se produce actualmente.

Es por eso que para su utilización en el campo de la construcción, y en específico como refuerzo en concreto, se necesita determinar de manera exacta y respaldada todas las características del mismo, para que se le dé un uso adecuado de acuerdo con los resultados obtenidos.

Durante la caracterización de las tablillas de bambú suministradas para la presente tesis, se logró comprobar que las mismas cuentan con la presencia de las ya conocidas fibras de la planta y también del nudo presente en la caña. Debido a esto, estas probetas que cuentan con dos componentes claramente definidos se tuvieron que caracterizar y así definir de qué manera se debería utilizar este material.

El material que se utilice como refuerzo en concreto debe cumplir requisitos fundamentales como lo son resistencia a la tensión, ductilidad, adherencia con el concreto y durabilidad, entre otros aspectos. Es por esto que se evaluó la capacidad a tensión de los componentes de la tablilla por separado.

De esta manera se estableció que la capacidad del bambú va a estar regida por la resistencia del bambú, esto porque en ninguno de los casos, el nudo llegó a superar a las fibras al ser sometidos a tensión. Sin embargo, la dispersión entre los datos obtenidos no permitió establecer un valor exacto para esta capacidad. Lo que sí se determinó es que la resistencia de los componentes del bambú está ligada a la calidad de la probeta y al lugar de la planta de donde se obtuvo la misma. Esto se da a causa de que la densidad en las fibras del bambú varía en la sección de la planta.

Otro aspecto que se buscó evaluar o determinar es el módulo elástico del bambú, el cual también va a estar regido por el valor obtenido del nudo. Esto porque las deformaciones en la probeta, al aplicarles una carga, se presentan en el nudo sin que las fibras afecten su longitud original.

Una vez que se realizó el análisis de la capacidad de los componentes del bambú, se estudió cómo trabajan en conjunto el concreto y el bambú. Con respecto a la adherencia entre materiales, los ensayos ejecutados demostraron que la regularidad de la superficie en las probetas causa que la adherencia entre el bambú y el concreto se vea disminuida con respecto a probetas de bambú que no presentan esta forma en las caras de la misma. Es decir, las probetas de cara plana se separan del concreto ante cargas bajas.



Es por esto que al realizarle discontinuidades a las caras de las tablillas se está aumentando el área de contacto, con lo que

se mejora la adherencia mecánica entre materiales. Sin embargo estas discontinuidades no aseguran la adherencia perfecta entre materiales.

Una vez que se logró que se incrementara la adherencia entre las probetas de bambú y el concreto, se ensamblaron elementos de este material con refuerzo de bambú y de acero. Esto con el objetivo de lograr una comparación entre los resultados.

Para los elementos reforzados, al igual que para las pruebas de adherencia, se utilizó un concreto cuyo $f'c$ fuera igual a 280 kg/cm^2 . La elaboración de la mezcla estuvo a cargo de la empresa Holcim.

La falla de estos elementos se ejecutó al aplicarle 2 cargas a los tercios de la longitud del mismo, con esto se busca que la falla se dé a flexión.



La falla en estos elementos demostró que el refuerzo con bambú ocasiona que la falla sea frágil, esto porque se están combinando materiales cuya falla es de este tipo. Además las capacidades de los elementos reforzados con acero superan ampliamente a los reforzados con bambú.



Introducción

En el presente documento se tratará de determinar la posibilidad de utilizar el bambú en forma de tablilla como refuerzo en elementos de concreto y en qué tipo de elementos es posible su uso. Para lograr este objetivo se requerirá establecer las características de la planta y cómo las mismas pueden ser utilizadas y adaptadas para la combinación de materiales.

En países como China, Japón y Colombia a esta planta se le da gran cantidad de usos en distintos campos, entre ellos está el sector de la construcción. En estos países se utiliza la planta completa en estructuras como puentes, casas o bien andamios. Y es por esto que su uso también se ha empezado a dar en nuestro país.

En Costa Rica esta variedad de planta se utiliza, por ejemplo, como elemento artesanal en techos debido a que la caña bien procesada y con el debido acabado es un elemento decorativo llamativo para las personas.

En el presente estudio se utilizará bambú de la especie Guadua. Dicha planta será procesada industrialmente para obtener ella elementos de sección rectangular que serán estudiados para determinar sus propiedades, y así la posibilidad de su utilización en conjunto con el concreto.

Para dicho fin se realizarán distintos ensayos de laboratorio, entre ellos están pruebas a tracción en las distintas probetas de bambú suministradas, ya que en elementos reforzados, uno de las principales características que se debe conocer es la capacidad a tensión del material utilizado.

Otro ensayo que se debe realizar es la determinación de la adherencia entre bambú y concreto. Esto debido a que el material que se utilice en conjunto con el concreto y sobre todo como refuerzo, debe asegurar una adherencia perfecta para que el mismo no sea separado del concreto.

Por último se debe evaluar la capacidad de elementos reforzados con bambú y acero. En esta prueba se estarán poniendo a evaluación

todos los anteriores parámetros que se buscaron definir con las pruebas anteriormente mencionadas.

Para lograr los puntos mencionados anteriormente se establecieron los siguientes objetivos.

Objetivos

Objetivo General

Establecer la capacidad del bambú para desempeñarse como material de refuerzo en elementos de concreto sometidos a flexión.

Objetivos Específicos

Determinar los componentes físicos que conforman las probetas de bambú a utilizar en estos ensayos.

Establecer la capacidad a tensión de los componentes que conforman la planta de bambú.

Generar una comparación entre las capacidades del acero y del bambú a partir de los datos obtenidos de los ensayos a tracción.

Determinar la carga necesaria para extraer las probetas de bambú de una pastilla de concreto y relacionar esta carga con las características de la probeta.

Determinar la capacidad de los elementos de concreto con refuerzo de bambú y acero mediante un ensayo de flexión, y generar un análisis comparativo entre ambos.

Como es claro, para determinar esos objetivos es necesario determinar el alcance del proyecto en sí y las limitaciones con las que se cuenta durante la elaboración del proyecto.

Alcances

Se buscará determinar las características de los componentes en las probetas de bambú utilizadas para este estudio. Además de dichas características físicas, se examinará la capacidad de dichos componentes para su eventual utilización.

También es necesario establecer cuáles de estas propiedades de los componentes de la planta van a regir en un eventual diseño.

Se determinará la capacidad de las probetas para trabajar en conjunto con el concreto. Es por esto que se buscará definir la capacidad de la adherencia entre los materiales en estudio y las cargas de extracción a las cuales el bambú se va a separar del concreto para distintas condiciones de interacción entre materiales.

Además, se realizarán fallas en elementos reforzados con bambú para determinar cómo este se comporta en conjunto con el concreto en un elemento sometido a flexión. Para estos elementos no se analizará la capacidad a cortante.

El propósito de realizar ensayos en elementos reforzados con ambos materiales es realizar un análisis comparativo entre materiales. No se establecerán los parámetros para realizar un diseño usando el bambú como refuerzo.

Limitaciones

Dentro de las limitaciones con las que se cuenta para la elaboración de dichos ensayo podemos mencionar las siguientes:

El material que se estudiará, es decir el bambú, será suministrado por la compañía XILO Químicas conforme este se necesite. Esto puede ocasionar que al no contar con la materia prima para los ensayos de forma inmediata, los mismos

sufran cambios en su programación, y por ende se vea afectado el cronograma del proyecto.

Este material es procesado por dicha compañía y sobre este proceso no se tuvo control alguno, por lo cual se parte del hecho de que los tratamientos suministrados y los métodos de producción fueron exactamente los mismos en todo momento. Por eso, las variaciones que se den en los resultados no deberían ser a causa de modificaciones en el tratamiento de la materia prima.

Los ensayos ejecutados en los distintos materiales serán elaborados en los laboratorios del CIVCO y del Cetec, por lo que se requiere supervisión de los técnicos de dichos centros para la adecuada ejecución de los mismos. Dichos centros también realizan otras actividades, por lo cual se debe solicitar con anticipación el espacio necesario para la ejecución de ensayos. La aprobación de los mismos está sujeta a la disponibilidad del personal capacitado.

Marco teórico

Concreto reforzado:

Concreto reforzado: Por concreto reforzado se debe entender que es la combinación entre el concreto y un material de refuerzo, el cual es el acero. El concreto reforzado no debe tener menos de la cantidad mínima de refuerzo establecida en el diseño. Como se mencionó, el concreto reforzado es una mezcla entre el concreto y el acero, generalmente en forma de varillas. Esta mezcla de materiales logra combinar las características de ambos, las cuales son distintas para uno y otro, por lo que se logra obtener un material que tiene más ventajas que el concreto y el acero de forma separada. Entre esas ventajas que tiene el concreto reforzado están el costo relativamente bajo, la capacidad de soportar distintos tipos de climas a los cuales puede ser sometido, la buena resistencia a la compresión y la gran capacidad de moldeo del concreto con la alta resistencia del acero a esfuerzos de tensión. La suma de todas estas ventajas de ambos materiales hace al concreto reforzado un material con una gran cantidad de usos en la construcción.

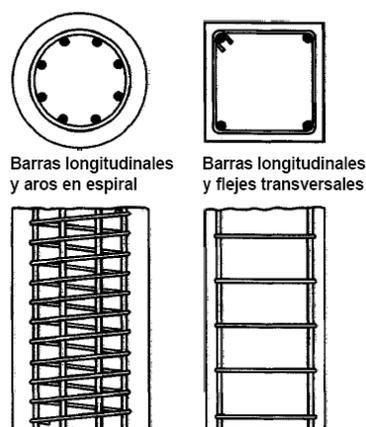


Figura 1. Elementos típicos de concreto reforzado con acero.

Acero de refuerzo: el acero que es utilizado como refuerzo en concreto tiene la característica de que la resistencia a la fluencia es aproximadamente de diez a quince veces la resistencia a la compresión de un concreto de uso y resistencia común, y más de cien veces su resistencia a tensión. Por esta razón es que el acero es utilizado como refuerzo para soportar los esfuerzos de tensión a los que puede ser sometido el concreto.

Como se mencionó, el refuerzo de acero es utilizado para soportar los esfuerzos de tensión a los que es sometido el concreto reforzado; sin embargo, el acero también puede ser usado para resistir los esfuerzos de compresión, especialmente cuando se desea reducir la sección transversal de elementos de concreto¹.

El acero de refuerzo tiene la característica de que tiene la forma de barras o varillas, las cuales se encuentran en diferentes diámetros. Además, estas barras deben ser corrugadas para que de esta manera se aumente la resistencia al desplazamiento (extracción) entre el acero y el concreto. Dichas estrías pueden ser perpendiculares a la longitud de la varilla o con cierta inclinación, pero no se encuentran estrías que sean paralelas al largo de la barra.



¹ Nilson, Arthur. Diseño de estructuras de concreto.

Figura 2. Varillas de acero corrugadas para ser utilizadas como refuerzo.

Por acero preesforzado se debe entender que es aquel acero que es sometido a altas fuerzas de tensión antes de colocar el concreto, para que estos actúen de forma conjunta para resistir fuerzas externas. Por otro lado, el acero de refuerzo o refuerzo no preesforzado se coloca en el molde o en la formaleta antes de colocar el concreto sin que el mismo esté sometido a algún esfuerzo.

Concreto prefabricado: Elemento de concreto construido en un lugar diferente de su ubicación final en la estructura. El diseño de los elementos prefabricados y sus conexiones debe incluir las condiciones de carga y de restricción desde la fabricación inicial hasta el momento de completar la estructura, incluyendo el desencofrado, almacenamiento, transporte y montaje². Esto debido a que los esfuerzos desarrollados en este tipo de elementos desde el momento de la colocación del concreto en el molde hasta la conexión final, pueden llegar a superar los esfuerzos producidos debido a las cargas de servicio. Además se debe tomar en cuenta que la manipulación de estos elementos puede llegar a causar deformaciones que afecten al mismo considerablemente, inclusive llevándolos a la falla del concreto. Es por esto que todos los procedimientos a los que sean sometidas las unidades de concreto prefabricado (moldeo, almacenamiento, transporte y colocación) deben ser tomados en consideración para que de esta manera los elementos de concreto prefabricado sigan cumpliendo con los requisitos para los que fueron diseñados.



Figura 3. Elementos (losas) de concreto prefabricado.

El diseñador debe procurar proveer continuidad mutua entre los elementos prefabricados y con otras partes del sistema estructural. El sistema estructural del cual es competente debe en lo posible tener una alta redundancia. Además, los desplazamientos deben estar limitados para preservar la integridad del sistema estructural³.

Los paneles de muro de concreto prefabricado se construyen en una gran diversidad de formas dependiendo de los requisitos. Estos paneles se utilizan como muros cortina que se amarran a columnas y vigas, o bien como muros de carga⁴.

Elementos compuestos de concreto sometidos a flexión: Elementos prefabricados de concreto o elementos construidos en obra sometidos a flexión, fabricados en etapas separadas, pero interconectados de tal manera que todos los elementos responden a las cargas como una unidad². La resistencia de estos elementos a la flexión se determina ensayando una viga de concreto o cualquier otro tipo de elemento reforzado, el cual se encuentra simplemente apoyado, sujeto a una carga en el medio de su longitud libre, o bien a dos cargas concentradas en los tercios medios de su longitud. La falla se da cuando se genera una grieta que fractura el espécimen, y la misma se da generalmente cerca del medio del elemento de concreto. Luego de generada esta grieta, el acero o el material de refuerzo del elemento que se está ensayando empieza a ser sometido a un esfuerzo de tensión hasta que llegue a un estado de falla. En caso de que el refuerzo sea acero, la falla se da cuando este material entra en el rango plástico, una vez alcanzada la fluencia del acero.

Rango elástico: Por rango elástico se entiende que es la condición en la cual, ante un esfuerzo, el material presenta un comportamiento elástico, esto quiere decir que ante el incremento en el esfuerzo también se presentan incrementos proporcionales en la deformación. Si se le quita la carga al material, la deformación vuelve a cero de nuevo, con lo cual el cuerpo recupera su forma original, es decir, se tiene una deformación completamente reversible.

Además, existe el límite llamado límite elástico. Si dicho límite es superado se generan deformaciones remanentes, por lo cual, si se le

² ACI 318 S-05

³ CSCR 2002

⁴ Nilson, Arthur. Diseño de estructuras de concreto.

elimina el esfuerzo, el cuerpo no vuelve a su estado original. Cuando el material se encuentra en este rango se dice que el mismo está en el rango plástico.

