



“2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria”

Viga compuesta de bambú con acero de refuerzo para optimizar sus propiedades a flexo-compresión

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN ARQUITECTURA SOSTENIBLE Y GESTION URBANA

PRESENTA:

ING. CIVIL. VICTOR MANUEL GUEVARA AGUILAR

DIRECTOR:

DR. ARQ. JOSE RICARDO MORENO PEÑA

CO-DIRECTOR:

M. ARQ. JOSE FIDEL NAVARRO ARELLANO

VILLA DE ALVAREZ, COLIMA OCTUBRE DEL 2020



Oficio de impresión



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Colima

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Villa de Álvarez, Colima, **21/Octubre/2020**
Oficio No. DEPI 1.2.11/156/2020

**ALUMNO VÍCTOR MANUEL GUEVARA AGUILAR
PASANTE DE LA MAESTRÍA EN ARQUITECTURA SOSTENIBLE
Y GESTIÓN URBANA
PRESENTE**

La División de Estudios de Posgrado e Investigación de acuerdo al procedimiento para la obtención del Título de Maestría de los Institutos Tecnológicos y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la comisión revisora hizo a su trabajo profesional denominado **"VIGA COMPUESTA DE BAMBÚ CON ACERO DE REFUERZO PARA OPTIMIZAR SUS PROPIEDADES A LA FLEXO-COMPRESIÓN"**, por la opción de tesis, que para obtener el grado de Maestro en Arquitectura Sostenible y Gestión Urbana será presentado por Usted, tiene a bien concederle la **AUTORIZACIÓN** de impresión de la tesis citada.

Sin otro particular por el momento, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial y afectuoso saludo.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®

**RAMONA EVELIA CHÁVEZ VALDEZ
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



SEP - TecNM
INSTITUTO TECNOLÓGICO
De Colima
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN

RECV/cas

C.p. Archivo.



Av. Tecnológico No. 1, Villa de Álvarez, Col., C.P. 28976
Tel. 01 (312) 314 0933, 314 0683, 312 6393, 312 9920
www.tecnm.mx | www.colima.tecnm.mx





Villa de Álvarez, Colima 21/Octubre/2020

Ramona Evelia Chávez Valdez
Jefa de la División de Estudios de Posgrado e Investigación
Presente

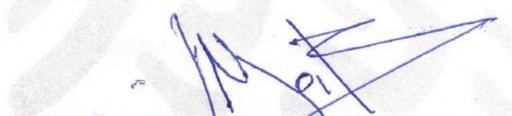
Por medio de la presente se hace de su conocimiento que el **C. Víctor Manuel Guevara Aguilar** con número de control **G1846012**, estudiante de la **Maestría en Arquitectura Sostenible y Gestión Urbana**, ha concluido satisfactoriamente el periodo de revisión de su proyecto de tesis:

"VIGA COMPUESTA DE BAMBÚ CON ACERO DE REFUERZO PARA OPTIMIZAR SUS PROPIEDADES A LA FLEXO-COMPRESIÓN"

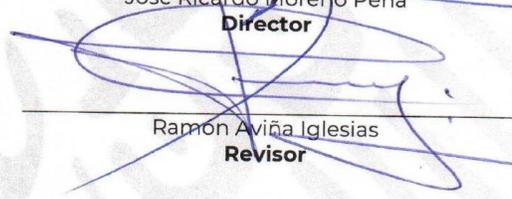
Por lo que este **COMITÉ DE TITULACIÓN** otorga la liberación para que pueda continuar con sus trámites de titulación.

Sin otro particular, reciba Usted nuestras consideraciones distinguidas.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®



José Ricardo Moreno Peña
Director



Ramón Aviña Iglesias
Revisor



José Fidel Navarro Arellano
Co-Director



María Silvia del Rocío Covarrubias Ruesga
Revisora

c.c.p. Archivo



Prólogo

Una de las razones por la cual me entusiasme en estudiar el bambú como elemento estructural, además de mi formación como ingeniero civil, fue cuando Jörg Stamm aceptó que su preparación sobre el tema era limitada pues sus procesos son empíricos y reconoció la necesidad de trabajar en equipo con arquitectos e ingenieros para obtener conocimientos científicos, esto sucedió durante la conferencia “Dos décadas de estructuras livianas con bambú” celebrada en la ciudad de Colima en el mes de diciembre del 2018, la cual fue impartida por el mismo Stamm quien cuenta con fama internacional por diseñar y construir impresionantes estructuras de bambú alrededor del mundo como el puente de Cúcuta con 30 metros de claro en Colombia o la cubierta de 2,000 m² de Bali en Indonesia, así como en otros países entre ellos: Alemania, Tailandia y México. Nos comentó que “El bambú no sólo es una planta para embellecer el paisaje, sino que puede utilizarse como material para la construcción de viviendas y puentes, entre otras estructuras, debido a su firmeza y maleabilidad”, entonces alguien del público le preguntó: ¿cuánto peso podía resistir un puente fabricado con este material?, respondió que no sabía con certeza cuanto resistía dicha estructura, pero nos mostró una imagen en la que se podía ver un Jeep con tres personas a bordo cruzando el Puente Sibang de 22 metros de claro en Indonesia. Finalmente, a partir de esta experiencia fue que me decidí por estudiar y entender el comportamiento estructural de este recurso natural, de ahí la importancia de las conferencias y de los talleres que imparten las universidades para divulgar el uso de materiales sustentables entre la comunidad académica.



Agradecimientos

A mi esposa Yadira Sofía y a mis hijos Ángel y Sofí, por su apoyo incondicional para culminar este proyecto.

Al Tecnológico Nacional de México Campus Colima por darme la oportunidad de ingresar al programa de: Maestría en Arquitectura Sostenible y Gestión Urbana.

Al Dr. Arq. José Ricardo Moreno Peña por ser mi maestro y también mi director de tesis, gracias a su entrega y tenacidad logre concluir este trabajo en tiempo y forma.

Al M. Arq. Fidel Navarro por sus aportaciones e ideas que contribuyeron a mejorar el presente trabajo de investigación.

Al M.V.B. Ramón Aviña por ayudarme a definir la idea de estudiar el tema: el bambú como un elemento estructural a flexión.

Al Dr. Azael García, encargado del laboratorio de Mecatrónica de la institución quien asesoró el proceso de elaboración de los ensayos y la realización de los mismos.

Al Ing. Rogelio de Lira, productor de bambú y miembro fundador del Consejo Colimense del Bambú (BAMBUCOL), por la oportunidad brindada a mi persona para mostrarme, conocer y profundizar en el estudio del cultivo del bambú en el predio ubicado en “El Remudadero”, Comala, además de proporcionar el material para realizar los ensayos.

A la Dra. Gabriela Orozco del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) Unidad Tecomán, Colima, por la confianza depositada en mi para formar parte de la comisión para el diseño de la estructura de bambú que fue construida en el curso-taller “Construcción con especies mexicanas de bambú”.

Al Dr. Arq. Álvaro Hernández de la Universidad Veracruzana, quien fue invitado por la Institución para impartir la conferencia y taller de “Investigación básica del bambú: corte, preservación, secado y sistemas de conexiones”, además de fungir como contacto con las autoridades de la Universidad para gestionar mi estancia académica



en esa institución, misma que fue truncada por causas de la contingencia sanitaria en el país por Covid-19.

A mis maestros Dr. Santiago Arceo, Dras. Dora Angélica Correa, María Silvia del Roció Covarrubias, por contribuir con sus conocimientos y experiencias en clase.

Especial agradecimiento debo a la MGTI Ramona Evelia Chávez; jefa de la división de estudios de posgrado e innovación “DEPI” y al M.C. Arq. Peter Chung; coordinador de la MASGU, quienes me apoyaron con todos los aspectos administrativos que tuvieron lugar durante mi estancia en esta prestigiada institución.



Resumen

La razón de este trabajo fue contribuir con conocimientos de vigas de bambú compuestas con acero de refuerzo, para incrementar su desempeño estructural. Se examinó la documentación relacionada con el cultivo, manejo y uso de las especies nativas e introducidas en México, así como: conocimientos básicos de las vigas, características geométricas, normas y patentes. El tipo y enfoque de la investigación fue: aplicada, explicativa, cuantitativa, experimental y transversal. Para confirmar la hipótesis y los objetivos se trazó la metodología que contempló en su fase experimental tres etapas: 1ra. Investigación básica, 2da. Pruebas iniciales, cuya intención fue conocer el comportamiento del bambú sin refuerzo y 3ra. Pruebas finales con refuerzo, donde se consideraron: a.- Dos tratamientos: con acero interno o externo, b.- Tres factores: base, media y superior, c.- La resistencia como variable de respuesta y finalmente d.- Las vigas compuestas como unidad experimental. Se procedió al ensaye de 18 unidades experimentales obteniendo más de 14,000 datos. Con los resultados, para su análisis y discusión, se elaboraron gráficos de distribución normal y ojivas de distribución acumulada por cada factor y tratamiento. Se respondió a los cumplimientos de carácter general como: Los objetivos tanto de estudio como particulares, al igual que de la hipótesis y de carácter específico que se refiere a la investigación experimental, donde se concluyó que el culmo con acero en el interior presentó el mayor esfuerzo último permisible, le siguió el que tiene acero en el exterior y al final el culmo sin acero. Se aportó un nuevo enfoque al considerar el elemento en su totalidad como componente estructural, además de sus particularidades geométricas y físicas del material. Al igual se aportó que la viga compuesta es totalmente factible como parte de un sistema de cubierta.

Palabras clave:

Angustifolia; Bambú; Bambulosa; Culmo; Esfuerzos; Fatiga de materiales; Oldhamii; Viga.