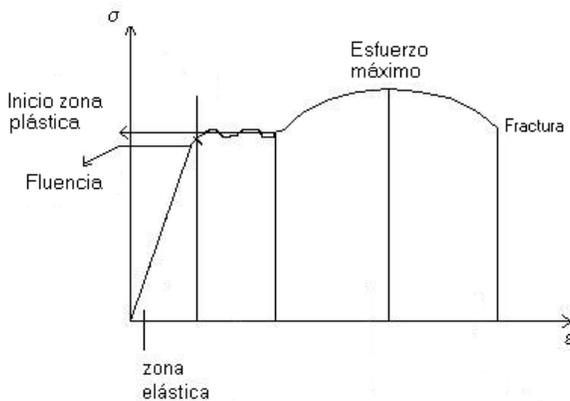


Figura 4. Curva típica Esfuerzo- Deformación del acero ante una carga a tensión.

El esfuerzo de tensión en la fibra inferior que genera la rotura en el elemento sometido a flexión se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$f_r = \frac{Mc}{I} \dots \dots \dots Ec 1.$$

Donde:

- fr: es el módulo de rotura.
- M: es el momento flexionante que se genera debido a la carga máxima.
- c: es la distancia al centroide de la sección.
- I: es el momento de inercia de la sección.

El módulo de rotura es cerca del 10% al 20% de la resistencia a compresión del concreto, sin embargo esto también depende del tipo, dimensiones y volumen de agregado grueso utilizado. Sin embargo, la mejor correlación para los materiales específicos es obtenida mediante ensayos de laboratorio.

Cuando se ensaya un elemento a flexión lo primero que falla es el concreto, y es cuando este alcanza su módulo de rotura. Luego de esto el refuerzo del elemento, como ya se mencionó anteriormente, empieza a soportar esfuerzos de tensión. La falla del elemento en su totalidad se da cuando este continúa deformándose con una carga constante.

Bambú:

Bambú Guadua: especie de bambú procedente del noroeste de Sur América, principalmente de Colombia y Ecuador e inclusive Centro América. Se ubica principalmente en zonas fértiles comprendidas hasta los 1700 m.s.n.m. y en hábitats húmedos de los bosques de altura y las zonas bajas tropicales.



Figura 5. Planta de bambú guadua angustifolia.

Todas las especies de bambú, pero Guadua en particular, tienen un crecimiento más rápido y más alta productividad si se realiza una comparación con los árboles. Este tipo de plantas de bambú crecen desde el suelo con un diámetro prácticamente constante, sin incrementos significativos del mismo con el tiempo, como sí ocurre con los árboles. Esto permite que la cantidad de plantas de bambú que se siembren por unidad de área sea mayor, ya que conforme esta crezca no ampliará considerablemente su tamaño diametralmente, lo que disminuye la separación entre plantas y logra así poder obtener una mayor cantidad de materia prima de esta planta en comparación con otras plantas maderables.

El diámetro máximo registrado para una planta de Guadua es de 25 cm, aunque su diámetro medio está entre 9 y 13 cm. En el caso de la especie Guadua Angustifolia, se ha llegado a observar un crecimiento diario de 21 cm, de manera que alcanza su máxima altura (15-30 metros) en sus primeros seis meses, y puede ser cosechado tras 4 o 5 años. Tras la cosecha del bambú, este tiene la gran ventaja de renovarse

sin reforestar. Esto significa que de donde fue cortada la planta se generará una nueva sin la necesidad de sembrar otra, lo cual beneficia a los bosques, ya que no es necesario alterar los bosques de más lento crecimiento para obtener materia prima que puede ser adquirida de bosques de bambú.

Otra característica del bambú es que también captura el CO₂ y lo convierte en oxígeno en mayor cantidad que los árboles; por lo que juega un papel fundamental en un ecosistema sano y saludable. Estudios indican que el potencial de fijación de dióxido de carbono en los primeros seis años de crecimiento de la Guadua desde que es plantada es de 54 toneladas métricas por hectárea. Este descubrimiento es fundamental, ya que hace que el bambú participe activamente en el sistema de intercambio de desechos de emisión de CO₂ lo que conlleva a beneficios adicionales para los inversores y granjeros que plantan y cultivan guadua, la cual produce emisiones negativas.⁵

Además de estos beneficios, el bambú guadua angustifolia tiene la particularidad de que puede almacenar 30.375 litros de agua, es decir, el agua de 150 personas por día, asumiendo un consumo de 200 litros/día/persona⁶

Usos del Bambú en la industria de la construcción:

El bambú es uno de los materiales usados desde la antigüedad por el hombre para aumentar su comodidad y bienestar, por lo cual su utilización en la construcción de diferentes tipos de estructuras ha sido significativo. Inclusive actualmente sigue siendo utilizado de manera considerable. Su uso va desde muebles hasta puentes, lo que lo convierte en un material versátil y de gran utilidad.

Existen ciertos elementos típicos de cualquier estructura que suelen ser elaborados en concreto o en acero que también pueden ser y han sido elaborados en bambú. Entre esos elementos podemos mencionar las columnas, vigas y la estructura de techo.

Columnas: En este tipo de elementos estructurales el bambú se utiliza en su totalidad,

⁵<http://www.guadubamboo.com/la-guadua-angustifolia.html#ixzz1Kh6jlaww>

⁶ Guadua (Lambú). Castellanos, Sandra.

es decir la caña completa. Esta se coloca sobre pedestales de concreto que han sido colados junto con la cimentación de la estructura logrando así que los pedestales sean parte de la misma. Para asegurarse el adecuado anclaje entre el pedestal y la columna de bambú se dejan expuestos pernos para anclar ambas partes, y que no se generen problemas como puede ser el desprendimiento de la columna.

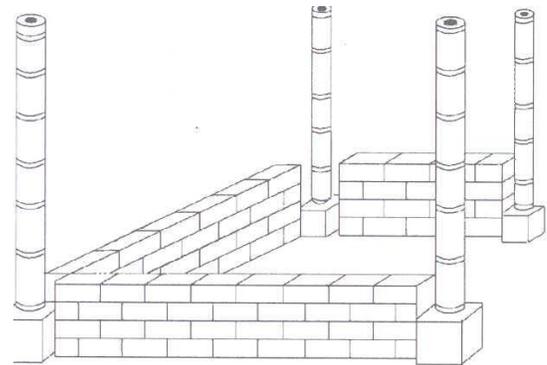


Figura 6. Columnas de bambú utilizando la caña completa.

Vigas: Las vigas, en las que también se utiliza la caña completa, se deben colocar directamente sobre las columnas de bambú uniéndolas mediante pernos para que se garantice rigidez en la estructura y que la misma se comporte en conjunto con el resto de la estructura. En la unión entre ambos elementos se debe evitar la presencia del nudo.



Figura 7. Columnas de bambú utilizando la caña completa.

Estructura del techo: Se puede decir que este elemento, de los ya mencionados, es el que más comúnmente se encuentra elaborado de bambú, ya que además de su capacidad estructural,

brinda cierta belleza a la estructura y la hace atractiva a la vista si se elabora adecuadamente y se complementa con ciertos detalles como una cubierta de techo apropiada.

En esta estructura se debe tener sumo cuidado en las uniones, ya que al ser varias, si llega a fallar una unión es posible que comprometa a las demás y en general toda la estructura. Las cerchas de bambú deben ir colocadas sobre las vigas para que de esta manera se dé una transmisión adecuada de cargas hasta la cimentación de la estructura.



Figura 8. Columnas de bambú utilizando la caña completa.

En el presente estudio se analizará el bambú no como caña completa, si no en forma de tablillas o latas, las cuales serán utilizadas como posible refuerzo en elementos de concreto.

Las latas son segmentos longitudinales del tallo del bambú guadua y en las cuales dos de sus caras opuestas son paralelas. Ya una vez preparada la lata, esta es sometida a cepillado para dar como resultado un segmento longitudinal con sus caras paralelas y perpendiculares entre sí. Para lograr fabricar las tablillas se requiere un espesor grande de la planta.

Metodología

Para establecer la capacidad que poseen los elementos de bambú para ser utilizados como refuerzo en elementos de concreto, se realizan pruebas de laboratorio tanto en el bambú como en los dispositivos que mezclan concreto con bambú para determinar cuál es el comportamiento de ambos materiales en conjunto.

Como requisito para poder utilizar el bambú como sustituto parcial o total del acero en elementos de concreto, inicialmente es necesario caracterizar el mismo, para que de esta manera el diseñador de los miembros reforzados cuente con todos los parámetros básicos de diseño. Dado que el bambú es un material de origen natural, tiene la característica de presentar variaciones en toda su composición (anisotropía), y entre las más importantes se encuentra la presencia del nudo propio de la caña a lo largo de la misma con separaciones que varían de acuerdo con la especie de bambú.

Una vez caracterizado el bambú es necesario comprobar que el acero que se encuentra en el mercado nacional cumple con los requisitos que debe cumplir este tipo de material para ser utilizado como refuerzo, y de esta manera establecer una posible comparación entre ambos materiales.

Pruebas en acero

Cuando el acero es utilizado como refuerzo en elementos de concreto, todos los parámetros de diseño son conocidos. Esto debido a que el acero es de los materiales más usados en la construcción de obras de todo tipo. Durante los años que se ha utilizado, se han realizado diferentes estudios con la finalidad de tener claras las características de este tipo de material hasta llegar a la actualidad, donde más que realizar pruebas para conocer las características del acero utilizado, se realizan pruebas de control

de calidad para que este cumpla las cuantificaciones establecidas.

El dato más importante que se necesita en el diseño con refuerzo de acero es el de la fluencia del acero, es por esto que se le realizaron pruebas a tensión a distintas varillas para comprobar que el acero cumple con los requerimientos establecidos.

Dichas pruebas se realizaron en el Instituto Tecnológico de Costa Rica, propiamente en el Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO) de la Escuela de Ingeniería en Construcción. Para dicho ensayo se utilizó la máquina universal de dicho laboratorio, la cual tiene una capacidad de 20 toneladas.



Figura 9. Máquina Universal de Ensayos utilizada para las pruebas a tensión.

Para ejecutar la prueba se muestrearon distintas varillas de acero, tanto de un cuarto de pulgada (#2) como de tres octavos de pulgada (#3). Cada tipo de varilla se probó a tensión con 3 probetas de la misma muestra, cada una con una longitud de 30 cm.



Figura 10. Probetas de acero sometidas a ensayos de tensión.

En el ensayo a tensión de las varillas de acero, se debe anclar la probeta de acero 5 cm de cada lado. Dicho amarre se hace en mordazas propias de la máquina universal, lo que da como resultado una longitud libre de ensayo de 20 cm. Como resultado de este procedimiento se logra que la falla de la varilla se dé en la longitud libre, lo que facilita la determinación del esfuerzo de falla. Todo este procedimiento se realiza tomando como referencia la norma ASTM A-370 (Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products).



Figura 11. Probeta de acero anclada a mordaza para ensayo a tensión.

Una vez establecida la capacidad de distintas varillas de acero mediante el ensayo a tensión se debe establecer la capacidad del

bambú para soportar un esfuerzo a tensión paralelo a las fibras de la caña.



Figura 12. Probetas de bambú probadas mediante el ensayo a tensión.

Ensayos en bambú

Como se mencionó anteriormente, con el propósito de establecer una posible comparación entre el acero (varillas de construcción) y el bambú, se debe fijar la capacidad máxima a tensión de las probetas de bambú que se van a utilizar como posible refuerzo en elementos de concreto. Para esto se ejecutan estudios en los cuales probetas de bambú de 30 cm son ensayadas utilizando los mismos parámetros que se usaron para las pruebas que se realizaron en acero.

Una característica propia del bambú es que este tiene claramente definidas dos partes en la planta. Estas son la caña con nudo y la caña sin nudo. Es por este motivo que se deben establecer las propiedades a tensión de ambas secciones de la planta, ya que en un posible diseño se debe tener claras todas las características del material que puedan influir en la capacidad final del elemento.

Por este motivo las probetas de 30 cm son de 2 tipos. El primer tipo de espécimen que se elaboró es de 30 cm con el nudo propio de la caña en el medio de la muestra. El otro tipo de probeta fabricada es también de 30 cm, con la salvedad de que la muestra se tomó entre los nudos de la lata o tablilla extraída de la caña de bambú, con lo cual estas probetas no cuentan

con dicha discontinuidad. Se tiene así homogeneidad en la muestra.



Figura 13. Probetas de bambú preparadas para el ensayo a tensión.

Las muestras preparadas para determinar el esfuerzo máximo a tracción que puede soportar el bambú se ensayaron en la Máquina Universal siguiendo las mismas medidas de las pruebas anteriores. Entre estos parámetros están la longitud libre de la probeta y el anclaje en la mordaza.

Además para corroborar la validez de los datos obtenidos en los primeros ensayos, se realizan pruebas del mismo tipo (tracción en probetas de bambú) con el mismo tipo de probeta en la máquina Versa del CECO (Centro Experimental de la Construcción).



Figura 14. Máquina Versa utilizada para ensayos a tensión en bambú.

Como parte de la corroboración de los resultados, también se elaboraron probetas a las cuales se les realizó una reducción en la sección de la muestra. Para confeccionar la reducción en la sección se tomó como referencia la norma "Bamboo- Determination of physical and mechanical properties" (ver anexo 1). En dichos especímenes se siguió el principio de dejar el nudo de la caña en la parte central y también hacer probetas sin presencia de nudo en toda la longitud de la muestra.



Figura 15. Probetas de bambú con reducción en la sección.

Otro aspecto que se tomó en cuenta para verificar la veracidad de los datos obtenidos en las pruebas iniciales, fue la colocación de un deformímetro externo a la máquina en la probeta. Dicho deformímetro mide la deformación en los 13 cm centrales de la probeta, por lo cual no se toman lecturas que puedan ser generadas por deformaciones internas en la mordaza debido al aplastamiento que estas generan en la caña.



Figura 16. Probeta de bambú con deformímetro en la parte central.

Una vez determinada la capacidad máxima del bambú cuando es sometido a un esfuerzo de tensión, se debe establecer la facultad que tiene el bambú para funcionar en conjunto con el concreto como material de construcción. Es por esto que se necesita determinar la adherencia que se genera entre ambos materiales al interactuar en un mismo elemento que será sometido a distintas condiciones de carga.

Adherencia bambú-concreto

El estudio realizado para analizar la adherencia entre ambos materiales consiste en elaborar cilindros de concreto de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. El diseño de mezcla del concreto de dichos cilindros se elaboró por la empresa Holcim. Dicha mezcla se hizo para obtener una resistencia a los 28 días igual a 280 kg/cm^2 ($f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$).

Utilizando el mismo tipo de diseño de mezcla se busca eliminar la variable de la resistencia del concreto. De esta manera las únicas variables que afectarán los resultados son el tipo de probeta, el empotramiento de la misma y la edad de falla.

Las probetas de estudio, es decir los cilindros de concreto, van a tener probetas de bambú de diferente sección. Estas secciones son 3, y son $0,9 \text{ cm} \times 0,9 \text{ cm}$, $1,9 \text{ cm} \times 0,7 \text{ cm}$ y $2,5 \text{ cm} \times 0,6 \text{ cm}$. Estas dimensiones son nominales y las mismas son propuestas tanto por la empresa XILO como por Holcim y han sido utilizadas para la elaboración de mallas en baldosas.



Figura 17. Probetas de bambú utilizadas en la prueba de adherencia entre el bambú y el concreto.

Además, como parte del estudio de la adherencia entre ambos materiales, también se elaboran probetas de bambú cuya sección es de $2,5 \text{ cm} \times 0,6 \text{ cm}$ con canales longitudinales. El propósito de dicha modificación en estas probetas es determinar si existe algún incremento en la adherencia entre la probeta de bambú y el espécimen de concreto.

Estas estrías o canales son elaborados longitudinalmente para que de esta manera se conserve la integridad de la fibra del bambú que es la que aporta la resistencia de este material cuando se somete a esfuerzos de tracción.



Figura 18. Probetas de bambú con canales.

Los mismos cilindros van a tener las probetas de bambú en su interior a diferentes longitudes de empotramiento (10, 20 y 30 centímetros). Cabe mencionar que la parte expuesta de bambú en estas probetas cuenta con el nudo que se presenta en la caña, para así de esta manera comparar la carga de extracción con el esfuerzo que se da en la caña.

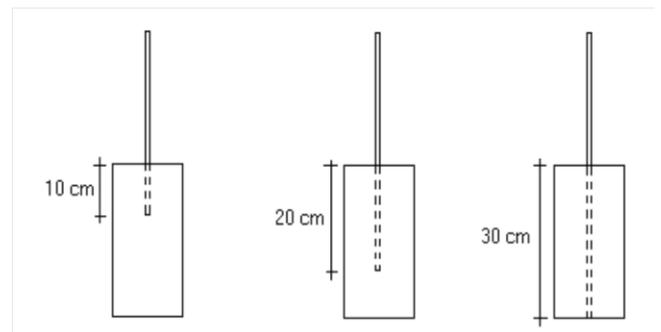


Figura 19. Probetas para determinar la adherencia entre el bambú y el concreto.

Estos especímenes se someterán a una carga de extracción, la cual se aplicará a la

probeta de bambú que se encuentra expuesta. Las pruebas se realizarán a distintas edades de la mezcla de concreto (4, 7 y 28 días), y así de esta manera valorar si existe una posible relación entre la edad del concreto, la dimensión de la sección y la longitud de empotramiento de la caña en el núcleo.



Figura 20. Probetas para la prueba de adherencia entre el bambú y el concreto recién elaboradas.

Además, es importante asegurar que el concreto en el cual se colocó la caña de bambú cuente con un adecuado curado, para que de esta manera, internamente la interacción sea entre concreto endurecido y la muestra de bambú. El método utilizado para asegurar que el curado sea el óptimo es sumergiendo la probeta en agua, asegurándose de que la parte expuesta de bambú no entre en contacto con el líquido y de esta manera no se comprometa la calidad del mismo.



Figura 21. Método de curado para las probetas de adherencia entre el bambú y el concreto.

Una vez que se asegura que las probetas han recibido el adecuado proceso de curado del concreto y este ha cumplido la edad establecida

para la falla, estas probetas se ensayan en la máquina Versa del CECO.

Este ensayo se hace colocando el cilindro sobre un marco de acero, dejando expuesta la probeta de bambú para que esta se ancle a la mordaza del equipo y se le aplique una carga hasta que la pieza de bambú se extraiga del concreto.



Figura 22. Ensayo de adherencia entre el bambú y el concreto.

El mismo procedimiento se siguió para todas los especímenes elaborados para esta prueba, incluyendo las probetas que usaron bambú con canales, con la salvedad que estas probetas se ensayaron a 7 y 28 días.



Figura 23. Probeta de adherencia fallada.

Flexión en concreto reforzado

Esta prueba se realizará en vigas de concreto empleando como referencia la norma ASTM C-78, elaboradas en el laboratorio Cetec de Holcim. En dichas vigas se estará utilizando acero y bambú como refuerzo. En este caso se aplicarán 2 cargas P cada una a un tercio de la longitud, medido desde el extremo de la viga, la cual se encuentra simplemente apoyada.

Estas vigas tienen una sección cuadrada de 6" (15,24 cm) y una longitud de 24" (60,96 cm) y la mezcla de concreto utilizada será suministrada por Holcim, usando el mismo diseño de mezcla que se utilizó para las pruebas de adherencia ($f'_c = 280 \text{ kg/cm}^2$).

El concreto utilizado tiene la particularidad de ser autocompactante, esto con el objetivo de que en el elemento no se presenten los llamados hormigueros y que el refuerzo esté completamente rodeado de concreto, por lo que la interacción entre ambos materiales se dé a lo largo del refuerzo.

Como se mencionó, estos elementos de concreto se reforzarán tanto con bambú como con acero, ambos refuerzos se utilizarán en diferentes cantidades, para así poder comparar los diferentes resultados obtenidos al ensayar dichos elementos.

Para las vigas reforzadas con acero, se utilizan varillas #3. De este tipo de vigas se realizan 4 elementos, 2 elementos con 1 varilla y 2 con 2 varillas.



Figura 24. Vigas de concreto reforzadas con acero (varilla #3).

El refuerzo colocado es longitudinal y se ubica en la sección de la viga sometida a esfuerzos de tensión cuando se somete a flexión.



Figura 25. Vigas de concreto reforzadas con bambú.

En ambos casos es necesario asegurar que el refuerzo cuente con el mismo recubrimiento y también que las barras de refuerzo se mantengan en el lugar que se ubicaron antes de colocar el concreto en el molde. Por esta razón, en los extremos del refuerzo se decide ubicar los llamados "helados".

Estos dispositivos proporcionan un recubrimiento de 2,54 cm (1 pulgada); además, los "helados" disponen de alambre anclado a su interior, esto para asegurar el refuerzo y que este no se desplace.



Figura 26. Vigas de concreto reforzadas con bambú.

Estos elementos son desmoldados 24 horas después de haber sido elaborados e inmediatamente son sumergidos en agua para que el concreto se cure. Estas vigas se sacan del curado hasta el día de la falla, es decir, 7 días después de confeccionar los elementos, e inmediatamente se colocan en la máquina para realizar el ensayo.



Figura 27. Curado de las vigas de concreto.

La falla de las vigas se realiza en Holcim, más específicamente en el CETEC, el cual es el mismo laboratorio donde se fabricaron las vigas. La máquina en la cual se ensayan las vigas tiene una capacidad de 200 kN, es decir, cerca 20,4 toneladas. Para la prueba se obtendrá la carga en la cual se da el incremento en la grieta desarrollada en el concreto y también la carga máxima que soporta la viga antes de fallar.



Figura 28. Ensayo de flexión en vigas reforzadas.

Resultados

De acuerdo con la metodología establecida para los distintos ensayos realizados, utilizando los materiales mencionados para el desarrollo del estudio de la caracterización del bambú y comparación con el acero, se presentan a continuación los resultados obtenidos.

Ensayos en acero

Para estas pruebas se utilizaron varillas #2 y #3, las cuales fueron muestreadas aleatoriamente tanto de depósitos de materiales como de construcciones ubicadas en el Valle Central. Se obtuvieron muestras de varillas de diferentes fabricantes, esto se puede asegurar debido a la simbología que traen las barras.



Figura 29. Varilla #3 muestreada para ensayo a tensión en acero.

En la figura anterior se logra apreciar cómo las varillas (a partir de la #3) deben contar con ciertas especificaciones, como lo son la identificación del fabricante, el diámetro de la misma, la norma ASTM que debe cumplir, la cual se denomina con la letra S para la norma ASTM A-615 y con la letra W para la norma ASTM A-706. La diferencia entre ambos tipos de normas radica en que los elementos que cumplen con la norma A-706 permiten ser soldados entre sí, con lo cual se reducen empalmes y por lo tanto la cantidad de acero a utilizar en el elemento. Por último las varillas deben contar con la simbología que indique el país de origen.

Para barras #2 es difícil lograr establecer estas características de la varilla, sin embargo se logró encontrar una varilla que sí contaba con el sello del fabricante.



Figura 30. Varilla #2 muestreada con el sello del fabricante.

Para las varillas #2 se probaron 3 tipos de varillas, donde la variación se encuentra en el fabricante. Para las varillas #3 se probaron muestras de 2 fabricantes distintos, esto porque la mayoría de las varillas encontradas correspondían al mismo productor. Con ello, se generaron los siguientes resultados:

CUADRO 1. RESULTADOS DE LAS FALLAS DE VARILLA #2			
Muestra	Fy (kg/cm²)	Fy (ksi)	Grado
D-2-1	6320	89,7	75
D-2-2	5090	72,2	60
D-2-3	6490	92,1	75
AM-2-1	7130	101,2	75
AM-2-2	6914	98,1	75
AM-2-3	6490	92,1	75
MY0-2-1	5150	73,1	60
MY0-2-2	5090	72,2	60
MY0-2-3	5040	71,5	60

Para el cuadro anterior se usó el siguiente código para identificar las muestras:

Primero se coloca la simbología del fabricante, en este caso D para desconocido, AM para ArcelorMittal y MY0 para MAYACERO. Luego el número de la varilla, es decir #2, y por último el número de la probeta.

En el cuadro anterior también se presenta la fluencia del acero y el grado de la varilla para las muestras ensayadas. Dichos datos se generan por el software de la máquina Universal de ensayos, los mismos se adjuntan en el apéndice 1.

En el caso de las muestras de las varillas #3 se utilizó la misma simbología para la identificación de muestras. En las construcciones visitadas se encontraron varillas de fabricantes como ArcelorMittal (AM) y varillas Chinas (C). Los resultados de los ensayos en las varillas #3 se presentan en el siguiente cuadro.

CUADRO 2. RESULTADOS DE LAS FALLAS DE VARILLA #3			
Muestra	Fy (kg/cm²)	Fy (ksi)	Grado
AM-3-1	3480	49,4	40
AM-3-2	2970	42,2	40
AM-3-3	3110	44,1	40
C-3-1	2990	42,4	40
C-3-2	3209	45,5	40
C-3-3	3110	44,1	40

Caracterización del bambú

Para la utilización de cualquier material como refuerzo en concreto es necesario conocer las características que afecten el diseño estructural del elemento reforzado.

El bambú utilizado en los ensayos realizados para este estudio fue suministrado por la empresa XILO Químicas, y para este estudio no se tuvo control sobre la siembra, el crecimiento, el corte ni sobre la preparación del bambú. Este material cuenta con 4 tratamientos aplicados por dicha empresa. Estos tratamientos son el secado, estabilización dimensional, estabilización de la humedad y mineralización (proceso que homogeniza la adherencia entre el bambú y el concreto a lo largo de la tablilla). En el proceso de producción de las probetas y en la aplicación de estos tratamientos tampoco se tuvo control, por lo cual, se parte de que, para la ejecución de los ensayos, el bambú ya fue tratado.

Anteriormente, se mencionó que el bambú que va a ser utilizado en este estudio cuenta con 2 partes claramente definidas en la planta. Estas partes son el nudo de la caña y la caña sin nudo, que está conformada por las fibras de la planta las cuales son las que brindan la resistencia a la tensión.



Figura 31. Imagen interna de la planta de bambú.

Es debido a esta diferencia que se necesita realizar el estudio de ambas partes de la planta para saber cómo afecta en el diseño estructural la utilización de dicho material

heterogéneo. Esto es necesario ya que por el momento el nudo de la caña no se puede eliminar de las probetas y así utilizar únicamente las fibras que aportan resistencia a la tensión.

Ensayo a tensión en bambú

Para establecer la capacidad del bambú para soportar esfuerzos a tensión se utilizó la máquina universal de ensayos del Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción.

Inicialmente se ensayaron 20 probetas en 2 grupos de 10 cada uno. Estas probetas tienen la parte de la caña que presenta el nudo justo en el medio de la misma para que de esta manera la probeta falle exactamente en esa zona, y de esta manera poder determinar las características de esa sección de la muestra.

Luego, para caracterizar todos los componentes del bambú, se fallaron 10 probetas que únicamente presentan fibras, es decir tienen la ausencia del nudo, y de esta manera poder tener claro la capacidad de ambos componentes de la planta.

Capacidad del nudo de la caña de bambú

De los ensayos realizados en la máquina Universal del CIVCO a las probetas de este tipo, se generaron los datos que se presentan a continuación en el siguiente cuadro.

CUADRO 3. RESULTADOS DE FALLA A TENSIÓN EN PROBETAS DE BAMBÚ CON NUDO					
Probeta	Longitud libre (cm)	Área (cm ²)	Pu (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Módulo de elasticidad (kg/cm ²)
1	18,800	1,745	1746,000	1000,500	17460,000
2	18,800	1,750	1756,000	1003,400	14878,900
3	18,300	1,281	988,000	771,500	9974,900
4	17,900	1,348	1238,000	918,000	13274,300
5	18,400	1,318	1038,000	787,300	11135,600
6*	25,000	1,274	1263,000	991,500	20268,500
7	18,100	1,892	1482,000	822,600	10919,900
8	18,900	1,438	1104,000	767,600	12397,300
9	17,900	1,335	1295,000	970,300	14267,900
10**	-	-	-	-	-

En el cuadro anterior se aprecia que para la probeta 6 se probó una mayor longitud para observar si existe alguna variación entre el esfuerzo de ruptura y la esbeltez de las probetas. En dicha prueba no se observó mayor variación. En el mismo cuadro también podemos ver cómo en la probeta 10 no se obtuvieron resultados, esto porque hubo un error de ejecución del ensayo con el equipo.

La anterior matriz de datos se obtuvo de los gráficos generados por el sistema de la máquina universal de ensayos

Para verificar la validez de estos resultados, se realizó una nueva prueba en la cual se probaron otras 10 probetas. Estas, al igual que las anteriores contaban con el nudo propio de la caña en el medio de la longitud de la misma.

A diferencia de la prueba anterior, este nuevo ensayo se ejecutó en la máquina Versa. Esta máquina brinda la lectura de carga que soporta la celda interna de la misma.

Para medir la deformación que presenta la probeta durante el ensayo, se colocó un deformímetro en las mordazas de la máquina para de esta manera poder determinar el módulo elástico del bambú.

Los resultados de la prueba anterior se muestran en el siguiente cuadro.