Abstract

The reason for this work was to contribute with knowledge of bamboo beams composed of reinforcing steel, to increase their structural performance, the documentation related to the cultivation, management, and use of native and introduced species in Mexico was examined, as well as: knowledge basic of the beams, geometric characteristics, norms, and patents. The type and focus of the research were: applied, explanatory, quantitative, experimental, and transversal. To achieve the hypothesis and the objectives, the methodology that I contemplate in its experimental phase was drawn up in three stages: 1st. Basic research, 2nd. Initial tests, whose intention was to know the behavior of bamboo without reinforcement and 3rd. Final tests with reinforcement, where the following were considered: a.- Two treatments: with internal or external steel, b.- Three factors: base, medium, and superior, c.- Resistance as a response variable, and finally d.- Composite beams as an experimental unit. 18 experimental units were tested, obtaining more than 14,000 data. With the results, for analysis and discussion, normal distribution graphs and cumulative distribution warheads were made for each factor and treatment. It responded to the compliance of a general nature such as The objectives of both study and particular as well as the hypothesis and of a specific nature that refers to the experimental investigation where it was concluded that the culm with steel inside presented the greatest last effort permissible, followed by the one with steel on the outside and finally the culm without steel. A new approach was provided by considering the element in its entirety as a structural component in addition to its geometric and physical characteristics of the material. Likewise, it was contributed that the composite beam is feasible as part of a roof system.

Keywords:

Angustifolia; Bamboo; Beam; Bambulosa; Fatigue of materials; Oldhamii; Steam; Stresses.



I. Índice General

Capítulo 1. Generalidades.....	15
1.1 Planteamiento del problema.....	16
1.2 Justificación del tema de investigación	16
1.3 Hipótesis	17
1.4 Objetivos:	18
1.4.1. Objetivo General.....	18
1.4.2. Objetivos Particulares	18
1.5 Descripción del proceso metodológico (resumen de la metodología)	18
1.6 Alcances y limitaciones	19
Capítulo 2. Estado del Arte.....	21
Corte del bambú.....	33
Soluciones estudiadas	47
Vigas compuestas de dos o más culmos.....	47
Bambulosa.....	48
Capítulo 3. Metodología aplicada	50
3.1 Enfoque y tipo de estudio.....	50
3.2 Área del estudio	50
3.3 Población y muestra.....	51
3.4 Determinación de variables.....	51
3.5 Técnicas de recolección de datos. Segunda etapa.....	52
Pruebas iniciales con vigas simples	53
Pruebas iniciales con vigas compuestas	54
3.6 Técnicas de procesamiento de datos. Segunda etapa.....	55
3.7 Técnicas de recolección de datos. Tercera Etapa.	59
3.8 Técnicas de procesamiento de datos. Tercera etapa.....	65
Capítulo 4. Resultados obtenidos.....	71
4.1 Discusión de resultados	71
Análisis de resultados por factor base.	77
Análisis de resultados por factor medio	79
Análisis de resultados por factor superior	82



Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones.....	85
De carácter general.....	85
Sobre el objetivo del estudio.....	85
Con relación a los objetivos particulares.....	85
Sobre el cumplimiento de la hipótesis.....	86
De carácter específico.....	86
Sobre el enfoque teórico metodológico.....	86
Importancia de los resultados obtenidos.....	87
Aportaciones.....	92
Recomendaciones para continuar con la investigación en lo futuro.....	93
Nuevas preguntas de investigación.....	94
Referencias Bibliográficas.....	95
ANEXOS.....	96
Anexo 1. Artículo para revista.....	97
Anexo 2. Gráficas prueba inicial:.....	102
Anexo 3. Gráficas prueba final:.....	103
Anexo 4. Prototipo: diseño y fabricación de adaptador metálico para la cama de pruebas de flexo-compresión en vigas.....	112



II. Índice de tablas

Tabla 1. Partes del culmo. Fuente: Autor.	30
Tabla 2. Métodos de secado. Fuente: CONAFOR.	35
Tabla 3. Agentes destructores. Fuente: CONAFOR.....	36
Tabla 4. Durabilidad. Fuente: CONAFOR.	37
Tabla 5. Métodos de preservación. Fuente: CONAFOR.	38
Tabla 6. Esfuerzos permisibles: NTC de madera del RC de la CDMX.....	42
Tabla 7. Fórmulas para calcular el momento de inercia y el módulo de sección. Fuente: autor.....	45
Tabla 8. Fórmulas para calcular el módulo de sección "Sx" en vigas compuestas. Fuente: E100 Bambú.	46
Tabla 9. Diseño Completamente al Azar: oldhamii de 9 cm de Ø.	52
Tabla 10. Propiedades geométricas: culmo de bambú de ≈ 2" de Ø.....	56
Tabla 11. Carga y flecha máxima: Culmo de bambú ≈ 2".	56
Tabla 12. Propiedades geométricas: Culmo de bambú ≈ 3", tramo de 0 a 1 metro. .	56
Tabla 13. Carga y flecha máxima: bambú de ≈ 3" de Ø.....	57
Tabla 14. Propiedades geométricas viga c/acero interior de ≈ 2" de Ø.....	57
Tabla 15. Carga máxima y flecha viga c/acero interior de ≈ 2" de Ø.....	58
Tabla 16. Propiedades geométricas viga con acero exterior de ≈ 2" de Ø.....	58
Tabla 17. Carga y flecha máxima: viga c/acero exterior Culmo de bambú ≈ 2".	58
Tabla 18. Registro de pesos: después del corte, secado y % de reducción de peso.	62
Tabla 19. Diámetros exteriores. Bambusa oldhamii.	63
Tabla 20. Diámetros interiores, Bambusa oldhamii.	63
Tabla 21. Registro de los valores correspondientes a la carga y deformación máxima de las 18 probetas.....	71
Tabla 22. Módulos de sección calculados a partir de los Diámetros del culmo.....	72
Tabla 23. Tabla de fatigas máximas (último esfuerzo).	75
Tabla 24. Distribución normal de esfuerzos: factor base.....	77
Tabla 25. Distribución acumulada de esfuerzos: factor base.	78
Tabla 26. Distribución normal de esfuerzos: factor medio.....	80
Tabla 27. Distribución acumulada de esfuerzos: factor medio	81



Tabla 28. Distribución normal de esfuerzos: factor superior.....	82
Tabla 29. Distribución acumulada de esfuerzos: factor superior.	83

Índice de figuras

Figura 1. Especies de bambú por Entidad Federativa. Fuente: Rodríguez et al.	25
Figura 2. Distribución mundial del bambú. Fuente: Wikipedia.....	28
Figura 3. Partes del bambú. Fuente: reserchgate.net	30
Figura 4. Corte y curado. Fuente: CONAFOR.....	33
Figura 5. Métodos de secado. Fuente: CONAFOR.	36
Figura 6. Métodos de preservación natural y química. Fuente: CONAFOR.....	38
Figura 7. Norma Técnica Colombiana NTC 5525.....	40
Figura 8. Cable y arco. Fuente: Tremari, 1981	43
Figura 9. Ménsula o voladizo. Fuente: Tremari, 1981.	43
Figura 10. Viga simplemente apoyada con carga concentrada a mitad del claro. Fuente: Tremari, 1981.....	44
Figura 11. Diagrama de esfuerzos por flexión. Fuente: Tremari, 1981.	44
Figura 12. Momento de Inercia en vigas. Fuente: Tremari, 1981.....	46
Figura 13. Sección compuesta de tres culmos. Fuente: E-100 Bambú.....	47
Figura 14. Vista esquemática de una viga compuesta presforzada. Fuente: Kaltia. .	48
Figura 15. Sistema estructural para pisos y techos. Fuente: Kaltia.....	49
Figura 16. Prensa hidráulica y monitor.....	53
Figura 17. Prueba #2: culmo de $\approx 3"$ de \emptyset	54
Figura 18. Prueba #1: culmo de bambú de $\approx 2"$ de \emptyset	55
Figura 19. Viga con acero interior, culmo de bambú de $\approx 2"$ de \emptyset	57
Figura 20. Culmo de bambú de $\approx 2"$ \emptyset con acero exterior.	58
Figura 21. Vista aérea de Remudadero. Fuente: Google Earth.	59
Figura 22. Corte de culmos: especie oldhamii.....	60
Figura 23. Etapa inicial de secado. Oldhamii de $\approx 4"$ \emptyset	60
Figura 24. Etapa final de secado: Oldhamii $\approx 4"$ de \emptyset	61
Figura 25. Obtención del peso, antes y después del proceso de secado	62
Figura 26a, b, c y d respectivamente. Fabricación de probeta con acero interior.	64



Figura 27a, vista superior y b, vista inferior respectivamente. Fabricación de probeta con acero exterior.....	65
Figura 28. Adaptador metálico para la realizar las pruebas de flexión.	66
Figura 29. Condición de inicio para ensayar cada una de las probetas.	66
Figura 30. La pantalla muestra la carga y la deformación máxima: ensaye 1BI.	67
Figura 31. La pantalla muestra la carga y la deformación máxima: ensaye 2BI.	67
Figura 32. Comparación de las probetas: 1BI y 2BI.	68
Figura 33. La pantalla muestra la carga y la deformación máxima: ensaye 3ME.....	69
Figura 34. La pantalla muestra la carga y la deformación máxima: ensaye 1SE.	69
Figura 35. Diagrama de Cuerpo libre. Fuente: blog de estática weebly.	74
Figura 36. Diagrama de clasificación de resultados.	76
Figura 37. Curva de distribución normal: factor base.	78
Figura 38. Ojiva de distribución acumulada: factor base.	79
Figura 39. Curva de distribución normal: factor medio.	80
Figura 40. Ojiva de distribución acumulada: factor medio.	81
Figura 41. Curva de distribución normal: factor superior.	83
Figura 42. Ojiva de distribución acumulada: factor superior.	84
Figura 43. Ojiva de distribución acumulada: factor base.	88
Figura 44. Ojiva de distribución acumulada: factor medio.	89
Figura 45. Ojiva de distribución acumulada: factor superior.	90
Figura 46. Esfuerzos máximos permisibles.	92



Capítulo 1. Generalidades

Actualmente en el país, aumenta la desertificación con la deforestación de los bosques esto se debe a varios factores: tala clandestina, incendios forestales, crecimiento de las ciudades, etc. Desde la antigüedad, el hombre utiliza la madera para: cocinar sus alimentos, calentar y construir sus viviendas, fabricar sus muebles, etc., pero además los bosques son necesarios porque proporcionan oxígeno y absorben el bióxido de carbono. Los niveles de dióxido de carbono a partir del siglo 20 se han incrementado debido a la combustión de hidrocarburos, y esto es una de las causas del calentamiento global. Un árbol maderable como el pino, necesita entre 20 o 30 años para aprovecharlo óptimamente. Además, cuando tamos un árbol, en realidad aniquilamos a un ser vivo.