CUADRO 4. RESULTADOS DE FALLA A TENSIÓN EN PROBETAS DE BAMBÚ CON NUDO					
Probeta	Longitud libre (cm)	Área (cm ²)	Pu (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Módulo de elasticidad (kg/cm ²)
11	20,000	1,515	1350,000	890,993	11490,000
12	20,000	1,884	800,000	424,649	7962,600
13	19,700	1,861	1100,000	590,937	9092,200
14	20,000	1,887	800,000	423,974	7806,500
15	20,000	1,843	1025,000	556,035	8024,500
16	20,000	1,868	1050,000	562,043	9415,800
17	20,000	1,882	1050,000	557,904	7403,600
18	20,000	1,819	1775,000	975,975	13457,000
19	20,000	1,858	2025,000	1089,667	14840,000
20	20,000	1497	1000,000	668,140	12253,000

Para generar estos datos se tomaron lecturas de deformación a cada 50 kg de carga registrados por la celda de la máquina Versa. Luego se determinó el esfuerzo y la deformación unitaria para cada lectura. Por ejemplo para la probeta 11 tenemos la siguiente secuencia de datos:

A partir de esta serie de lecturas es que se logra generar los gráficos para cada probeta con nudo. Para estos gráficos se procesaron las lecturas de carga y deformación para transformarlas en esfuerzo y deformación. De esta manera se logra generar un gráfico a partir de la siguiente tabla:

CUADRO 5. LECTURAS TOMADAS EN FALLA A TENSIÓN DE BAMBÚ PARA LA PROBETA 11		
Punto	Carga(kg)	Deformación (mm)
1	50,000	0,203
2	100,000	0,495
3	150,000	1,041
4	200,000	1,549
5	250,000	2,299
6	300,000	3,391
7	350,000	4,394
8	400,000	5,309
9	450,000	6,121
10	500,000	6,795
11	550,000	7,391
12	600,000	7,976
13	650,000	8,509
14	700,000	8,992
15	750,000	9,462
16	800,000	9,881
17	850,000	10,312
18	900,000	10,744
19	950,000	11,138
20	1000,000	11,532
21	1050,000	11,925
22	1100,000	12,294
23	1150,000	12,675
24	1200,000	13,056
25	1250,000	13,462
26	1300,000	13,792
27	1325,000	13,983

CUADRO 6. DATOS DE ESFUERZO VS DEFORMACIÓN PARA LA PROBETA 11		
Punto	Esfuerzo (kg/cm ²)	ϵ (mm/mm)
1	32,999	0,001
2	65,998	0,002
3	98,997	0,005
4	131,996	0,008
5	164,995	0,011
6	197,994	0,017
7	230,993	0,022
8	263,992	0,027
9	296,990	0,031
10	329,989	0,034
11	362,988	0,037
12	395,987	0,040
13	428,986	0,043
14	461,985	0,045
15	494,984	0,047
16	527,983	0,049
17	560,982	0,052
18	593,981	0,054
19	626,980	0,056
20	659,979	0,058
21	692,978	0,060
22	725,977	0,061
23	758,976	0,063
24	791,975	0,065
25	824,974	0,067
26	857,973	0,069
27	874,472	0,070

Para formar estos datos de las 10 probetas restantes que fueron ensayadas en la máquina Versa, también se utilizaron probetas de 30 cm con el nudo de la caña en el medio de la misma.

Todas estas probetas se empotran 5 cm en la mordaza, y se deja así una longitud libre de 20 cm.

El gráfico de esfuerzo vs deformación que se obtiene para la probeta 11 (con nudo) a partir de los datos del cuadro 6 es el siguiente:



Figura 32. Probetas de bambú con nudo ensayadas en la máquina Versa.

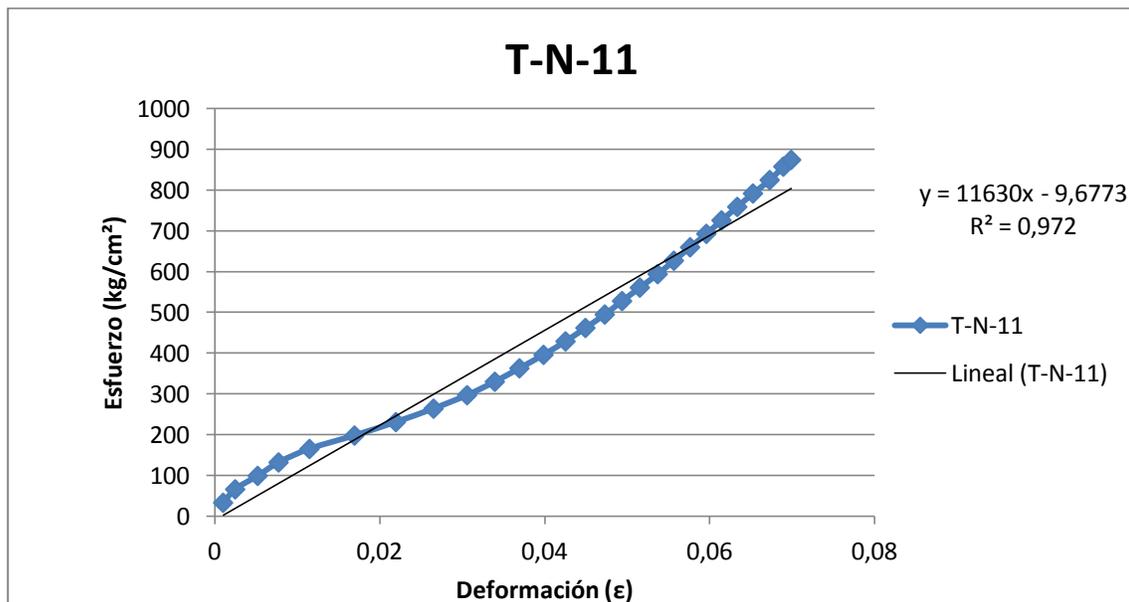


Figura 33. Gráfico Esfuerzo vs Deformación para probetas de bambú con nudo.

En el gráfico anterior, además de los datos de esfuerzo vs deformación, se muestra la ecuación de la recta de mejor ajuste, en la cual se presenta la pendiente de la misma. Dicha

pendiente también corresponde al módulo elástico de esta parte del bambú (nudo), tomando las lecturas de deformación con un deformímetro colocado en las mordazas.

En el cuadro 4, el módulo elástico para el bambú se estableció al determinar la pendiente a partir de los datos de 20% y 80% de la carga máxima con su respectiva deformación unitaria. Para la probeta 11, dicho módulo de elasticidad es de 11490,00 kg/cm² el cual es similar al módulo que se genera del gráfico (11630.00 kg/cm²).

Todos los datos de esfuerzo y deformación que se obtuvieron de las probetas corresponden a la parte con nudo, ya que la falla que se presentó así lo demuestra, pues la misma se dio justamente en la mitad de la muestra ensayada que es exactamente donde se ubica el nudo de la caña.



Figura 34. Probetas de bambú con nudo ensayadas a tensión.

Una vez establecida la capacidad del nudo de la caña para soportar esfuerzos generados por cargas de tracción, se debe establecer la misma característica para las fibras del bambú, es decir la parte de la caña que no cuenta con nudo.

Capacidad de las probetas sin nudo

Es claro que la parte de las fibras es homogénea, por lo cual se debe asegurar que la falla se dé en la longitud libre entre las mordazas donde se ancla la probeta de bambú. Es por esto que para establecer la capacidad a tensión de las fibras se usaron las probetas con sección

reducida, dejando una longitud libre de probeta (Lo) de cerca de 13cm.

Como en estas probetas hay una discontinuidad en la sección, la deformación no se puede calcular de la misma forma que en las probetas anteriores y debe ser medida en el tramo de menor área. Debido a esto se coloca un deformímetro en ese espacio, el cual se encuentra anclado a la probeta y así, de esta manera, calcular solamente la deformación en este tramo.

Estos ensayos, al igual que los anteriores, se ejecutaron en la máquina Versa del CECO, por lo cual se están siguiendo los mismos parámetros para la ejecución del mismo, con la salvedad de que, al haber una reducción en la sección, la toma de lecturas de deformación se hace cada 25 kg de carga.

Los resultados de dichas pruebas se presentan a continuación en el cuadro 7.

CUADRO 7. RESULTADOS DE FALLA A TENSIÓN EN PROBETAS DE BAMBÚ SIN NUDO					
Probeta	Longitud libre (cm)	Área (cm ²)	Pu (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Módulo de elasticidad (kg/cm ²)
1	12,780	0,617	910,000	1474,878	657062,000
2	12,850	0,649	900,000	1386,749	151444,000
3	12,760	0,648	1025,000	1581,790	192399,000
4	12,750	0,652	950,000	1457,055	985953,000
5	12,800	0,620	1055,000	1701,613	377823,000
6	12,680	0,629	900,000	1430,843	169733,000
7	12,710	0,626	750,000	1198,083	247702,000
8	12,760	0,657	1030,000	1567,732	517767,000

Al igual que en los ensayos realizados a la parte del nudo de la planta, se generaron gráficos de donde se obtuvieron los resultados de estas probetas (cuadro 7).

Por ejemplo, para la probeta con nudo 2 tenemos el siguiente gráfico, el cual muestra el comportamiento del ensayo al que fue sometida dicha muestra.

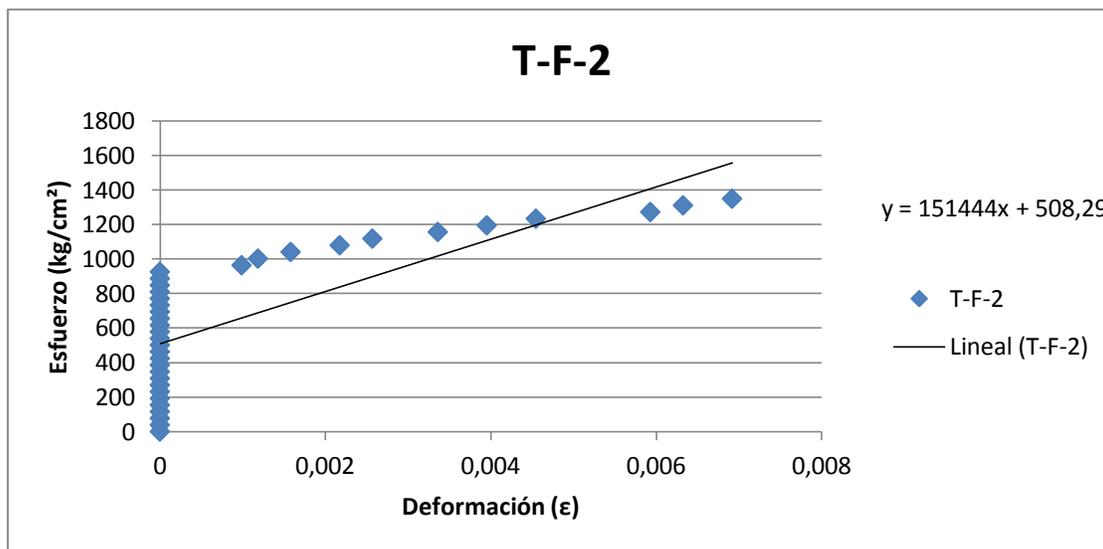


Figura 35. Gráfico Esfuerzo vs Deformación para probetas de bambú sin nudo.

En el gráfico anterior se muestra la ecuación de mejor ajuste, la cual a su vez nos indica el módulo elástico según esta ecuación.

Este gráfico, como se mencionó anteriormente, se genera al medir las deformaciones que presenta la probeta cada 25

kilogramos de carga. Luego, los datos obtenidos se relacionan con el área y la longitud de la probeta para así poder obtener una matriz de datos como la siguiente, que nos permite generar los gráficos para las distintas probetas.

CUADRO 8. DATOS OBTENIDOS PARA EL ENSAYO A TENSIÓN DE LA PROBETA 2 SIN NUDO

Punto	Carga(kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Deformación (mm)	ϵ (mm/mm)
1	25,000	38,550	0,000	0,000
2	50,000	77,100	0,000	0,000
3	75,000	115,650	0,000	0,000
4	100,000	154,200	0,000	0,000
5	125,000	192,750	0,000	0,000
6	150,000	231,299	0,000	0,000
7	175,000	269,849	0,000	0,000
8	200,000	308,399	0,000	0,000
9	225,000	346,949	0,000	0,000
10	250,000	385,499	0,000	0,000
11	275,000	424,049	0,000	0,000
12	300,000	462,599	0,000	0,000
13	325,000	501,149	0,000	0,000
14	350,000	539,699	0,000	0,000
15	375,000	578,249	0,000	0,000
16	400,000	616,799	0,000	0,000
17	425,000	655,348	0,000	0,000
18	450,000	693,898	0,000	0,000
19	475,000	732,448	0,000	0,000
20	500,000	770,998	0,000	0,000
21	525,000	809,548	0,000	0,000
22	550,000	848,098	0,000	0,000
23	575,000	886,648	0,000	0,000
24	600,000	925,198	0,000	0,000
25	625,000	963,748	0,013	0,001
26	650,000	1002,298	0,015	0,001
27	675,000	1040,847	0,020	0,002
28	700,000	1079,397	0,028	0,002
29	725,000	1117,947	0,033	0,003
30	750,000	1156,497	0,043	0,003
31	775,000	1195,047	0,051	0,004
32	800,000	1233,597	0,058	0,005
33	825,000	1272,147	0,076	0,006
34	850,000	1310,697	0,081	0,006
35	875,000	1349,247	0,089	0,007

Al observar los resultados del módulo elástico obtenidos en el cuadro 7 para las fibras de bambú y el módulo elástico del nudo de la caña (cuadro 3 y 4), se observa una gran diferencia entre los datos. Para corroborar la validez de este parámetro, se decide que se deben realizar fallas en probetas de bambú de sección reducida y con nudo, colocando el deformímetro en la misma posición que en las probetas sin nudo.

Confirmación del módulo elástico del bambú

Durante los distintos ensayos a tracción que se le ejecutaron a las distintas probetas de bambú, tanto en la máquina universal de ensayos como en la máquina Versa, se establecieron procedimientos para calcular el módulo elástico del bambú en la parte de la caña que tiene nudo.

Estos procedimientos fueron el cálculo de la pendiente de los gráficos generados por la máquina universal, o bien la toma de lecturas de deformación con un deformímetro externo colocado en las mordazas en el caso de la máquina Versa. Sin embargo, ambos procedimientos no miden la deformación directamente en la probeta, por lo cual podrían verse afectados por lecturas que inducen a un error en el dato del módulo elástico.

Debido a esto, se decidió implementar el procedimiento usado en las probetas sin nudo para el cálculo de dicha característica en este material. Este procedimiento, como ya se sabe, consiste en colocar un deformímetro en la probeta de bambú, exactamente entre las mordazas que aplican la carga a tracción.

Para este procedimiento, al igual que para las probetas sin nudo, se utilizaron muestras de bambú con nudo, a las cuales se les realizó una reducción en la sección, justamente en la parte en la que se está midiendo deformación y en la misma se encuentra presente el nudo. Esta reducción y la presencia del nudo en la misma garantizan que la falla se dé en ese punto.

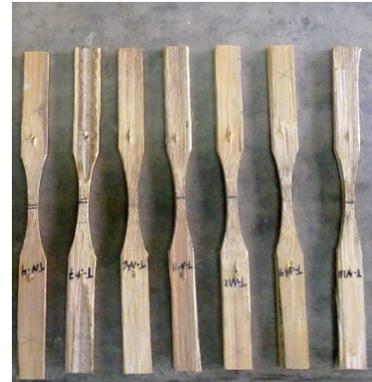


Figura 36. Muestras de bambú de sección reducida y con presencia de nudo.

Además, con la ejecución de esta prueba, también se están generando datos que corroborarán la capacidad del material en estudio cuando es sometido a esfuerzos de tracción.

Para este análisis de verificación se prepararon 8 probetas, a las cuales se les logró determinar la capacidad máxima a tensión y el módulo elástico. Dichos resultados se presentan a continuación en el cuadro 9.



Figura 37. Ensayo en bambú para corroborar la medición del módulo elástico.

CUADRO 9. RESULTADOS DEL ENSAYO A TENSIÓN EN PROBETAS CON NUDO Y SECCIÓN REDUCIDA					
Probeta	Longitud libre (cm)	Área (cm ²)	Pu (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Módulo de elasticidad (kg/cm ²)
1	13,000	0,672	365,000	543,155	126891,142
2	12,830	0,669	365,000	545,590	150984,766
3	12,780	0,645	510,000	790,698	224840,772
4	12,740	0,652	615,000	943,252	629493,333
5	12,840	0,590	350,000	593,220	151660,580
6	12,750	0,629	520,000	826,709	218945,917
7	12,770	0,629	575,000	914,149	107301,857
8	12,800	0,657	320,000	487,062	255696,700

Al igual que para las probetas anteriores, estos datos se generan al tomar lecturas de deformación cada 25 kilogramos de carga. Es a

partir de estas lecturas que se puede generar un gráfico como el siguiente.

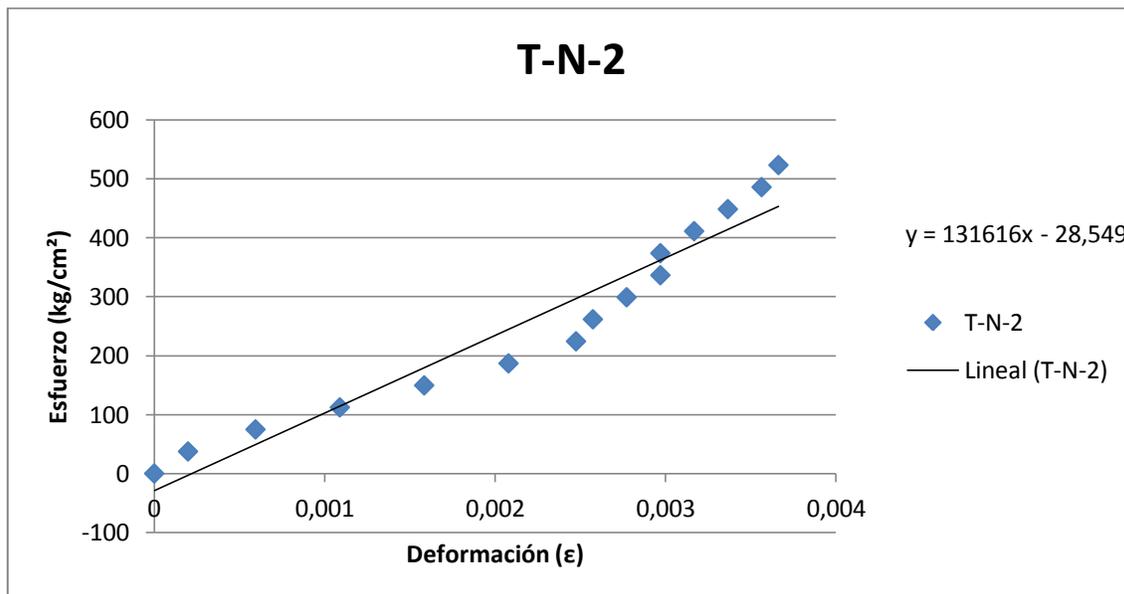


Figura 38. Gráfico Esfuerzo vs Deformación para probetas de bambú con nudo y sección reducida.

En dicho gráfico se presenta la ecuación de mejor ajuste, donde la pendiente corresponde al módulo elástico. El módulo elástico que se presenta en el cuadro 9 (150984,766 kg/cm² para la probeta 2) se obtiene al determinar la pendiente al 20% y al 80% de la carga máxima.

Con estos resultados se completa el análisis de los componentes de la planta de bambú, los mismos también forman parte de las probetas que se utilizan como refuerzo en concreto.

A estas probetas además se les realizó el estudio para determinar su comportamiento al

trabajar en conjunto con el concreto. La primera investigación realizada fue la adherencia entre estos materiales, ya que cualquier material que se utilice en conjunto con el concreto debe cumplir los supuestos del concreto reforzado, y entre estos supuestos está la adherencia perfecta entre los dos materiales.

Resultados de adherencia bambú-concreto

La forma del de acero ha evolucionado desde el inicio de su uso como refuerzo. Al principio estos elementos fueron de superficie lisa, luego las mismas se trenzaron para lograr aumentar la adherencia entre ambos materiales. En la actualidad el acero de refuerzo cuenta con discontinuidades o estrías que aumentan la adherencia mecánica entre ambos materiales.

En las pruebas de adherencia entre bambú y concreto, se usan 3 probetas de bambú que presentan una superficie lisa. De este tipo se tienen 3 probetas de diferente sección que fueron sometidas a este ensayo según lo establecido en la metodología. Los resultados de dichos ensayos se presentan en la siguiente tabla.

CUADRO 10. CARGA DE EXTRACCIÓN PARA PROBETAS A 4 DÍAS			
Tipo de probeta	Empotramiento (cm)		
	10	20	30
Carga(kg)			
T1	145	350	590
	400	640	455
T2	525	1080	1260
	680	1155	1250
T3	120	255	470
	180	265	410

Los resultados mostrados en la anterior tabla corresponden a la prueba realizada a 4 días. Para estas pruebas la nomenclatura utilizada para estas probetas es T1 para las probetas de 0,9cm x 0,9cm, T2 para las probetas de 1,9cm x 0,7cm y para las probetas de 2,5 cm x 0,6 cm la designación usada es T3.



Figura 39. Bambú extraído del cilindro de concreto.

El mismo ensayo fue ejecutado para los 7 días de edad en el concreto. Los resultados se presentan en la siguiente tabla.

CUADRO 11. CARGA DE EXTRACCIÓN PARA PROBETAS A 7 DÍAS			
Tipo de probeta	Empotramiento (cm)		
	10	20	30
Carga(kg)			
T1	105	320	660
	180	450	575
T2	510	1115	950
	375	1085	1135
T3	175	240	465
	110	270	545

Para la tabla anterior se utilizó la misma designación que en las probetas ensayadas a cuatro días. Al igual que para las 2 tablas anteriores, para las probetas ensayadas a 28 días se utilizó el mismo procedimiento de falla con el mismo tipo de muestra de bambú, y generó los siguientes resultados.

CUADRO 12. CARGA DE EXTRACCIÓN PARA PROBETAS A 28 DÍAS			
Tipo de probeta	Empotramiento (cm)		
	10	20	30
Carga (kg)			
T1	160	550	520
	370	335	455
T2	530	1180	1150
	665	705	1355
T3	255	415	530
	420	340	420

Para completar el estudio sobre la adherencia entre los materiales analizados, también se consideró realizar el mismo tipo de probetas, con la diferencia de que a las muestras de bambú se les realizaron canales longitudinales. Estas probetas utilizaron el mismo diseño de mezcla que las anteriores, con lo cual se elimina en parte la variable del tipo de concreto. Se deja así que el único aporte que se dé a la resistencia a la extracción sea dado únicamente por las estrías.

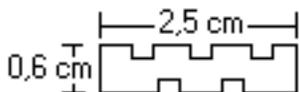


Figura 40. Sección de la probeta de bambú con canales.

Los resultados de las pruebas realizadas en este tipo de probeta se muestran en el cuadro 13. En estas pruebas, la modificación se le realizó únicamente a la T3 (2,5 cm x 0,6 cm), ya que para las demás probetas no se continuó su producción por parte de los encargados de las mismas, por lo que a esta probeta se le denomina T4.

CUADRO 13. CARGA DE EXTRACCIÓN PARA PROBETAS A T4			
Edad de falla	Empotramiento (cm)		
	10	20	30
Carga (kg)			
7 días	770	1305	1450
	940	1415	1780
28 días	1320	1530	1675*
	935	1485*	1550*

En este cuadro se muestran las fallas tanto a 7 como a 28 días de las probetas T4. Para realizar y fallar las mismas se siguieron los mismos parámetros que para las probetas anteriores. Cabe mencionar que se obtuvieron 3 fallas por rotura de la probeta (datos señalados *)

Con estos datos se puede realizar un análisis acerca de cómo se relaciona el tipo de probeta, la longitud de empotramiento en el concreto y la resistencia de este, es por esto que se muestrearon cilindros de concreto para verificar la resistencia de este.

CUADRO 14. RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO UTILIZADO EN PRUEBAS CON BAMBÚ		
Cilindro	Edad de falla	Esfuerzo (kg/cm ²)
PG-1	4 días	316
PG-2		338
PG-3		342
PG-4		300
PG-5	7 días	346
PG-6		365
PG-7		375
PG-8		318
PG-9	28 días	536
PG-10		529
PG-11		450
PG-12		503

Cabe recordar que el diseño de mezcla que se solicitó para esta y las demás pruebas fue de 280 kg/cm² a los 28 días.

Este diseño de mezcla se usó para todos los ensayos en los que se utilizó tanto acero, bambú y concreto. Es decir, esta mezcla es la misma en los ensayos de adherencia y en los ensayos de flexión en concreto de concreto reforzado

Pruebas en concreto reforzado

Este tipo de ensayos se elaboró en elementos de concreto reforzado tanto con bambú como con acero. Los mismos fueron sometidos a una carga a los tercios de su longitud, produciendo así que el elemento sea sometido a flexión.

El propósito de que este elemento sea expuesto a este tipo de cargas es que el mismo falle por flexión y no por otras fuerzas como la de cortante.

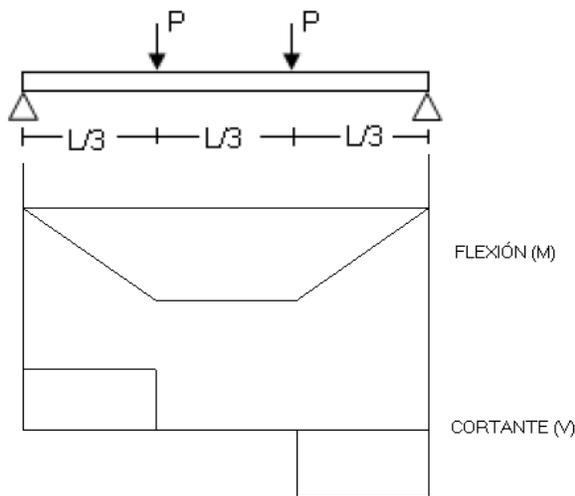


Figura 41. Fuerzas a las que es sometido el elemento de concreto.

En el diagrama anterior podemos apreciar cómo, al exponer un elemento de este tipo a esa configuración de cargas, el mismo en su parte central no va a estar sujeto a esfuerzos de cortante, solamente a flexión. Con esto se demuestra que la falla es por el momento al que

se somete el concreto. En la siguiente tabla se presentan los datos obtenidos para las pruebas realizadas en estos elementos.

CUADRO 15. RESULTADOS DE FALLA A FLEXIÓN EN VIGAS				
Elemento	Carga grieta (kg)	M grieta. (kg-m)	Carga falla (kg)	M Falla (kg-m)
V-1-A #3	N.R.	-	3772,50	565,88
	1987,00	298,05	3806,00	570,90
V-2-A #3	2074,00	311,10	5989,50	898,43
	2249,00	337,35	5940,00	891,00
V-1-B	1806,50	270,98	1806,50	270,98
	1843,00	276,45	2091,00	313,65
V-2-B	1740,00	261,00	2899,50	434,93
	1939,00	290,85	2314,50	347,18

Los datos anteriores fueron obtenidos por el operador del ensayo. Para la carga de rotura, se tomó el valor en el momento en el que la grieta se notó de manera visible y para la carga de falla se anotó el valor al cual la carga dejó de incrementar en el dispositivo de falla.

En este ensayo lo ideal es que se tomaran deformaciones además de la lectura de carga; sin embargo, por la máquina utilizada no se logró colocar el dispositivo de deformación en la viga, lo cual imposibilitó la toma de este dato.



Figura 42. Elemento fallado a flexión.

No obstante, estos datos logrados sirven de comparación entre los refuerzos utilizados.

Análisis de resultados

Ensayos a tracción

En este tipo de ensayo se probaron dos tipos de materiales, el acero y el bambú. El primero de ellos en ser probado fue el acero, esto para tener valores de comparación con los resultados obtenidos al aplicarle la misma prueba al bambú.

Varilla de acero

Con respecto a los datos obtenidos para la falla de las varillas #2 se observa que los datos generados y presentados en el cuadro 1 muestran que las varilla #2 llegan a estar entre el grado 70 y 100, con valores de f_y entre los 5000 y 7000 kg/cm². Estos valores se dan debido al origen de este acero y su fabricante. Además, estos datos se obtienen a partir de un software propio del equipo, esto puede ocasionar un valor poco preciso.

Las varillas #3 utilizadas en estos ensayos tienen un esfuerzo de fluencia de 2800 kg/cm² ($f_y = 2800$ kg/cm²), y como se aprecia en el cuadro 2 todos los resultados están por encima de este valor mínimo, con lo cual las varillas muestreadas cumplen con este parámetro de fluencia y del grado para este tipo de acero.

Probetas de bambú

Se determina que las probetas de bambú utilizadas están compuestas por dos partes claramente definidas, el nudo de la caña y la propia caña que está compuesta por las fibras de bambú.

En inicio, se le realizaron pruebas a las probetas con nudo de la caña en 2 paquetes de muestra, cada una suministrada por la compañía XILO Químicas. Del primer grupo de muestras se tienen los resultados mostrados en el cuadro 3.