El bambú puede restarle presión a nuestros bosques porque es un recurso forestal renovable, absorbe más bióxido de carbono y libera más oxígeno que otras plantas. Debido a estas características, disminuye considerablemente el efecto invernadero y limpia el aire. No requiere fertilizantes ni agua de riego. Tiene un sistema de rizomas amplio y resistente que evita la erosión del suelo, además algunas especies son comestibles y ricas en nutrientes (son similares a las papas). Algunas especies de bambú pueden sobrevivir más de 120 años. Es la planta de más rápido crecimiento. De 3 a 5 años se pueden aprovechar sus culmos para: la construcción, la fabricación de papel, la confección de ropa, biocombustible, bebidas, filtrar aguas residuales, etc.

Algunas especies de bambú, se pueden utilizar para la construcción de estructuras: ligeras, ecológicas y sismo resistentes. Las vigas son elementos horizontales que soportan cargas perpendiculares a su eje. La experiencia ha demostrado que la combinación de materiales nos proporciona elementos más resistentes.

La propuesta de este trabajo es implementar una viga compuesta con dos materiales, bambú con acero de refuerzo, para optimizar sus propiedades a flexo-compresión.

Existen 11 géneros de bambúes y 39 especies en el país, la especie *Guadua aculeata* es originaria de Puebla. La especie *Guadua angustifolia* es una especie originaria de Sur América (Colombia, Ecuador y Perú) y es considerada una de las especies más



resistentes. La especie *Bambusa oldhamii* es originaria de china, adaptable al clima frío. Las tres especies antes mencionadas son consideradas estructurales, de acuerdo a las Normas Técnicas Complementarias de Madera del Reglamento de Construcción de la Ciudad de México.

En el predio del Remudadero, ubicado en el Municipio de Comala, se cultivaron 40 hectáreas de bambú de esta especie. Este predio pertenece al Consejo Colimense del Bambú, BAMBUCOL, la cual es una agrupación de productores que le apostaron al bambú, comprometiendo recursos (tierras, capital y trabajo) para ser pioneros en la producción de bambú en el estado.

Las aplicaciones del bambú en la construcción son limitadas en México, sin embargo en otros países, principalmente en Sudamérica y sudeste asiático, se utiliza ampliamente. Las vigas en México usualmente son de concreto armado o perfiles de acero. El bambú es un material ecológico, económico y sismo-resistente.

1.1 Planteamiento del problema

El bambú es material ideal para soportar grandes esfuerzos a la tensión (acero vegetal) y a la compresión axial (concreto). Debido a estas características se le utiliza principalmente en estructuras que trabajan solamente a tensión o compresión. Las cerchas o armaduras de bambú son estructuras formadas por triángulos planos o tridimensionales.

Las vigas de bambú también soportan grandes esfuerzos a la flexión pero presentan una deformación (flecha) significativa. Este trabajo propone implementar vigas de bambú compuestas, reforzadas con varillas corrugadas de acero para proporcionarle: a.- mayor capacidad de carga, b.- ductilidad a la viga al presentarse la falla por flexión y c.- eliminar el comportamiento frágil de la pieza, además se trata de que estos elementos estructurales sean visualmente estéticos, para que formen parte de un sistema estructural empleado en elementos horizontales.

1.2 Justificación del tema de investigación

En las últimas décadas las soluciones habitacionales con tecnologías foráneas no siempre se han adaptado a las necesidades locales, no han contado con diseños



urbanos, arquitectónicos, estructurales que se adapten al sitio, en general son soluciones descontextualizadas de las necesidades de los nativos del lugar, los programas de vivienda propuestos han generado costos que no siempre fueron accesibles a las familias con escasos recursos económicos. Dichos programas estuvieron orientados al uso y aplicación de concreto y acero, su impacto ambiental fue muy alto, según datos publicados por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). El CO₂ derivado de los procesos industriales de piedra caliza, dolomita y hierro para producir cemento y acero respectivamente, se incrementó en 102.3%, de 1990 al 2010.

En el país se generó una alta producción de vivienda por autoconstrucción alcanzando un 64.1%, según datos de la Sociedad Hipotecaria Federal en el 2019, cifra que equivale a que 6 de cada 10 viviendas se construyeron bajo estas condiciones, éstas son deficientes debido a la carencia de asistencia técnica y de oferta en tecnologías alternativas sustentables de construcción que puedan ser accesibles y de bajo costo.

Debido a lo anterior, se respalda la propuesta de un sistema estructural que se adapte a las necesidades de los nativos, con materiales de la región cuyos procesos de producción minimizan las emisiones de CO₂ al medio ambiente, como es el caso del bambú que se produce en el municipio de Comala. Este trabajo se justifica al aportar una solución tecnológica concreta que promueve el uso del bambú como material para edificar viviendas dignas autoconstruidas, a través del diseño de un elemento constructivo prefabricado eficiente a esfuerzos de flexo-compresión, a base de una viga compuesta de bambú y con acero de refuerzo que sirve como sistema de soporte a losas de entrepiso y cubierta, resultando de bajo impacto ambiental, además se buscó dar respuesta de forma económica al uso de este recurso no maderable en el sector de la construcción, específicamente en el de la vivienda, que garanticen el confort y la seguridad estructural de sus habitantes.

1.3 Hipótesis

Dado que las características estructurales del bambú son similares a las de la madera, es posible diseñar una viga compuesta como parte de un sistema constructivo, que



permita soportar cubiertas horizontales y que al añadir acero de refuerzo en su interior incremente su capacidad de resistencia a la flexo-compresión, con la finalidad de ser utilizada en un sistema de cubierta plana.

1.4 Objetivos:

1.4.1. Objetivo General

Diseñar y construir una viga compuesta de bambú, con acero de refuerzo, para incrementar su desempeño a flexo-compresión con la finalidad de ser utilizada en un sistema de cubierta plana.

1.4.2. Objetivos Particulares

- Realizar gestión de vinculación mediante convenio con la asociación civil: Bambucol (Consejo Colimense del Bambú), organismo civil interesado en el producto de este trabajo de investigación.
- Visitar y conocer el manejo del cultivo del bambú en sus fases de: siembra, selección, corte, preservado y secado. (el Remudadero, Comala).
- Probar de manera preliminar el bambú simple con diferentes diámetros y especies para conocer su comportamiento a flexo-compresión.
- Probar de manera preliminar vigas compuestas de bambú con cable de acero en diferentes posiciones.
- Diseñar el número de pruebas siguiendo el método experimental al azar.
- Realizar y evaluar especímenes según el método experimental anterior.
- Analizar y discutir los resultados estadísticos obtenidos.

1.5 Descripción del proceso metodológico (resumen de la metodología)

Para lograr los objetivos planteados en este trabajo, la fase experimental se dividió en tres etapas, que comprenden en la primera, la investigación básica de la producción y adaptación del bambú en la zona norte del estado de Colima que considera la localización, sembrado, selección, corte, preservación y secado de las especies angustifolia, aculeata y oldhamii; la segunda etapa consistió en realizar pruebas iniciales de los culmos en su estado nativo e implementar un sistema de sujeción de cable de acero para introducirnos en el comportamiento estructural y, en la tercera



etapa, una vez conocido el comportamiento de los culmos, se procedió a realizar el diseño experimental que soportó este trabajo de investigación.

Primera etapa: la investigación básica comprende previamente de obtener las muestras, las condiciones de los culmos de las especies de bambú antes mencionadas, para su uso como material de construcción y estructural. La cosecha o el corte de los culmos, se determina por la época establecida por el Consejo Nacional Forestal CONAFOR, que se determina por la fase lunar adecuada, considerando el contenido de humedad. Para la selección por madurez se consideró la edad, los diámetros y apariencia de los mismos. Se realizó la preservación, secado y evaluación de tallos para la construcción de las muestras a ensayar.

La segunda etapa consistió en la elaboración de las muestras considerando diámetros de 2" y 3", sin ningún elemento adicional, solo tomando en cuenta el grado de secado. Adicionalmente, a otras muestras se les agregó el cable de acero de 1/8" semi tensado, posteriormente se procedió a realizar en una prensa hidráulica universal las pruebas de flexión en el laboratorio de mecatrónica del Instituto.

Tercera etapa. Se realizaron los prototipos que se obtuvieron como resultado del diseño experimental DCA (Diseño Completamente al Azar) utilizado dadas las características de este investigación, resultando 18 ensayos, considerando culmos de 4" de \emptyset promedio y mayores de 5 años de edad, estos representaron los comportamientos estructurales esperados en vigas de bambú con refuerzo de acero en dos posiciones. Una en el interior y otra en el exterior del culmo respectivamente.

1.6 Alcances y limitaciones

Por el tipo de investigación, experimentación y aplicación de conocimientos generados en el presente trabajo, los alcances son descriptivos; al desarrollar la fase de investigación básica del bambú, que comprende la edad, madurez, corte, selección, secado y proceso de preservado de las muestras para la experimentación, también son correlacionales; porque se emplean para determinar la relación de variables identificadas en la investigación básica y en la aplicación de los resultados de los diferentes ensayos de los prototipos como; contenido de humedad, espesor,



diámetros, resistencia a esfuerzos de trabajo o fatiga del material y finalmente son explicativos; porque el análisis de los resultados de las experimentaciones que se realizaron en la investigación, como las fatigas provocadas por los diferentes esfuerzos de trabajo, nos permiten confirmar la hipótesis planteada explicando el comportamiento y las capacidades con las que este material cuenta.

Las limitaciones encontradas en el desarrollo de esta investigación fueron en relación a la prensa universal empleada, por una parte el claro de prueba no permitía alojar el culmo mas el adaptador para aplicar la carga en cuatro puntos, y por otra, que no está diseñada para ejecutar el tipo de pruebas que requeríamos realizar, por lo que se tuvo que innovar con el diseño y fabricación de un soporte especial para adaptar la cama de prueba que permitiera llevar a cabo los ensayos de flexión.



Capítulo 2. Estado del Arte

Existe un modo de construir cuyo génesis es el momento en que el hombre crea su hábitat, no responde a estilos, no representa épocas, no necesita de arquitectos, son quienes las habitan los encargados de modelarlas, ha estado allí, testigo de la cultura de los hombres: la arquitectura vernácula. (González, 2010)

Tradicionalmente lo vernáculo de acuerdo a sus raíces se ha entendido como lo que pertenece y lo que es del sitio, además de la arquitectura puede haber otros aspectos, siempre referidos a la cultura.

La arquitectura vernácula es aquella que se constituye como la tradición regional más auténtica. Está arquitectura nació entre los pueblos autóctonos de cada región, como una respuesta a sus necesidades de hábitat. Lo que hace diferentes a estas edificaciones de otras, es que las soluciones adoptadas son un ejemplo de adaptación al medio. Esta arquitectura es realizada por el mismo usuario, apoyado por la comunidad y el conocimiento de sistemas constructivos heredados de sus pasados. Los parámetros para catalogar algo construido como arquitectura vernácula son:

- Ser expresión de una tradición constructiva ancestral.
- Que haya sido construido por nativos del lugar.
- Que se utilicen materiales locales.
- Que estos al cumplir su ciclo vital, sean devueltos sin riesgo o contaminación ecológica al propio suelo.
- Hay otros términos que se han empleado convencionalmente para hablar de la arquitectura vernácula que son por ejemplo: la arquitectura popular, espontánea, auto-construida, sin arquitectos, etc. Siendo todos estos términos válidos.

La arquitectura vernácula es un testimonio de la cultura popular, usando materiales y sistemas constructivos regionales de gran adecuación al medio por lo que se constituye un patrimonio enorme y de vital importancia que debe ser protegido y conservado, es el resultado de siglos de experimentación y por esta razón las



manifestaciones vernáculas son siempre temporales y adecuadas al clima, topografía, materiales de construcción desde el sitio y forma de vida de sus habitantes.

Las construcciones arquitectónicas como las vernáculas, brindan un carácter y estilo propio a cada zona y forman parte de la riqueza cultural del país. Son el resultado de las necesidades de los habitantes de cada lugar así como de sus costumbres y tradiciones. Elementos básicos en este tipo de arquitectura son: recursos forestales, la piedra y la tierra ya que no necesitan transportación debido a que se encuentra en abundancia en la mayoría de las zonas.

El uso del bambú en México tiene antecedentes prehispánicos: los totonacas en Veracruz, los huastecos en Hidalgo y Tamaulipas, los aztecas y teotihuacanos en el centro de México, los maya-chontales en Tabasco, han construido casas de bambú y lo siguen haciendo hoy en día. Por otra parte, la Arquitectura del Bambú en América se remonta a milenios, por su abundancia y por la facilidad para cortarlo, construir viviendas con él, y por las condiciones de frescura que este material proporciona en los climas cálidos húmedos, lo que hizo que en estos lugares se prefiriera sobre la madera. Desde entonces, ha sido utilizado en la construcción de viviendas especialmente en los climas cálidos-húmedos de los estados de Veracruz, Chiapas y Oaxaca, sin embargo, su utilización hoy en día se limita cada vez más solo a la construcción de cocinas o en el mejor de los casos, a la parte estructural de las cubiertas de tales viviendas, elementos que se terminan de cubrir con la palma. (Castillo, 2011).

El uso del bambú en México se encuentra restringido principalmente a la fabricación de muebles y construcciones rurales cercanas a la zona donde crece esta especie. La distribución geográfica de los bambúes, se presenta básicamente en las regiones tropicales y los estados con mayor número de especies son Chiapas, Veracruz y Tabasco. También en los estados de Jalisco y Michoacán se presenta un número importante de especies. Esto nos permite vislumbrar que en México se puede desarrollar el uso del bambú con muy buenas perspectivas, y que puede servirnos para aminorar el déficit de vivienda, en un principio en las zonas cercanas a donde crece el bambú. La información tecnológica sobre las propiedades físicas y mecánicas del



bambú en México prácticamente no existe. Por lo tanto es necesario desarrollar trabajos de investigación con el fin de subsanar estas deficiencias de información sobre las especies que crecen en México. Un trabajo de importancia y de gran utilidad consiste en clasificar los bambúes en grupos de acuerdo con su potencial aplicación (muebles, construcción, tableros, papel, etc.); por ejemplo, aquellas especies con propiedades mecánicas más altas se recomendarían para la construcción de estructuras. Es conveniente, por lo tanto realizar este tipo de trabajos de investigación básica, además de los relativos a pruebas de elementos estructurales como muros, sistemas de cubierta y armaduras, campo en el cual tendría un impacto importante. Generar información en el área de la construcción les daría elementos a los dueños del recurso para obtener mayores beneficios económicos. (Ordóñez Candelaria, 1999).

El bambú se utilizaba como material para la construcción de viviendas por los pobladores nativos de la región antes de la conquista, fue considerado por los españoles como un material para los pobres, lo que provocó el desánimo de la población mestiza en su uso. Los indígenas siguen construyendo sus viviendas con bambú. La arquitectura española no influyó de manera significativa en la indígena por lo que se conservaron las características prehispánicas de acuerdo a cada región. La tipología de la choza indígena trascendió durante toda la época colonial hasta nuestros días. (INFONAVIT L. V., 1998).

En la huasteca; es el nombre de una región en México que comprende el norte de Veracruz, el sur de Tamaulipas y partes de los estados de San Luis Potosí e Hidalgo; en mucho menor medida comprende algunas zonas del estado de Puebla, la estructura y los muros de la vivienda de arquitectura vernácula es de bambú. En algunos casos, los muros son de bambú u otate (como se le conoce en la región) entretejido y enjarrado con barro, a esta técnica se le conoce como bajareque y en otros son aparentes o sea sin enjarrar para permitir la ventilación e iluminación. (López morales, 1987).

El bambú tiene algunas ventajas. Su flexibilidad lo hace antisísmico. Ya hay experiencias. En Costa Rica, durante el terremoto en Puerto Limón de 1991, las únicas



viviendas que resistieron fueron las construidas con bambú. Otra ventaja más: las viviendas de bambú aíslan del frío, del calor y del ruido por las cámaras de aire que forman los troncos de bambú. Los troncos de bambú también se utilizan para hacer paneles prefabricados, que resultan más resistentes, flexibles y livianos que los convencionales. Y una ventaja decisiva: su costo. La construcción convencional, para alcanzar un aspecto presentable, requiere de una inversión que oscila entre los \$3,800-5,300 pesos por cada metro cuadrado construido. Para alcanzar el mismo buen aspecto, el bambú sólo requiere entre \$1,100-1,500 pesos por metro cuadrado (El bambú como material de construcción, 2015) Las necesidades de vivienda de la población mundial se duplicarán mediados del presente siglo, en el caso de África se triplicará. El bambú se convierte en una alternativa para la revertir el déficit de vivienda por su bajo costo y su buen comportamiento estructural en zonas sísmicas, adicionalmente al utilizar este recurso forestal como material de construcción, le restamos carga a los bosques. Más de mil millones de personas en el mundo habitan en viviendas de bambú, la población actual es de más de siete mil millones, es el caso de Bangladesh, país del sureste asiático densamente poblado donde el 73% de sus habitantes residen en casas de bambú. Otro ejemplo es la ciudad de Guayaquil en Ecuador, donde el 50% de su población también habita en casas hechas por este material. (Romo, 2006).

El cultivo del bambú dado su rápido crecimiento ayuda a frenar la deforestación, así mismo favorece la restitución del suelo y cambio climático. Actualmente existe un problema serio de deforestación en el país, provocando el aceleramiento de la desertificación. Por otro lado, la madera es un recurso indispensable para el ser humano, desde la antigüedad se ha utilizado como leña para calentar agua, preparar alimentos, calentar el hogar, fabricar muebles, construir casas, etc. Además su industrialización genera fuentes de trabajo, por ejemplo: en estructuras y cimbras para la construcción, para la producción de diferentes tipos de papel, fabricación de muebles, etc. La madera es un recurso forestal renovable pero lento, un pino necesita más de 20 años para que se pueda aprovechar todo su potencial.



Comparado con las especies maderables, los bosques de bambú captan más agua y bióxido de carbono (Camargo et al 2010). Las plantaciones de *Guadua* pueden funcionar como sumideros de CO₂. Los cambios en la capacidad de fijación dependen de la edad de la plantación, del crecimiento y de la madurez de los culmos, esto aunado a su rápido crecimiento y al hecho de que no necesita de un sistema de riego, lo vuelve una alternativa viable para frenar la deforestación, ayudando a revertir el cambio climático; coadyuvando al desarrollo sustentable de las comunidades.

El municipio de Comala se encuentra en la parte norte del Estado de Colima, en las faldas del Volcán de Fuego, donde sus condiciones climáticas, han sido favorables para el cultivo del bambú. Debido a la creciente demanda de este recurso natural se conformó el Consejo Colimense del Bambú, integrado por investigadores, artesanos, arquitectos y productores que han arriesgado parte de sus recursos y reservas territoriales para probar la producción de la especie de bambú *Guadua angustifolia*, de origen centroamericano y considerada una de las más resistentes del mundo.

En la República Mexicana según Rodríguez, et al., (2009) se encontraron especies de bambú en 23 de las 32 Entidades Federativas, sin embargo la mitad de ellas se concentra en sólo 4: Chiapas 17%, Veracruz 14%, Oaxaca y Guerrero con 13 y 6 % respectivamente”.

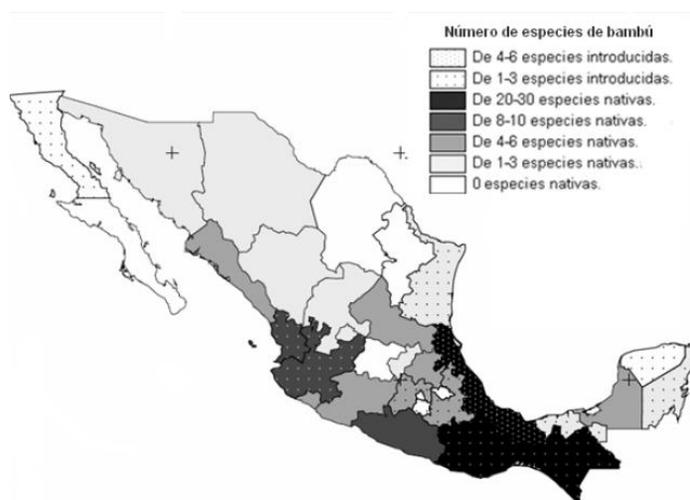


Figura 1. Especies de bambú por Entidad Federativa. Fuente: Rodríguez et al.