En el siguiente cuadro se muestra el resumen de dichos resultados, además se adjunta a la tabla la media o promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación de dichos datos.

Probeta	Pu (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Módulo de elasticidad (kg/cm ²)
1	1746	1000,498	17460,02
2	1756	1003,404	14878,941
3	988	771,455	9974,935
4	1238	918,079	13274,331
5	1038	787,338	11135,640
6	1263	991,538	20268,484
7	1482	822,578	10919,922
8	1104	767,609	12397,292
9	1295	970,294	14267,861
	Media	892,53	13841,94
	Desv. Std.	104,09	3333,03
	C.V.	11,66	24,08

Al observar el coeficiente de variación para los datos de esfuerzo (11,66%) podemos notar que esta expresión porcentual de la desviación estándar nos indica que los resultados de las muestras tienen un promedio aceptable. Sin embargo, para su utilización como sustituto del acero, este valor debería ser menor al 10%, ya que para los materiales utilizados como refuerzo todos los valores deben ser lo más cercanos posible. Por otro lado, al observar el C.V. del módulo elástico de las muestras es un valor más alto, lo cual nos indica que la

dispersión en estos datos es considerable y que la confianza en los mismos disminuye, por lo que su uso puede ser cuestionado.

Si se recuerda bien, además de este grupo de probetas se ensayaron 10 probetas más en la máquina Versa del CECO. Para este ensayo se siguieron los mismos parámetros de ejecución, con lo cual las variables que se puedan presentar en los resultados no se ocasionarán por una diferencia entre los ensayos. Para este grupo de probetas tenemos en siguiente cuadro resumen.

CUADRO 17. RESULTADOS DE FALLA A TENSIÓN EN PROBETAS DE BAMBÚ CON NUDO			
Probeta	Pu (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Módulo de elasticidad (kg/cm ²)
11	1350	890,993	11490
12	800	424,649	7962,6
13	1100	590,937	9092,2
14	800	423,974	7806,5
15	1025	556,035	8024,5
16	1050	562,043	9415,8
17	1050	557,904	7403,6
18	1775	975,975	13457
19	2025	1089,667	14840
20	1000	668,14	12253
	Media	674,03	10174,52
	Desv. Std.	231,57	2648,68
	C.V.	34,36	26,03

Al analizar el promedio de los resultados de esfuerzo para ambos grupos de muestras se aprecia que existe una disminución de cerca del 24%. Este grupo de datos presenta un C.V. igual a 34,36%, lo cual estadísticamente es un dato que nos indica que la confiabilidad de los datos es discutible. El mismo caso se presenta en el módulo elástico de este grupo de muestras, donde la variación entre los resultados causa que el coeficiente de variación sea igual a 26,03%.

Esto ocasiona la misma dificultad en estos valores para los datos de esfuerzo.

Al analizar las posibles causas que ocasionan esta desviación entre estos grupos de datos se puede mencionar errores de ejecución de ensayo, calibración de las máquinas usadas o variación entre las probetas. Sin embargo, realizando un análisis más detallado de las características de la planta, se lograría demostrar a qué se debe dicha variación.

Microscópicamente se puede observar cómo es que la densidad de fibras varía en la caña, lo cual puede implicar que depende del lugar de donde se obtenga la tablilla de bambú.

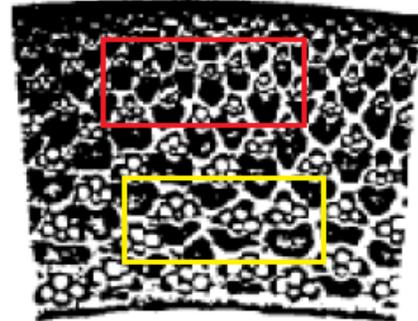


Figura 43. Vista microscópica de las fibras de bambú.

Según la imagen anterior, entre más cerca de la parte externa de la caña se tomen las probetas, menor cantidad de fibras contiene la misma. Ciertamente, los datos analizados corresponden a la parte del nudo de la caña, sin embargo, este está compuesto por la unión de las fibras, con lo cual su densidad y por lo tanto resistencia están relacionadas con las fibras.

En referencias bibliográficas como la publicación "Fundamentals of the design of bamboo structures" del ingeniero Oscar Arce Villalobos, se encuentran valores del esfuerzo a tensión reportado de entre 1779 kg/cm² y 1494 kg/cm². El módulo elástico reportado en esta publicación es de 276310 kg/cm² para un tipo de muestra y de 196430 kg/cm².

Este último valor no es similar al obtenido en las pruebas realizadas en la presente tesis, es por esto que se efectúa un análisis diferente para la determinación de este valor. Este procedimiento se definió en la sección de metodología, específicamente en la parte de corroboración del módulo elástico. Los resultados del módulo elástico obtenido con el uso del deformímetro directamente colocado en la probeta se presentan en el cuadro 18.

CUADRO 18. RESUMEN DE RESULTADOS DE VERIFICACIÓN DEL MÓDULO ELÁSTICO EN EL BAMBÚ CON NUDO

Probeta	Pu (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Módulo de elasticidad (kg/cm ²)
21	365	543,155	126891,142
22	365	545,590	150984,766
23	510	790,698	224840,772
24	615	943,252	629493,333
25	350	593,220	151660,58
26	520	826,709	218945,917
27	575	914,149	107301,857
28	320	487,062	255696,7
	Media	705,48	233226,88
	Desv Std.	182,94	168348,06
	C.V.	25,93	72,18

Con el procedimiento para la nueva medición del módulo elástico, se logra llegar a un resultado más consistente con otras fuentes bibliográficas, las cuales presentan valores similares a los mencionados por la referencia mencionada anteriormente. Con lo cual se puede decir que el valor para el módulo elástico del bambú con presencia de nudo es de entre los 250000kg/cm² y los 100000kg/cm².



Figura 44. Probetas falladas de bambú con nudo y de sección reducida.

Este valor presenta un rango muy amplio, lo cual puede ser cuestionable, ya que este dato es indispensable para un diseño estructural y en este tipo de proceso ingenieril se necesitan datos precisos y consistentes entre sí.

La variación entre los resultados obtenidos es comprensible si se considera que las lecturas pueden ser afectadas por el error humano o por deficiencias del método. Pero sobre todo, al igual que en los resultados de esfuerzo a tracción, el factor más importante que puede afectar los resultados es la condición de la planta de donde se obtuvo la muestra.

Como conclusión de la determinación de las propiedades mecánicas del bambú, se debe conocer la resistencia a esfuerzos de tensión y el módulo elástico de las fibras. Dichos resultados se resumen en el siguiente cuadro.

CUADRO 19. RESUMEN DE RESULTADOS DE FALLA A TENSIÓN EN PROBETAS DE BAMBÚ SIN NUDO

Probeta	Esfuerzo (kg/cm ²)	Módulo de elasticidad (kg/cm ²)
1	1474,878	657062,000
2	1386,749	151444,000
3	1581,790	192399,000
4	1457,055	985953,000
5	1701,613	377823,000
6	1430,843	169733,000
7	1198,083	247702,000
8	1567,732	517767,000
	Media	1474,84
	Desv Std.	150,29
	C.V.	10,190

La anterior matriz de datos nos muestra que las fibras del bambú tienen una mayor resistencia que el nudo de la planta, lo que hace de este último el punto de debilidad de la caña. Los datos generados anteriormente muestran que el C.V. es de cerca del 10%, lo cual para ensayos de laboratorio y en especial para un material

como este es un valor aceptable, y le da mucha validez a los mismos.

Sin embargo no se puede olvidar lo sucedido con las muestras con nudo. Es por esto que se debe realizar un análisis con más muestras y que de esta manera se pueda respaldar de una mejor forma este valor para las fibras del bambú.

También es necesario mencionar que para el módulo elástico se presenta una alta desviación entre los resultados obtenidos. Esto se debe a que en el momento de medir las deformaciones, el deformímetro no registra las mismas hasta el momento en que las fibras empezaban a fallar, con lo cual este dato se ve alterado por el momento en que se dé esta falla.

En los cuadros 3, 4 y 9, los datos de módulo elástico que se presentan se obtienen por medio de la pendiente de la recta que se obtiene al utilizar los valores al 20% y al 80% de la carga máxima de la muestra.

El proceso mencionado anteriormente no es válido para las fibras de bambú, ya que si se observa la figura 35, el gráfico de esfuerzo vs. deformación demuestra que se tienen definidas claramente dos partes en el gráfico. La primera es donde las fibras están soportando la carga aplicada, en esta parte se puede decir que la deformación es nula o no perceptible por el equipo usado para su medición, por lo que el módulo elástico tenderá al infinito. Luego cuando las fibras empiezan a fallar, el módulo elástico baja considerablemente hasta que fallen todas las fibras, y por ende la probeta.

Sin embargo, de acuerdo con los datos alcanzados, se puede decir que los valores usados para el diseño de concreto reforzado van a estar gobernados por el nudo de la caña.

Valores utilizados para elementos de concreto con refuerzo de bambú

Los ensayos de tracción aplicados a las distintas probetas de bambú se realizaron con el objetivo de conocer las propiedades mecánicas de los componentes físicos que conforman el material en estudio.

Además de este propósito, es claro que se deben determinar los parámetros a usar en un eventual diseño. Es así que se debe discernir cuáles de los múltiples valores logrados se debe usar.

Con respecto a la resistencia a la tracción, este valor lo va a definir el nudo de la caña, ya que durante los ensayos realizados, ninguno de estos valores superó a los obtenidos para esta medida en las fibras de bambú. Con esto, para los datos generados en este estudio se establece que el esfuerzo máximo a la tracción en el nudo de bambú varía entre los 1089,67 kg/cm² y 423,97 kg/cm².

Para determinar el módulo elástico a utilizar en un posible diseño, tomaremos como referencia las probetas que se han utilizado para ejemplificar los datos obtenidos usando el método del deformímetro colocado en la probeta. Estas probetas son la T-F-2 (probeta sin nudo) y la T-N-2 (probeta con nudo).

En este análisis se tomarán las deformaciones obtenidas para cada probeta a cada 25 kg de carga, y se genera así la siguiente tabla.

CUADRO 20. RELACIÓN ENTRE LOS DATOS DE FALLA PARA PROBETAS DE BAMBÚ

Carga	Esfuerzo (kg/cm ²)		Deformación ϵ (cm/cm)	
	T-F-2	T-N-2	T-F-2	T-N-2
0	0,000	0,000	0,000	0,000
25	38,550	37,364	0,000	0,000
50	77,100	74,727	0,000	0,001
75	115,650	112,091	0,000	0,001
100	154,200	149,455	0,000	0,002
125	192,750	186,819	0,000	0,002
150	231,299	224,182	0,000	0,002
175	269,849	261,546	0,000	0,003
200	308,399	298,910	0,000	0,003
225	346,949	336,274	0,000	0,003
250	385,499	373,637	0,000	0,003
275	424,049	411,001	0,000	0,003
300	462,599	448,365	0,000	0,003
325	501,149	485,728	0,000	0,004
350	539,699	523,092	0,000	0,004
375	578,249	Falla	0,000	Falla
400	616,799		0,000	
425	655,348		0,000	
450	693,898		0,000	
475	732,448		0,000	
500	770,998		0,000	
525	809,548		0,000	
550	848,098		0,000	
575	886,648		0,000	
600	925,198		0,000	
625	963,748		0,001	
650	1002,298		0,001	
675	1040,847		0,002	
700	1079,397		0,002	
725	1117,947		0,003	
750	1156,497		0,003	
775	1195,047		0,004	
800	1233,597		0,005	
825	1272,147		0,006	
850	1310,697		0,006	
875	1349,247		0,007	

De la anterior matriz de datos se puede generar un gráfico en el cual se comparen gráficamente el comportamiento de ambas partes de la caña. En este gráfico se puede corroborar que al momento de empezar a aplicarle carga a ambas probetas, la parte del nudo es la que va a empezar a deformarse, mientras que las fibras de la planta no se alterarán del mismo modo.

Incluso, según lo muestra el gráfico, antes de que las fibras lleguen a empezar a fallar, ya el nudo de bambú habrá fallado, con lo cual se comprueba que los datos para usarse en diseño deberían ser los que se obtengan de un estudio detallado del nudo de la caña.

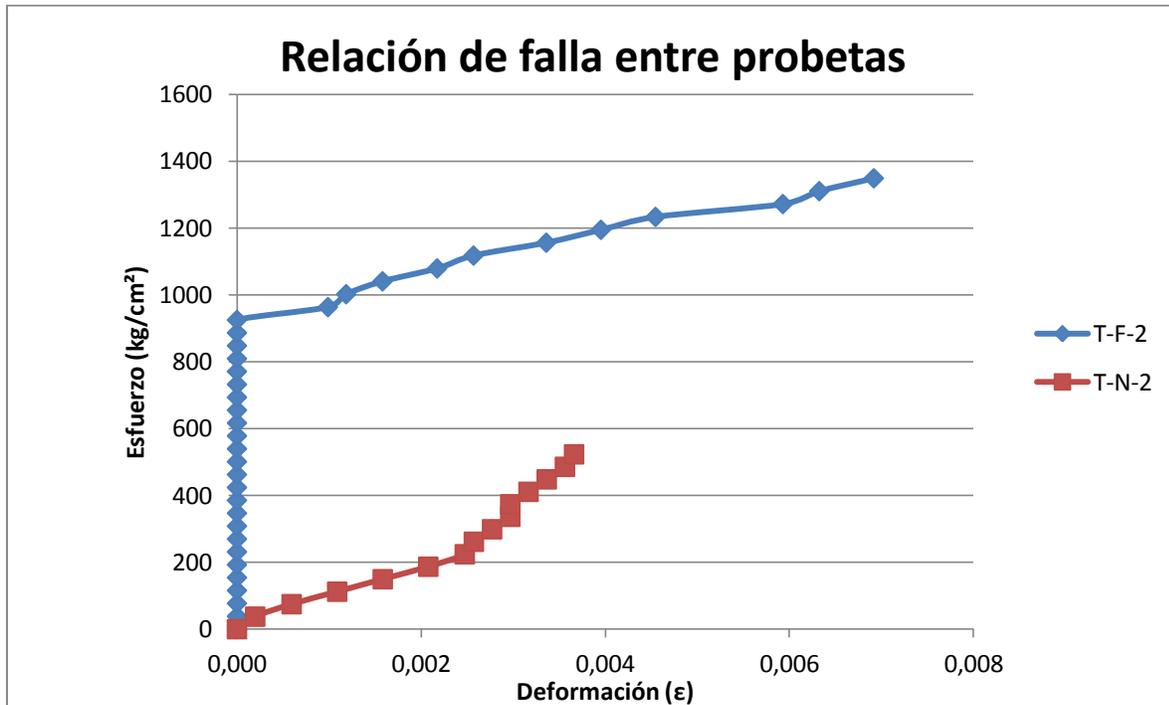


Figura 45. Comportamiento comparativo entre las probetas de bambú.