De las especies de bambúes que crecen en México sobresalen las llamadas comúnmente Guaduas, cañizo y caña brava, representados en México por el género *Guadua*, con cinco especies nativas: *aculeata*, *amplexifolia*, *longifolia*, *paniculata* y *velutina*. Estas especies se distribuyen principalmente en la zona central del país y en zonas cálidas, encontrándose naturalmente en selvas húmedas, a orillas de ríos y arroyos. Otro género muy abundante y nativo con características leñosas es el *otatea*, la especie *acuminata* es la más utilizada por las poblaciones rurales, con sus tallos se construye el bahareque (mezcla de sus tallos con lodo y zacate) utilizado en paredes de vivienda tradicional, en Jalisco y Veracruz.

Botero et al, (2009) plantea que dadas las características de la especie de bambú *Guadua angustifolia*, se puede adaptar a la región noreste del estado de Colima, ayudada por sus condiciones climáticas similares. La *Guadua* crece óptimamente en sitios cuya altura sobre el nivel del mar va desde los 0 a los 1800 metros, precipitaciones entre 1200 y 2500 milímetros anuales, temperaturas entre 18° y 25° centígrados y humedad relativa superior al 70%. (Condiciones similares a las que pueden encontrarse en el Estado de Colima). Se adapta a otras condiciones extremas y fuera de los rangos antes mencionados pero su desarrollo no es ideal. No aguanta condiciones de sequía prolongadas. Los suelos ideales para su desarrollo son aquellos ricos en materia orgánica, bien drenados, de textura franco arenosa, areno-limosa, arcillosa y franco-limosa. A pesar de preferir las orillas de los ríos y quebradas, se encuentra en óptimas condiciones en sitios con pendientes y alejados de fuentes de agua.

Forero, et al, (2005) comentan en investigaciones realizadas en el Centro Nacional para el Estudio del Bambú - *Guadua* en el departamento del Quindío, donde se presentan condiciones óptimas para el desarrollo de la *Guadua* (temperatura 25 °C; 1240 msnm.; precipitación 2242 mm/año; brillo solar 1757 horas/luz/año).

La mayoría de las personas piensan que la idea de aprovechar el bambú se le ocurrió a algún grupo primitivo originario del sureste Asiático, pero no es del todo correcta esa afirmación. Estudios arqueológicos demostraron que en la región central de la cordillera de los andes, actualmente: Colombia, Ecuador y Perú, se usaba la *Guadua*



o caña (nombre actual del bambú en esa región del mundo), desde tiempos remotos. No obstante, el gigante asiático (República Popular China) fue el primero en industrializar este recurso forestal e incide de manera importante en su economía pues se tienen registrados más de mil productos diferentes como: alimentos, bebidas, combustibles, conglomerados, laminados, papel, ropa, etc.

En nuestro país la caña, otate o tarro (nombre del bambú en nuestra región) se usa en regiones donde crece de manera natural principalmente por comunidades rurales. Las comunidades de esas regiones lo usan para la construcción de casas, cubiertas, muebles, artesanías y utensilios.

Si bien se tiene amplio conocimiento sobre los bambúes, se necesitan investigar más en varios temas como son: propagación, manejo, corte, secado, preservado, propiedades estructurales, etc.

Las plantas leñosas tienen alto contenido de lignina, la lignina es una sustancia natural que proporciona resistencia y dureza a las células vegetales. Los bambúes leñosos son más resistentes a la tensión y compresión que algunas especies de madera, sus fibras lignificadas pueden resistir hasta 12 ton/cm² a la tensión paralela al eje longitudinal. (Víctor Ordóñez, 2002). Sin embargo, los bambúes tienen menos resistencia al cortante en el sentido transversal a su eje longitudinal.

El bambú o los bambúes son plantas de la familia de las gramíneas (Poaceae) o pastos. Algunos son herbáceos y otros son leñosos.

Los herbáceos apenas sobrepasan el metro de altura y los tallos son delicados como de medio centímetro de diámetro. Los leñosos alcanzan hasta 60 m de alto y 30 cm de diámetro cerca de la base.

Desarrollan varios culmos (cañas o tallos) al año. Algunos son rectos pero la mayoría presentan una ligera curvatura, la cual se aprecia más en las puntas, los primeros tallos son delgados, los hijos de esos tallos son más gruesos que los padres, los nietos son todavía más gruesos y así sucesivamente hasta llegar a un diámetro máximo según la especie, crecen de adentro hacia afuera, crecen de forma radial pero algunas especies



crecen de forma lineal y se consideran invasivas. Existen más de 1,000 especies y más de 90 géneros en el mundo, existen especies nativas en las regiones tropicales y subtropicales de América, Asia, África y Oceanía, se desarrollan fácilmente en zonas donde se registran temperaturas cálidas y porcentajes de humedad del 80% o superiores con precipitación pluvial de media a alta. Existen evidencias fósiles de la presencia de bambúes en Europa en tiempos remotos pero de acuerdo a una teoría, se desaparecieron debido a las capas de hielo de los glaciares que extendieron por todo el continente.

Se distribuyen desde los 46° de latitud norte hasta los 47° en el hemisferio sur, y desde el nivel del mar hasta 4 000 metros de altura en los Andes ecuatoriales. (Rodríguez, 2000) Ver figura 2.

En el continente americano hay más de 300 especies nativas, las cuales crecen en algunos estados sureños de la Unión Americana, en 23 estados de la República Mexicana, en américa central y el caribe, hasta Chile en el hemisferio sur.

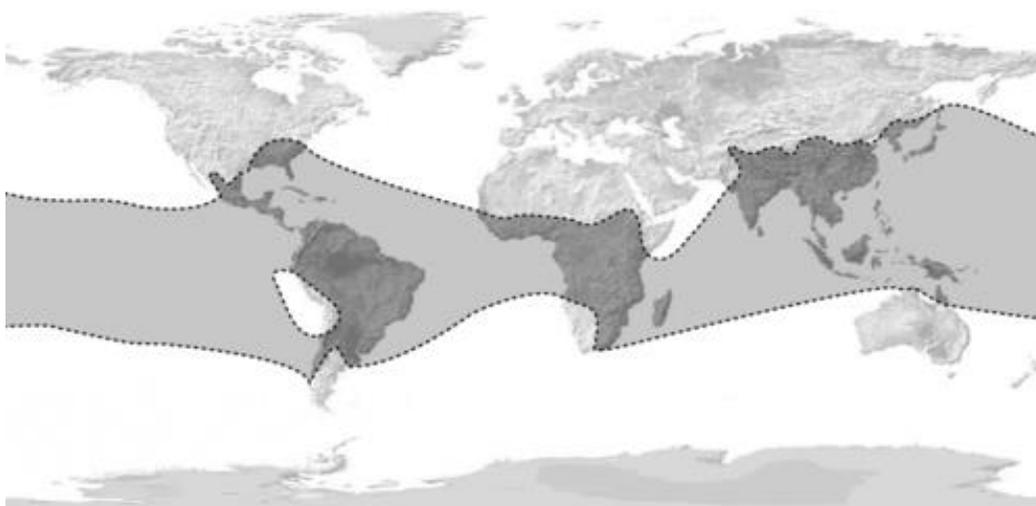


Figura 2. Distribución mundial del bambú. Fuente: Wikipedia.

Los bambúes presentan un culmo o tallo (también llamado caña) y se diferencian por presentar raíces y ramas. Los culmos son estructuras cilíndricas y huecas. El diámetro con el que emerge del suelo se mantiene durante toda su vida, la fibra alcanza su resistencia entre los 3 y 6 años.



Algunos culmos son casi rectos, otros presentan una curva o dos, esta se puede acentuar en la punta. Algunos géneros tienen espinas como las Guaduas, otros no tiene espinas como las Bambusas.

Algunos tiene rizomas (raíces) gruesos (paquimórfico: no invasivo), los cuales crecen en forma agrupada o aglutinada, otros tienen rizoma delgado (leptomórfico: invasivo) crecen lateralmente de forma indefinida.

De acuerdo a su morfología, el bambú está constituido por las siguientes partes: rizoma, culmo, nudo, entrenudo, diafragma, pared. (Barrera, 2002). 20 metros es la altura promedio del bambú de la especie *Guadua angustifolia*, una especie estructural, nativa de Sudamérica.

- Rizoma: de 0 a -2 m. Es un tallo modificado, subterráneo, que da soporte y tiene la función de almacenar nutrientes para distribuirlos a toda la planta y es parte básica para la propagación de los bambúes. Se utiliza para estabilizar las laderas y prevenir la erosión. Algunas especies son comestibles y son ricas en nutrientes.
- Culmo: También se le conoce como tallo o popularmente como caña. En la figura 3. Se pueden observar las partes del culmo, de abajo hacia arriba son: cepa, basa, sobrebasa, varillón y copo.
- Nudo: Es la división entre nudos, el cual nos indica que se encuentra un diafragma en el interior del culmo. En los nudos nacen las yemas, las cuales se convertirán en ramas y de estas brotarán hojas, éstas tienen diferentes formas dependiendo la especie y sirven para obtener energía a través de la fotosíntesis.
- Entrenudo. Parte del culmo que está delimitada por los nudos. Cerca de la base los entrenudos son más cortos que en el resto del culmo.
- Diafragma: Pared delgada que se localiza en el nudo y divide por dentro el culmo en partes más o menos iguales.
- Pared: Es el grosor del anillo del culmo. Entre más grueso tendrá mayor resistencia a los esfuerzos de tensión o compresión.



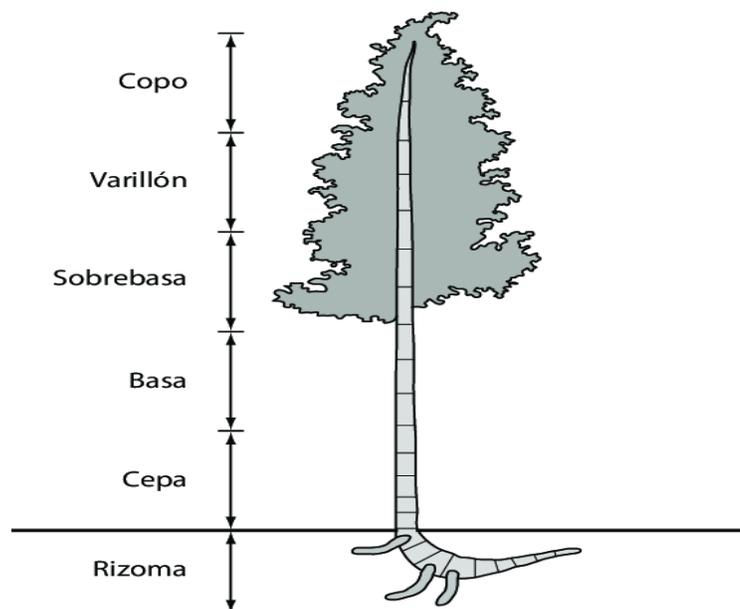


Figura 3. Partes del bambú. Fuente: reserchgate.net

En la tabla 1. Se observan algunas características de las partes que forman un culmo de la especie angustifolia, su cepa tiene sus entrenudos son muy cortos, es la más resistente y se utiliza en la construcción como columna. Correspondiendo a esta los primeros tres metros.

CONCEPTO	CEPA	BASA	SOBREBASA	VARILLON	COPO
ALTURA m	0 a 3	3 a 11	11 a 15	15 a 18	18 a 20
LONGITUD m	3	8	4	3	2
ENTRENUDOS	MUY CORTO	CORTO	MEDIO	LARGO	MUY LARGO
RESISTENCIA	>>>>	>>>	>>	>	NULA
UTILIDAD	COLUMNA	TRABE LATILLA	VIGA ESTERILLA	CORREA	NULA

Tabla 1. Partes del culmo. Fuente: Autor.

La propagación del bambú dependiendo la especie estriba de su floración que se presenta en intervalos de tiempo prolongado, en algunas puede tardar más de 100 años, razón por lo cual puede ser la única durante toda la vida de la planta. En algunas, la floración se da al mismo tiempo aun estando en diferente continente.



La posibilidad de propagar bambúes por semilla no es un método práctico. Como es raro obtener semillas, los bambúes se propagan vegetativamente (asexualmente) por medio de rizomas, segmentos de culmo, segmentos de rama o “chusquines” o brotes pequeños del rizoma (Botero Cortés, 2009). Algunas técnicas utilizadas para propagar el bambú son: Trasplante de Rizomas, Segmentos de culmo o rama y chusquines (plántulas). Este último, es el método de propagación de mayor éxito por lo que es el más recomendado por su alto índice de supervivencia y desarrollo.

A continuación describiremos las características principales de tres especies de bambú consideradas como estructurales de acuerdo a las Normas Técnicas Complementarias de Madera del Reglamento de Construcción de la CDMX.

1. *Guadua aculeata*. Especie nativa de México, también conocidas como: tarro, caña, otate o caña brava. Presenta espinas en todas las ramas, sus culmos son de 10 a 15 m de altura, su diámetro es de 10 a 15 cm. Los culmos son rectos, arqueados en la punta o parte superior, los entrenudos inferiores tienen una longitud de 26 cm de largo y 15 cm de diámetro, los superiores de 50 cm de largo y 7 cm de diámetro, con paredes hasta de 2 cm de espesor. Esta especie crece de manera natural en Puebla, Tamaulipas y Veracruz, también encontramos esta especie en la región de Centroamérica. Se desarrollan en suelo arcilloso-arenoso en la selva o en lugares cercanos a estas, a partir del nivel del mar a 800 m. La floración de esta especie se ha presentado en los estados de Veracruz y Puebla, la cual se desempeña con mayor vigor en terrenos de baja altura respecto al mar, mucha humedad y ricos en nutrientes. En las comunidades rurales la utilizan para la construcción de casas; muros de bahareque (entre tejido de cañas con tierra y paja), empalizadas, tejabanos, fabricación de muebles, utensilios y también tiene usos medicinales.
2. *Guadua angustifolia*. Especie introducida de Sudamérica: (Ecuador, Colombia y Perú). Conocida en Ecuador como caña, en Perú como guayaquil y en Colombia como Guadua. Las alturas alcanzadas son de 6 a 20m (raramente 30m) metros y diámetros máximo 20 cm según el hábitat donde se encuentren (suelo, clima, etc.). El tiempo que tarda en desarrollarse es de aprox. 4 o 5 años.



Distancia entrenudos de 7 a 10 cm. en la base y de 25 a 35 cm. en el medio. Espesores de 2 a 2.5 cm en el medio y de 1,5 cm en los extremos. Distribución natural de la especie. Es nativa de Colombia, Venezuela y Ecuador. Fue introducida en México en 1995, procedente de viveros de Colombia. Hábitat. Entre los 0 y 2000 msnm, formando Guaduales; principalmente ésta ubicado a la orilla de ríos, quebradas, piedemonte de cordilleras, en bosques montanos medio y bajo, y en valles interandinos. Varios registros de floraciones esporádicas están documentados, que indican que es probable que el ciclo de florecimiento de esta especie sea de 32 a 35 años. Esta especie utiliza principalmente en Ecuador, Colombia y Perú, el cual es emplea como elemento estructural para la construcción de diversas estructuras como; puentes, casas uno o dos niveles, escuelas, museos y cubiertas para espacios públicos. También se utiliza en la fabricación de muebles y artesanías.

3. *Bambusa oldhamii*. Especie introducida del sureste asiático: (China). Conocida como bambú gigante o bambú de Oldham. Crecen en los meses más calurosos del año, sus hojas tienden a ser largas y tolera temperaturas de hasta -7°C . Es uno de los bambúes de crecimiento más recto, sin ramas bajas y cañas verde musgo muy uniformes. No invasivo. Crece de 6 a 18 m de altura en buenas condiciones, y puede tener un diámetro de 6 a 12 cm, con entrenudos de 30 a 40 cm de largo, los culmos son huecos entre los nodos con paredes de 1 cm de espesor. Es originaria de la isla de Taiwán y del sur de China. Crece mejor en las regiones húmedas tropicales y subtropicales y en aquellas con clima templado cálido con altas temperaturas de verano y particularmente inviernos suaves, en condiciones menos favorables, la velocidad de crecimiento y la altura disminuyen. Necesita pleno sol y no es particular a un tipo de suelo, siempre que drene y tenga una amplia disponibilidad de agua, en particular en los climas con veranos largos, cálidos y secos. Se reproduce por semilla, se pone superficialmente en un suelo de drenaje mantenido constantemente húmedo a la temperatura de $22-24^{\circ}\text{C}$, con tiempos de germinación variables, hasta algunos meses, por división, con un mínimo de tres tallos y micro propagación. En la fabricación de pisos laminados, en la construcción, en la



artesanía, decoración, barreras rompe vientos, elaboración de invernaderos, etc.

Corte del bambú

La luna es el astro que tiene mayor influencia gravitacional en la tierra. La luna tiene varias fases: luna llena, cuarto-menguante, luna nueva y cuarto-creciente. Durante el cuarto menguante (fase en la cual la superficie de la luna se va reduciendo) se recomienda realizar el corte. Durante esta fase lunar, disminuye la actividad biológica de la planta, es decir sube menos cantidad de líquido a través del culmo.

Por otro lado se deberá realizar el corte durante la madrugada pero por falta de visibilidad se recomienda hacerlo muy temprano (Ver figura 4) porque al avanzar el día, se incrementara la función clorofílica de la planta o fotosíntesis, proceso por medio del cual las plantas convierten la materia inorgánica en materia orgánica, con la energía que aporta la luz.

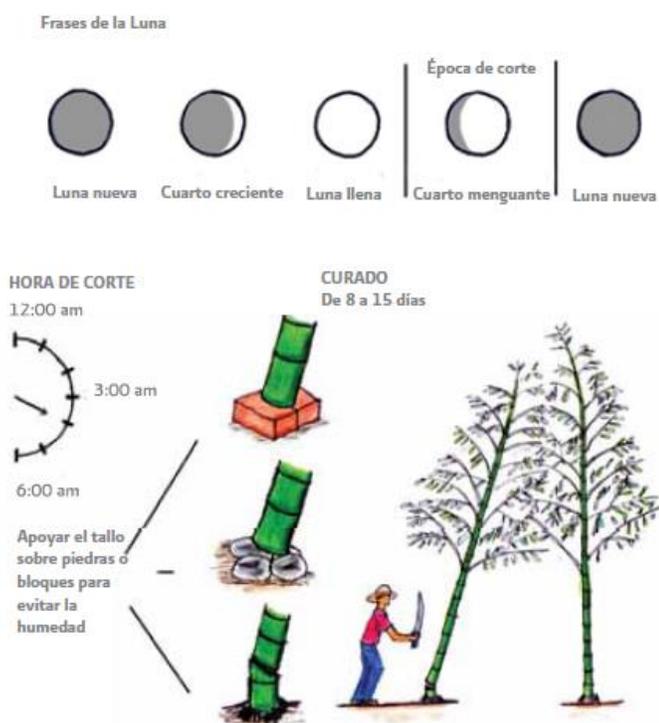


Figura 4. Corte y curado. Fuente: CONAFOR.



El corte se puede realizar con una segueta, deberá ser ligeramente inclinado y por encima del primer nudo o del segundo a partir del suelo, es importante evitar que se estanque el agua en la base del culmo o tocón porque puede provocar pudrición en el rizoma (raíz) por exceso de humedad.

Después del corte se realiza el curado o avinagrado, los culmos se recargan en la misma cepa o macolla de bambúes y se apoyan sobre una piedra o bloque para aislarlo de la humedad, sin quitarle las ramas ni sus hojas, durante 2 semanas o más dependiendo de las condiciones meteorológicas del lugar. Mediante este procedimiento de preservación natural, se reducen los porcentajes de humedad en el culmo, los líquidos remanentes en las paredes del culmo se trasladan hacia las hojas pasando por las ramas. También se reducen los almidones y los azúcares, estos últimos se descomponen en alcohol, limitando el ataque de microorganismos e insectos. Si se pretende realizar la preservación química no debe de realizar este procedimiento.

El método tradicional de secado, es utilizado en la actualidad, en diferentes partes del mundo por los descendientes de los pueblos originarios de las regiones donde se da el bambú en abundancia y de manera natural. Este método es económico, no requiere de aparatos ni de trabajadores altamente preparados.

Después de cortar y curar los culmos, estos se llevan a un área de secado, la cual debe contar con una cubierta y piso firme (de concreto) con pendiente suave, la cubierta sirve para proteger a los bambúes del sol y el piso es para evitar encharcamientos de agua. Estos deberán de separarse entre sí, en posición vertical u horizontal para permitir la libre circulación del aire.