Una vez establecidos los parámetros necesarios a utilizar en los elementos de bambú, se debe definir el comportamiento del bambú y del concreto al combinarlos y utilizarlos en un elemento. Para este propósito se realizaron pruebas en pastillas de concreto para determinar la adherencia entre ambos materiales y en elementos reforzados con bambú y concreto.

Adherencia entre materiales estudiados

Como ya se mencionó anteriormente, entre las premisas fundamentales del diseño de concreto reforzado, se debe asegurar que la deformación del refuerzo debe ser la misma que la del concreto circundante, es decir adherencia perfecta entre los materiales. Es por esto que se debe determinar la carga a la cual el bambú y el concreto se separan en un elemento en el cual se encuentren juntos.



Figura 46. Especímenes utilizados para pruebas de adherencia.

Los resultados de estos ensayos se encuentran en presentes entre los cuadros 10 y 13. En cada cuadro se muestran los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a cada una de las distintas probetas suministradas.

En el siguiente gráfico se muestran estos resultados correlacionados para las tres primeras probetas ensayadas y para cada una de las edades a las que se ejecutó la prueba. En estas imágenes se presentan tres de las cuatro probetas ensayadas, ya que estas son las que presentan una superficie lisa.

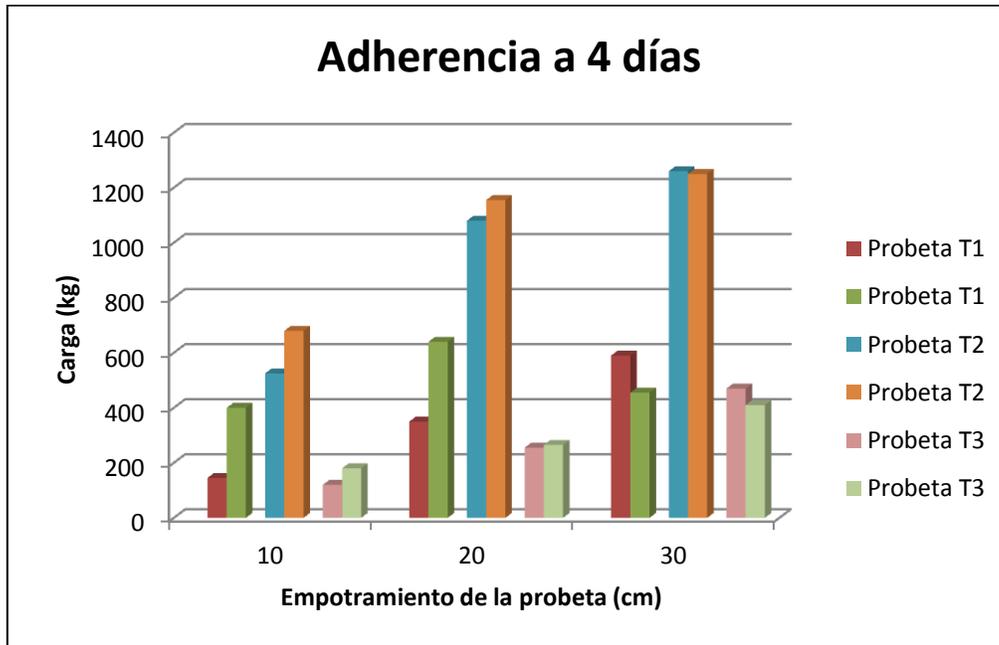


Figura 47. Resultados de carga de extracción para probetas de bambú a 4 días.

De la figura anterior podemos asegurar que la probeta T2 es la que cuenta con una mayor resistencia a ser extraída del concreto, lo cual es justificable ya que tiene una sección mayor, con lo cual el área de contacto entre ambos materiales es mayor, haciendo que la resistencia sea mayor.



Figura 48. Probetas T3 falladas a extracción.

Sin embargo, este mismo patrón no se cumple para la probeta T3, la cual es la que tiene mayor sección de las probetas probadas. Incluso los resultados para esta muestra llegan a ser menores que los obtenidos para la probeta T1, donde el área de contacto es la menor.



Figura 49. Probetas T1, T2 y T3 utilizadas en pastillas de concreto.

Estos datos implican que se cuestione la probeta, ya que es la única variable presente en el ensayo. Esto porque los elementos fueron ensamblados el mismo día, con el mismo concreto y con el mismo método. Entre los factores que pudieron afectar estos datos se encuentran los tratamientos colocados a las muestras, en específico el proceso de mineralización. Este tratamiento aplicado por XILO Químicas en teoría mejora la adherencia entre el bambú y el concreto; sin embargo, no se tuvo control sobre su aplicación, e inclusive las probetas T3 fueron suministradas para los ensayos mucho después que las primeras 2. Esto hace cuestionable que el tratamiento haya sido el mismo.

Para los resultados a 7 y 28 días de esta prueba se tienen los mismos gráficos, en los cuales se da el mismo comportamiento; es decir, la probeta T3 llega a tener las menores cargas de

extracción, y es esta la probeta que mayor área de contacto presenta.

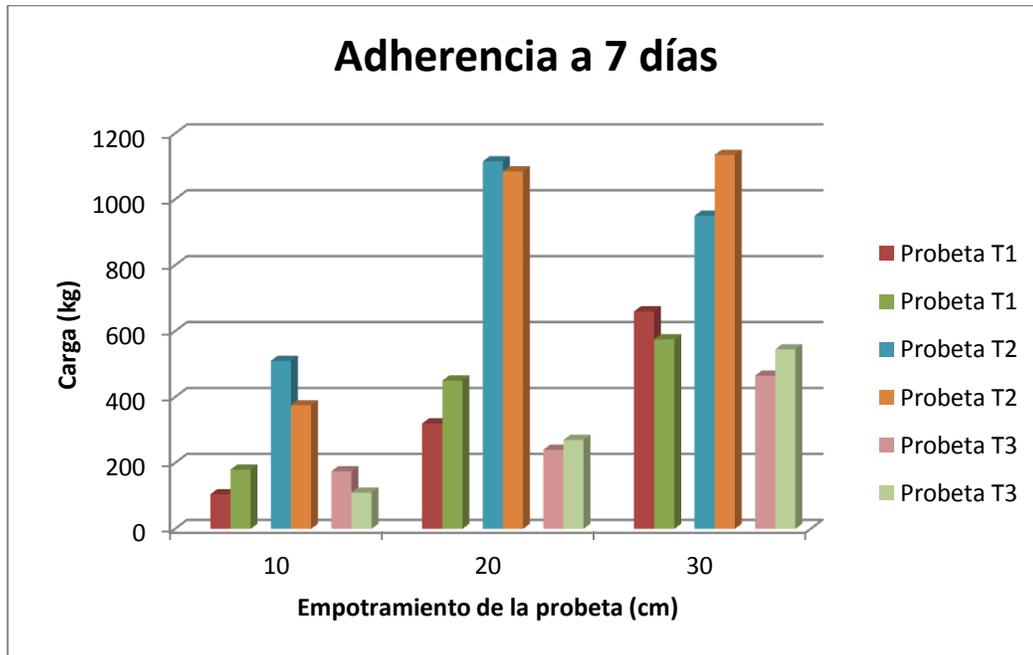


Figura 50. Resultados de carga de extracción para probetas de bambú a 7 días.

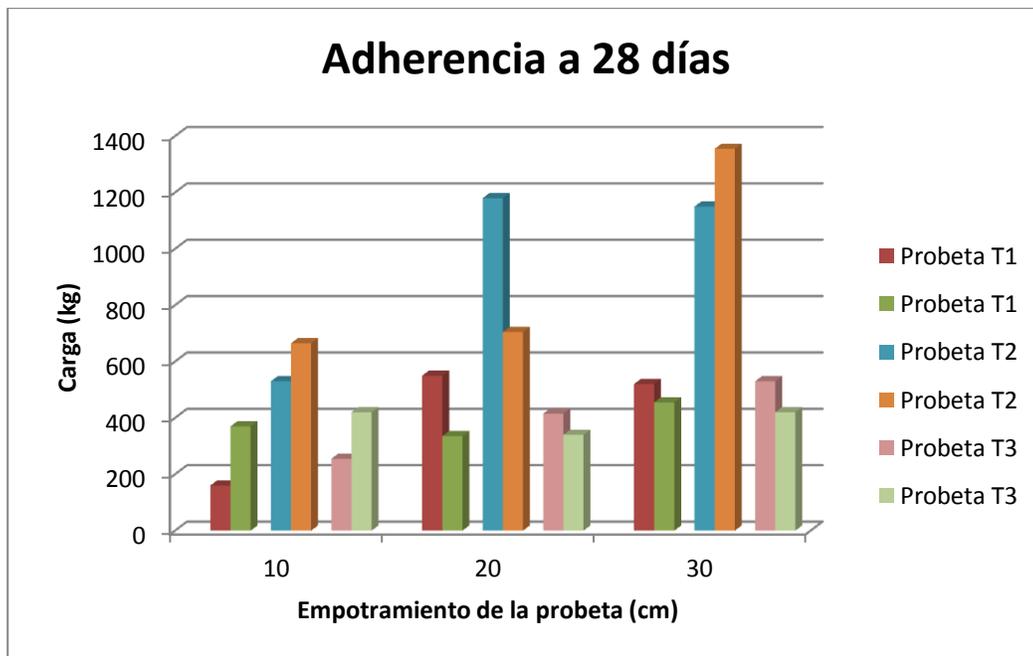


Figura 51. Resultados de carga de extracción para probetas de bambú a 28 días.

Los dos anteriores gráficos corroboran que el resultado es consistente, con lo cual es importante analizar qué sucedió en el proceso de fabricación de la probeta T3 y así solventar el problema que ocurre al interactuar estos materiales.

También podemos asegurar que la edad del concreto tiene una menor influencia que el empotramiento y el área de contacto en este resultado. Esto se deduce al observar los incrementos de las cargas de extracción, los cuales para las edades mencionadas no varían significativamente para un mismo tipo de probeta.

Debido a los datos logrados, se decide incrementar el área en las probetas analizadas, es así que se proponen los canales longitudinales, con lo cual se suministran nuevamente probetas T3 para que se les efectúe dicho procedimiento. Lo ideal en este caso es que los canales se le realizaran a la probeta T2, que fue la muestra que mejores resultados obtuvo, pero como se mencionó, el material suministrado fue de 25 mm X 6 mm. En el siguiente cuadro se presentan las áreas de contacto para cada empotramiento y tipo de probeta.

CUADRO 21. ÁREAS DE CONTACTO PARA LAS PROBETAS EN ESTUDIO

Probeta	Empotramiento (cm)	Área de contacto (cm ²)
T1	10	36,00
	20	72,00
	30	108,00
T2	10	52,00
	20	104,00
	30	156,00
T3	10	62,00
	20	124,00
	30	186,00
T4	10	77,00
	20	154,00
	30	231,00

Las áreas anteriores se determinaron usando los tamaños nominales, con lo cual no se consideran las variaciones propias del material, ya que esto dificultaría y alargaría el cálculo de dicho valor.

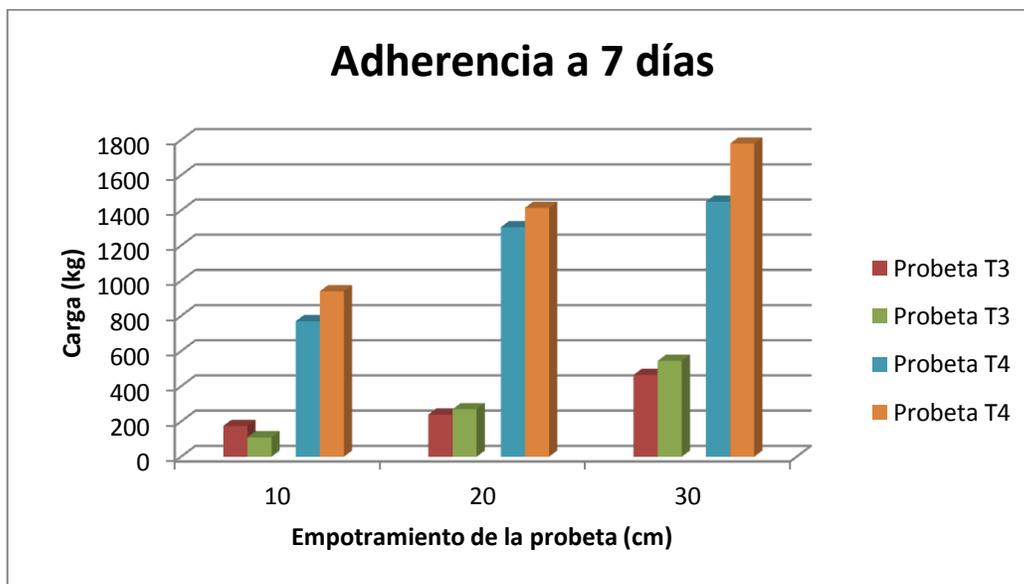


Figura 52. Comparación entre las cargas de extracción de las probetas T3 y T4.

Según el gráfico anterior, el incremento se da entre estas probetas con solo el hecho de integrarle canales. Además de esta modificación, a la probeta se le hicieron varias mejoras. Entre estas podemos mencionar que se logró eliminar la corteza de la planta que se encontraba en el primer grupo de probetas, además se estabilizó la dimensión de la sección,

esto porque en el primer grupo no se pudieron usar varias muestras debido a que no cumplían con el tamaño nominal, y se solicitó maximizar el tratamiento de mineralización.

Al hacer la misma comparación para 28 días, se puede apreciar que también se presenta una gran diferencia entre dichas resistencias.