Esto se puede lograr utilizando caballetes. Se recomienda girar una o dos veces al día los culmos para que el secado sea uniforme.

Mediante este proceso los culmos pierden agua, razón por la cual pierden más de la mitad de su peso, sufren de una ligera contracción, (lo cual puede originar rajaduras en la pared del culmo), e incrementan su resistencia hasta en un 50%, al finalizar el secado, los bambúes son más ligeros y más resistentes, de ahí importancia del realizar este paso.



Este proceso puede durar hasta 2 meses. Las secciones basales tienen más contenido de agua que las puntas, razón por la cual al tener mayor contenido de humedad son más pesadas y tardarán más tiempo en secar.

De acuerdo a las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Madera, el bambú se considerará seco cuando su contenido de humedad sea menor o igual al 18%, si es mayor se considera húmedo.

Básicamente en el proceso intervienen dos variables: temperatura y ventilación. En el área de secado se incrementará la temperatura con ayuda del sol, el agua contenida en el culmo pasará del estado líquido al gaseoso (vapor de agua) y este será removido de la superficie con ayuda del viento que sopla en la región.

Se recomienda utilizar para la construcción en general, bambúes secos, para evitar que la contracción o dilatación pueda provocar deformaciones o rajaduras futuras en los elementos estructurales.

Además del método tradicional, existen métodos artificiales de secado, en la tabla 2, se describen dichos métodos.

Tipos de secado	Descripción	Ventajas o desventajas	Tiempo
Tradicional	Los culmos se separan entre sí para permitir la circulación del viento, se requiere de una cubierta y piso firme para protegerlos del sol y la humedad.	Al terminar el proceso el bambú pierde hasta el 60% de su peso húmedo, y se detectan probables grietas en las paredes.	2 meses.
Horno abierto	Los culmos se ponen horizontalmente y se giran constantemente para que el secado sea parejo. Se usa carbón como fuente de calor.	Si no se tiene experiencia se puede quemar o rajar el culmo. Además los culmos estarán a 50 cm de altura a partir de la cama de carbón.	Menos de 2 meses.
Horno cerrado	Los culmos, se ponen verticalmente, se puede utilizar bambú seco como leña para la combustión.	El humo tizna las paredes, suministrándoles protección contra los microorganismos e insectos.	3 semanas, durante 24 horas al día.
Horno solar	Se aprovecha la energía solar y la ventilación para aumentar la temperatura y el flujo de aire. La ventilación es mecánica.	Mediante este procedimiento se disminuye el riesgo de rajaduras en las paredes.	4 semanas.

Tabla 2. Métodos de secado. Fuente: CONAFOR.



En la figura 5, se pueden observar gráficamente de izquierda a derecha los métodos de secado: tradicional, horno abierto, horno cerrado y horno solar.

Los culmos formaban parte de una planta por lo que si no se tratan químicamente quedan vulnerables al ataque de mohos, hongos, escarabajos y termitas, como se puede ver en la tabla 3, existen condiciones en las cuales proliferan estos agentes destructores, que le restan durabilidad al bambú.

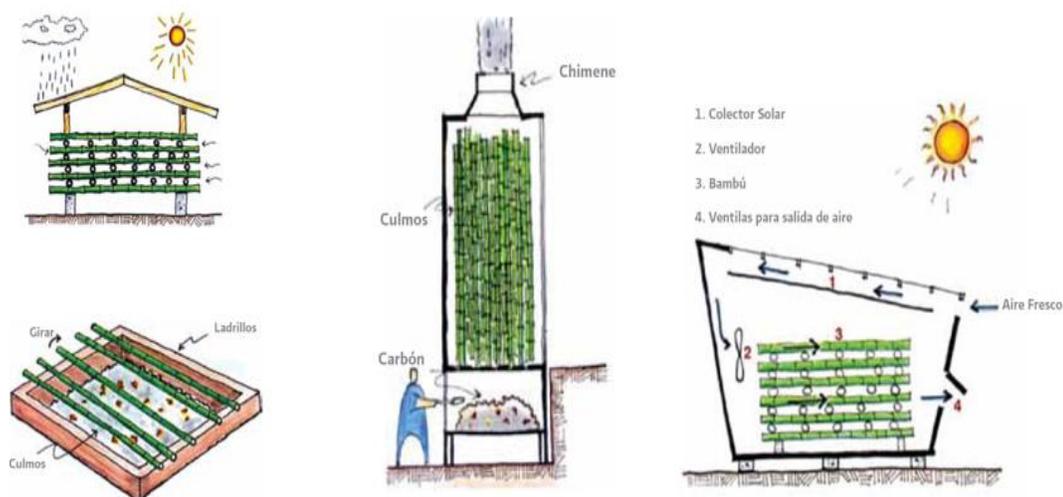


Figura 5. Métodos de secado. Fuente: CONAFOR.

El procedimiento de preservación química se debe de realizar 36 horas después del corte porque si se efectúa después del tiempo establecido los conductos por donde circula el agua se constriñen y se obstruyen el paso de cualquier fluido.

Agente	Tipo de destrucción.	Condición de proliferación.
Moho	Mancha la pared externa del culmo, dándole mal aspecto a su apariencia física, pero el moho se puede retirar usando una fibra de metal para lavar trastes, una vez que termine el proceso de secado.	En lugares con húmedos.
Hongo	Pudren la pared del culmo, modificando sus propiedades químicas y físicas, mermando su resistencia.	En culmos con contenido de humedad de 27% a 32% y con temperaturas mayores a 12 °C.
Insectos	Los escarabajos y las termitas se alimentan del culmo, formando cavidades en su pared interna que es más blanda que la externa, debilitando su resistencia.	En culmos cortados y usados en la construcción, con alto contenido de almidón y en lugares con mucha humedad.

Tabla 3. Agentes destructores. Fuente: CONAFOR.



El método de remojo o inmersión es de bajo costo, el cual consiste en preparar una solución (mezcla homogénea de una o dos sustancias disueltas en agua), de bórax y ácido bórico al 2% o más, esto significa que por cada 100 litros de agua debemos de agregar 2 kilos de cada sal, durante 2 o 3 días. Se recomienda calentar el agua para disolver completamente las sales al momento de preparar la mezcla.

Las sales de CCA (cobre, cromo y arsénico), se utiliza para tratar la madera y se pueden emplear para tratar el bambú, pero se deberá tener cuidado por los riesgos que implica su manejo y daño ecológico.

Para usar los culmos como elementos estructurales en la construcción, se deberán curar o preservar químicamente, para resistir el ataque de las plagas. Los culmos preservados pueden durar muchos años.

Además del curado o del tratamiento químico, las estructuras de bambú deben de tener un buen diseño arquitectónico, es decir, cubiertas con aleros grandes para protegerlas de los rayos directos del sol y de la lluvia, así como aislarlas de la humedad del suelo, mediante zapatas aisladas o corridas de piedra o de concreto. Razón por la cual se dice en el medio, que las estructuras de bambú, deben de tener buenas botas y un gran sombrero. El bambú es un material 100% natural, biodegradable, su durabilidad natural es baja, ver Tabla 4.

Condición	Durabilidad del bambú (años)
En agua	< de 1
A la Intemperie	1-3
Bajo cubierta	4-7
Circunstancias favorables	10-15

Tabla 4. Durabilidad. Fuente: CONAFOR.

Los culmos se desintegran con el paso del tiempo, aun estando embebidas en elementos de concreto, razón por la cual, los elementos estructurales deben de estar a la vista, para que puedan ser reemplazados, una vez concluida su vida útil, la cual no supera los veinte años.



Los métodos de preservación con sustancias químicas son más eficaces que los tradicionales, pero son más costosos, además requieren de mecanismos especiales para su ejecución, en la tabla 5, se describen tres métodos de preservación natural y tres de química, en la figura 6 se pueden observar algunos métodos de preservación natural y química.

Tradicionales o naturales		Con sustancias químicas	
Remojo	Se remojan los culmos de 1 a 3 meses, en el lecho de un río, la corriente de agua, reduce la cantidad de almidón y azúcar, después de sacarlos, se inicia el proceso de secado.	Por los extremos	Los culmos recién cortados, aún con ramas y hojas se colocan en posición vertical dentro de un recipiente, el preservador químico, es succionado por las hojas.
Encalado	Se pintan los culmos, con cal, para absorber la humedad y reducir el ataque de hongos para prolongar su vida útil.	Tanque abierto	Los culmos recién cortados, se sumergen en una solución de agua con bórax y ácido bórico al 2%, de 3 a 4 días. Esta penetra por los extremos y se distribuyen por difusión.
Diseño Constructivo	Este método consiste en proteger a la estructura de bambú por medio de un gran sombrero y buenas botas.	Boucherie	Se sustituye el contenido de agua con preservador, en culmos recién cortados, por gravedad o presión neumática. Es el método más efectivo.

Tabla 5. Métodos de preservación. Fuente: CONAFOR.

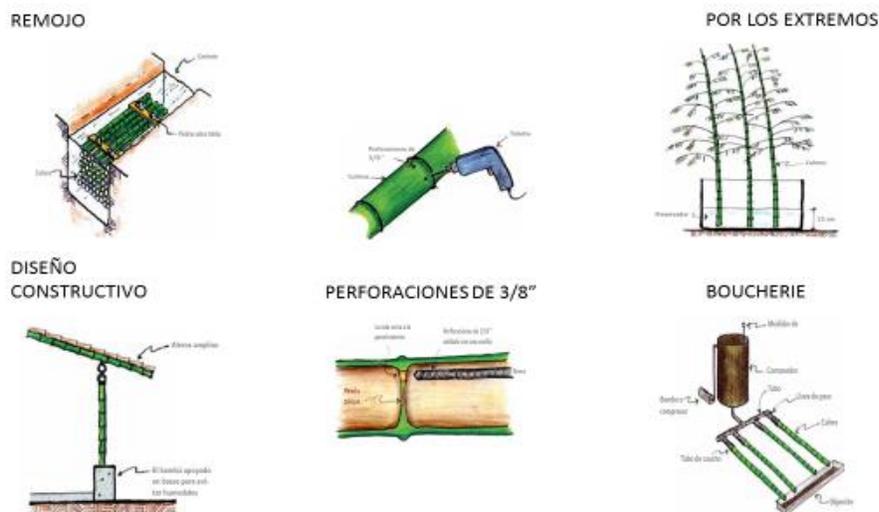


Figura 6. Métodos de preservación natural y química. Fuente: CONAFOR.