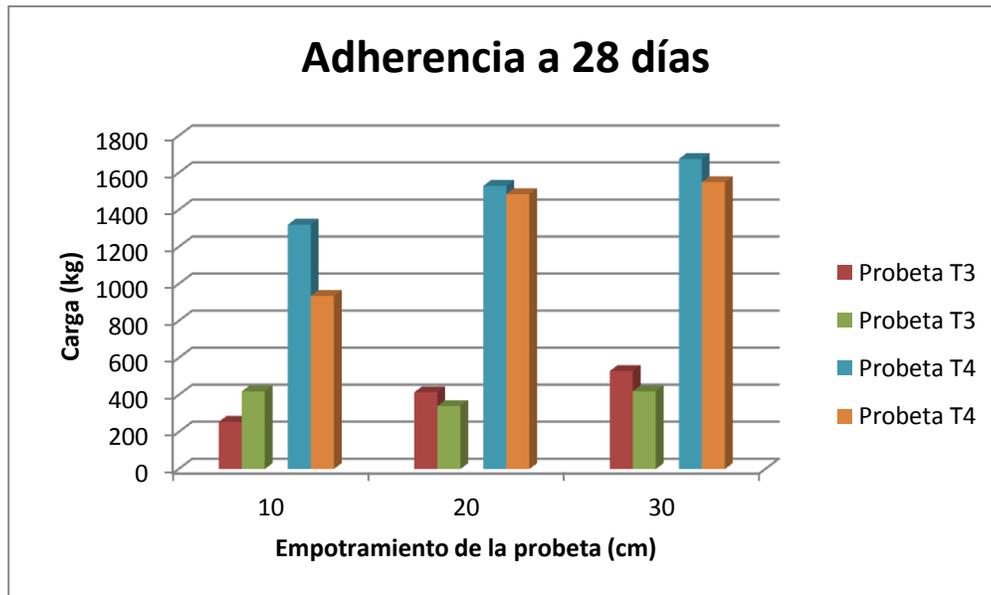


Figura 53. Comparación entre las cargas de extracción de las probetas T3 y T4.

La mejora en estas probetas inclusive causa diferencia entre las fallas, ya que en las probetas lisas la superficie de falla estaba claramente definida como se ha logrado apreciar en anteriores imágenes, incluso se da desprendimiento de las fibras al ser extraída la muestra debido a la fricción entre materiales.

Gracias a los canales y a los factores mencionados, el incremento a la resistencia a la extracción se aumentó tan considerablemente que para 3 probetas (señaladas anteriormente) se da falla por rotura antes que por adherencia. Esto sería ideal para la utilización de este material como refuerzo.



Figura 54. Probeta de adherencia fallada con bambú liso.

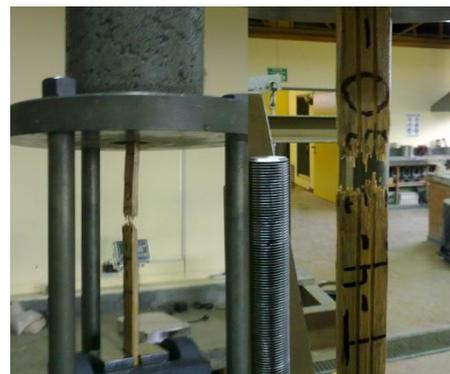


Figura 55. Probeta de adherencia fallada por rotura.

Otro de los factores que puede beneficiar el que las probetas con canales tengan mejor adherencia es el hecho de que esta forma facilita que la pasta de cemento se adhiera a la probeta, con lo cual el elemento se une mejor al cilindro.

Al lograr el incremento en la carga de extracción y contar con probetas del tipo T4 para los demás ensayos, se decide utilizar las mismas para realizar los elementos de concreto reforzado.

Estudio de elementos reforzados

Según lo establecido anteriormente, los elementos reforzados en esta investigación contarán con refuerzo de acero y de bambú en diferentes cantidades. Esto para tener un parámetro de comparación entre los resultados obtenidos para cada tipo de material.

Para dichos resultados no se logró definir la deformación que sufrieron los elementos al ser sometidos a estas acciones de carga, debido al tipo de dispositivo que se utilizó para la falla. Esto dificulta realizar un análisis más detallado de los elementos, por lo cual se debería completar esta parte del estudio con un análisis más minucioso y con variaciones en los elementos utilizados.



Figura 56. Vista de la cara inferior de los elementos a ensayar.

Sin embargo, al contar con estos datos para el este análisis, se procesarán los mismos con el fin de generar posibles conclusiones.

Entre los primeros aspectos a estudiar se encuentra una posible sección transformada de los elementos reforzados, este principio se determina en el diseño estructural para comprobar el aporte del esfuerzo al concreto en la fibra de tensión. Esto se hace relacionando los módulos elásticos de los materiales, y al ser el del acero mayor al del concreto hace que este último incremente su resistencia a la tensión.

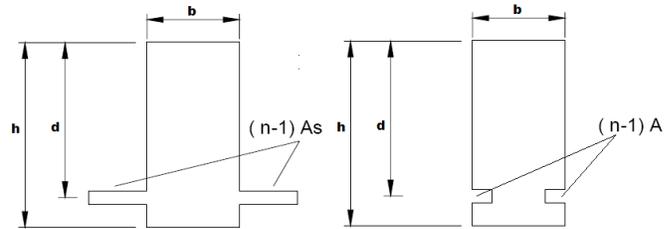


Figura 57. Secciones transformadas con refuerzo de acero y de bambú.

Por su parte, para el refuerzo de bambú, al ser el módulo elástico similar al del concreto y en la mayoría de casos del presente estudio menor, la sección transformada obtenida muestra que la sección a tensión del elemento va a sufrir una reducción en su sección, con lo cual su capacidad de soporte se verá disminuida y hace que el elemento se agriete más rápidamente.

Lo anterior se puede respaldar al observar el cuadro 15, donde los momentos en los cuales la grieta se torna visible para las vigas con bambú son en todos los casos menores a los momentos de las vigas con acero. Aunque este momento no es el de rotura del concreto, tras dicha observación se puede decir que si la grieta se torna visible ante un momento menor para el bambú es porque el momento de agrietamiento se desarrolla antes que en el refuerzo de acero.



Figura 58. Comparativa entre elementos fallados a flexión.

Con respecto a las cargas y momentos de falla, es clara la diferencia entre los elementos con distinto refuerzo. Inclusive esta diferencia llega a ser de poco más del doble para elementos con la misma cantidad de barras de refuerzo. Otro aspecto que se aprecia en el cuadro 15, es el hecho de que ninguna viga con 2 probetas de bambú como refuerzo llega a igualar en el momento de falla a las vigas con solo 1 varilla #3 como refuerzo.

Al observar la imagen 58, también es claro que las fallas de los elementos son distintas. Para la viga con refuerzo de acero (viga ubicada en la parte superior de la imagen) la falla es típica de los ensayos en vigas reforzadas con este material, donde se desarrollan varias grietas desde la fibra a tensión hacia donde se aplica la carga. Al contrario de las vigas reforzadas con bambú, donde únicamente se forma una grieta, lo que da evidencia de una falla frágil en el ensayo realizado, Esto es justificable, porque en el análisis de los resultados de la resistencia a tensión de los componentes del bambú se determinó que la resistencia del elemento está regida por la capacidad del nudo, y según los gráficos obtenidos, la falla de este elemento es frágil.

Otra razón de que se dé este tipo de resultado es el hecho de que el bambú se esté separando del concreto con lo que el problema de adherencia se sigue presentando en entre estos materiales. Por lo tanto, la diferencia entre el momento de desarrollo de la grieta y el momento de falla se da debido al aporte brindado por la resistencia a la extracción de la probeta de bambú y no porque este se encuentre soportando los esfuerzos de tracción a los que se somete el elemento.

Conclusiones

- En la planta de bambú y en las probetas utilizadas para la presente investigación, las fibras de esta constituyen el componente de mayor resistencia ante las cargas de tracción, ya que las mismas fallan al ser sometidas a un esfuerzo mayor que las probetas con nudo.
- El primer aspecto sobre el que se debe tener control de calidad en la utilización de este material, es sobre la regularidad de la forma de la sección en la caña. Es decir, una vez que se vayan a establecer dimensiones mínimas, las mismas deben ser respetadas por las probetas elaboradas.
- La falla a tensión en elementos de bambú va a estar dada por la resistencia del nudo, esto debido a su menor capacidad de soporte ante la acción de cargas de este tipo.
- La resistencia de los elementos estudiados está claramente ligada con la calidad de la planta de donde se extrajo y el lugar en la planta de donde se obtuvo la muestra, debido a la variación en la densidad de las fibras durante la sección de la planta.
- La deformación, y por ende el módulo elástico, va a estar regido por el nudo de la caña, ya que como se mencionó, este es el elemento que presenta una mayor deformación y resiste menores esfuerzos.
- No se logró determinar una comparación entre la capacidad a tensión del bambú y los valores tanto de fluencia y rotura de varillas de acero. Esto debido a la gran variación presente entre los datos obtenidos de capacidad en el bambú.
- Al combinar el concreto con el bambú no se observó que este último absorbiera agua de la mezcla, con lo cual hubiera comprometido la calidad del concreto al cambiar la relación agua/cemento en la mezcla ubicada en los alrededores de la caña.
- La presencia de corteza del bambú en las probetas analizadas favorece la extracción del bambú en el concreto debido a que se encuentra una superficie lisa sin ningún tipo de irregularidad que facilite la resistencia a la extracción.
- Debido a la variación en la densidad de las fibras y a la presencia de la corteza en el bambú, al obtener las probetas más lejos de la corteza, mayor provecho se obtendrá de las propiedades del bambú.
- La adherencia en el concreto, además de estar ligada al área de contacto entre materiales, en este caso bambú, también se debe vincular a la calidad del acabado en las superficies de la probeta.
- Para asegurarse una mayor adherencia entre el concreto y el bambú es necesario tomar en cuenta la elaboración de discontinuidades en la probeta de bambú, sin poner en compromiso la calidad o resistencia de la misma.
- El uso de los canales utilizados en la presente tesis no asegura que se encuentre una adherencia perfecta entre el bambú y el concreto, por lo cual es necesario profundizar el análisis en este tema.
- El uso de probetas de bambú como refuerzo implica que se disminuya la capacidad del concreto en la fibra a tensión cuando este se somete a flexión, esto debido a los valores tan cercanos que existen entre el módulo de elasticidad del bambú y del concreto.
- La falla en los elementos reforzados con bambú ensayados en esta tesis, es una falla del tipo frágil, con lo cual se está

dejando de lado el principio de ductilidad en el concreto reforzado, lo cual es un principio fundamental del diseño de concreto reforzado.

- Debido a que las fallas en elementos reforzados con bambú son frágiles, no se deben usar elementos de este tipo para fines estructurales o bien en elementos que requieran de cierta ductilidad.
- Un estudio más amplio utilizando el bambú como refuerzo permitiría establecer mayores parámetros de diseño y así definir los tipos de elementos que se pueden reforzar con bambú.

Recomendaciones

- Para la utilización del bambú en forma de tablillas se requiere tener un estricto control sobre los tratamientos a los que es sometido este material antes de su uso, para que no existan variaciones entre muestras que deben ser del mismo tipo.
- Se debe realizar un estudio estadístico para determinar de manera más efectiva la capacidad exacta de los distintos componentes de la planta del bambú.
- En este estudio se debe considerar la cantidad de muestras necesarias para respaldar los valores alcanzados. Además se deben analizar variables como la edad de la planta, época (seca o lluviosa) de cosecha, lugar donde se cosechó, ubicación en la planta de donde se obtuvo la muestra a analizar, entre otros aspectos.
- Los parámetros de producción para la planta deben ser establecidos para que los mismos se cumplan a cabalidad durante la elaboración de las probetas.
- Para realizar el estudio más detallado en bambú, se debe primero asegurar la calidad de las muestras y tener control sobre el proceso de producción ya una vez que este se ha establecido. Así de esta manera se eliminarán variables ocasionadas en la producción que puedan afectar el estudio.
- Con la ejecución de dicho análisis se estandarizará el proceso de producción de las probetas de bambú. De esta manera se le estará sacando el mayor provecho a las características de la planta.
- En caso de definir el uso de este material para algún fin, se debe realizar de cada cosecha obtenida un riguroso control de calidad para asegurar que las características de las muestras cumplen con lo establecido.
- Con respecto a los elementos reforzados con este material, es necesario elaborar un estudio similar al realizado en esta investigación añadiendo la medición de las deformaciones de los elementos al someterse a flexión.
- Se recomienda realizar una investigación más amplia para observar el comportamiento más general de ambos materiales al trabajar en conjunto. Este estudio es recomendable realizarlo una vez ya definidas de manera acertada las propiedades mecánicas de los componentes de la planta.
- Para asegurar una adherencia perfecta entre materiales, se debería analizar la posibilidad de adicionar un dispositivo mecánico externo a las tablillas de bambú.
- Es necesario verificar si existe una separación entre el bambú y concreto en elementos que ya han sido ensayados a flexión.
- Este estudio puede abarcar más variables, como diferentes resistencias de concreto y edades de falla de los elementos, sección y longitud de los elementos. También se debe incluir diferentes secciones de vigas; es decir, elementos de mayor peralte. Además es importante evaluar la orientación del refuerzo y así evaluar cómo afecta el cambio de la inercia.
- Se debe hacer un estudio más amplio con respecto a la adherencia entre el bambú y el concreto. Es decir, ambos materiales no se deben utilizar en conjunto hasta que no se asegure la adherencia perfecta entre materiales.
- Es de suma importancia evaluar la durabilidad de la caña dentro del concreto, ya que si la misma altera sus propiedades, cualquier elemento de

concreto reforzado con bambú estará siendo directamente perjudicado.

- Es importante analizar la viabilidad de utilizar el bambú en forma de tablillas como elemento aislado debido a la capacidad que tiene el mismo.

Apéndices

En el siguiente capítulo se presentan los resultados generados durante el estudio de la caracterización del bambú y comparación con el acero como material de refuerzo en concreto.

Entre dichos resultados se encuentran los gráficos de las fallas de varillas de acero y de probetas de bambú realizados en la máquina Universal de ensayos, también las tablas y gráficos generados de la falla de probetas de bambú con nudo y sin nudo en sección reducida y sin reducir; esto utilizando la máquina Versa. Por último, los datos de incremento de la adherencia con respecto a la longitud de empotramiento para las distintas probetas ensayadas.

Anexos

En este capítulo se adjunta la norma utilizada para elaborar las probetas de bambú con sección reducida. El nombre de dicha norma es "Bamboo- Determination of physical and mechanical properites".

Referencias bibliográficas

CFIA. (2002). **CÓDIGO SÍSMICO DE COSTA RICA**. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

ACI 318S-05. 200. **REQUISITOS DE REGAMENTO PARA CONCRETO ESTRUCTURAL**. *Comite ACI 318*. Estados Unidos de América.

Nilson, A. 1999. **DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO**. México: Editorial Mc Graw Hill.

Castellanos, S. 2007. **GUADUA (LAMBÚ): SUBPARÁMETROS DE PRODUCCIÓN Y TRANSFORMACIÓN DE LA GUADUA LAMINADA APLICADOS AL DISEÑO INDUSTRIAL**. Bogotá, Colombia; Ecoe Editores.

Arce, O. 1993. **FUNDAMENTALS OF THE DESIGN OF BAMBOO STRUCTURES**. Tesis para Doctorado. Universidad Tecnológica de Eindhoven.