El bambú es la planta de mayor crecimiento, por ejemplo, la especie *Guadua angustifolia*, crece hasta 21 cm en 24 horas y en un mes logra el 80% de su altura final. Alcanza su madurez de 4 a 6 años mientras que un pino tarda aproximadamente de 20 a 24 años. Se pueden cosechar anualmente hasta el 50% de los culmos ya maduros por cada cepa, su aprovechamiento no provoca deforestación porque la cepa tiene brotes nuevos constantemente, en cambio al aprovechar las especies maderables, estas mueren irremediablemente por tratarse de un solo individuo.

Los bambúes se pueden sembrar en lugares donde se presentan fuertes ráfagas de viento con la finalidad de formar barreras naturales que debiliten la fuerza de este, además sus rizomas tienen la peculiaridad de afianzarse fuertemente al terreno, evitando la erosión del suelo y la probabilidad de que se presenten derrumbes o deslaves. Cuando sus hojas maduran y caen al suelo, se forma una capa rica en materia orgánica, la cual transforma las características físicas del terreno. Los bosques en general absorben el CO₂, el cual es un gas del efecto invernadero, pero la captura de CO₂ y la producción de oxígeno es cuatro veces mayor que en las especies maderables.

Una cepa de bambú, a partir del cuarto o sexto año, tendrá culmos maduros con diámetros mayores a 9 cm que se pueden utilizar como elementos estructurales para la construcción en general. Cada año se pueden cosechar hasta 50% de los culmos de una cepa, durante un periodo de tiempo ilimitado (300 años). El bambú se puede emplear en vez de la madera, en actividades tan diversas como: construcción, producción de papel, confección de ropa, bio combustible, industria farmacéutica, bebidas y alimentos, filtros para el tratamiento de aguas negras, etc. con esto se lograría reducir la sobre explotación de los bosques. Esto además generaría nuevos empleos en las regiones dedicadas a la producción y comercialización de este recurso forestal. Además por ser un material ecológico, al terminar su vida útil, este se puede reintegrar fácilmente a la naturaleza.

El costo para producir bambú es relativamente bajo, las plantaciones no requieren de agua de riego, aunque para periodos de estiaje muy prolongados si puede comprometer la adaptabilidad de la planta, se recomienda sembrar en época de lluvia,



no requiere de fertilizantes, es importante realizar una o dos intervenciones (podar) por cepa por año.

Las tres desventajas del bambú como material para la construcción son su durabilidad, su inflamabilidad y forma. En primer lugar para contrarrestar el ataque de los insectos y de las plagas se requiere de sales o de químicos para su preservación al igual que la madera. En segundo lugar, es más vulnerable al fuego que la madera, esto se debe a que su forma es circular y hueca por lo que sus paredes son relativamente delgadas, situación que no ayuda en caso de presentarse un incendio y por último, por tratarse de un material natural, los culmos son no son rectos como los tubos, además su sección transversal es variable.

El bambú soporta grandes esfuerzos a la compresión y tensión en dirección longitudinal a su eje es decir en dirección paralela a la fibra, comparable con el acero o concreto. Las estructuras de bambú por ser ligeras, tienen buen comportamiento ante los sismos.

Para realizar la prueba a flexión, se aplica una carga puntual en el centro de la viga, esta se reparte en dos, hacia las monturas ubicadas en los extremos. Las monturas nuevamente reparten la carga en dos, obteniendo al final cuatro cargas puntuales, por esta razón a la prueba se le llama flexión en cuatro puntos. Para evitar la falla por aplastamiento, la superficie de contacto tanto de las monturas como de los apoyos deberá ser curva (Ver figura 7). En los soportes, se debe permitir que el culmo rote libremente. (Norma Técnica Colombiana NTC 5525, 2018)

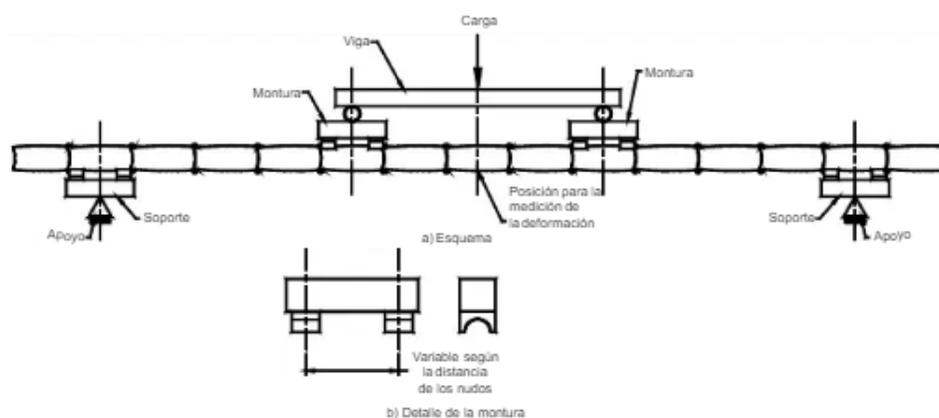


Figura 7. Norma Técnica Colombiana NTC 5525.



Fórmula para calcular el esfuerzo (fatiga) f_m de una viga:

$$f_m = \frac{M}{S} \leq f'_m \quad \text{Ecuación.1}$$

En donde:

f_m = esfuerzo a flexión actuante en kg/cm^2

f'_m = esfuerzo admisible en kg/cm^2

M = momento actuante sobre el elemento en $\text{kg}\cdot\text{cm}$

S = módulo de sección en cm^3

El módulo de sección S , para un culmo de bambú, se expresa con la siguiente ecuación.

$$S = \frac{\pi(D_e^4 - [D_e - 2t]^4)}{32D_e} \quad \text{Ecuación 2.}$$

En donde:

S = módulo de sección en cm^3

D_e = diámetro promedio exterior del culmo en cm .

t = espesor promedio de la pared del culmo en cm .

La ecuación 1 y 2 se obtuvieron de la Norma Técnica E.100 Bambú, 2012, del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento del Perú.

En las Normas Técnicas Complementarias de madera Para Diseño y Construcción de Estructuras de Madera del Reglamento de construcción de la CDMX 2017, se considera bambú seco a la que tiene un contenido de humedad igual o menor que 18 %; y bambú húmedo aquel cuyo contenido de humedad es superior a dicho valor. Para la construcción de estructuras de bambú se debe utilizar únicamente bambú seco. En el capítulo 6 de las normas técnicas antes mencionadas, en la tabla 2.2.9., mostrada en la tabla 6, proporciona valores específicos de resistencia para diseñar estructuras con bambú, las especies consideradas como estructurales por dichas



normas son: *Guadua aculeata* (especie nativa de México), *Guadua angustifolia* (especie nativa de: Colombia, Ecuador y Perú) y *Bambusa oldhamii* (especie introducida de China). Observando la tabla se pueden afirmar lo siguiente: la flexión es la deformación que presenta una viga de bambú en dirección perpendicular a su eje longitudinal. La especie *Bambusa oldhamii* tiene un esfuerzo permisible a la flexión f_{fu} de 340 kg/cm², por lo tanto es la especie de bambú más óptima para trabajar como viga.

Esfuerzos	Unidad		Aculeata	Angustifolia	Oldhamii
Flexión	(kg/cm ²)	f_{fu}'	235	260	340
Tensión paralela a la fibra	(kg/cm ²)	f_{tu}'	210	370	590
Compresión paralela a la fibra	(kg/cm ²)	f_{cu}'	170	240	205
Cortante paralelo a la fibra	(kg/cm ²)	f_{vu}'	30	18	25

Tabla 6. Esfuerzos permisibles: NTC de madera del RC de la CDMX.

La tensión paralela a la fibra, consiste en aplicar y medir la tracción de las fibras del bambú, hasta provocar su ruptura, la especie *Bambusa oldhamii* resiste (590 kg/cm²), por lo tanto esta especie de bambú se puede emplear como tensor. Razón por la cual se le conoce al bambú como el acero vegetal.

La compresión paralela a la fibra, consiste en aplicar y medir la compresión a las fibras de bambú, hasta su ruptura, la especie *Guadua angustifolia* tiene más resistencia a la compresión (240 kg/cm²), por lo tanto esta especie se puede emplear como columna.

Cortante paralelo a la fibra, cosiste en aplicar y medir la fuerza cortante a las fibras de bambú, hasta provocar su ruptura, la resistencia al cortante es el talón de Aquiles del bambú, la *Guadua aculeata*, es la que presenta más resistencia al cortante (30 kg/cm²).

El comportamiento de los elementos lineales es a flexión, tienen como función principal canalizar las cargas a los puntos de sustentación, todos los elementos lineales son estructuras resistentes unidireccionales, ya que poseen la propiedad de transferir las cargas en una sola dirección. Ver figura 8.



De la forma y características del elemento estructural, dependerá la transferencia de la carga, que puede desarrollar diversas acciones internas en el elemento. Las fuerzas pueden ser trasladadas mediante pares o momentos como es el caso de la viga y el pórtico.

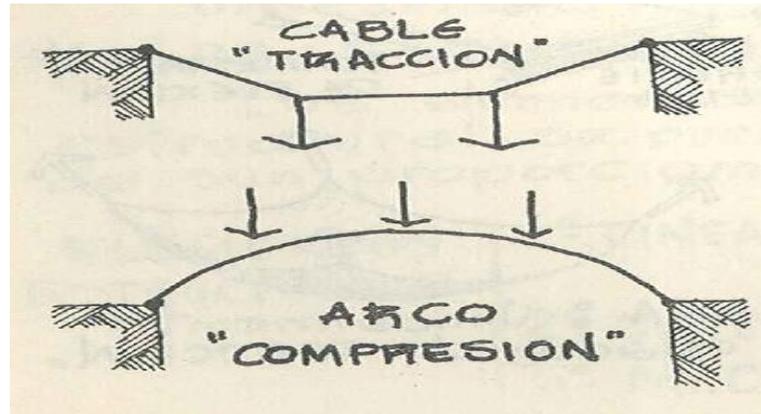


Figura 8. Cable y arco. Fuente: Tremari, 1981

En una ménsula o voladizo el momento de empotramiento genera un par que permite trasladar la carga al apoyo. Ver figura 9.

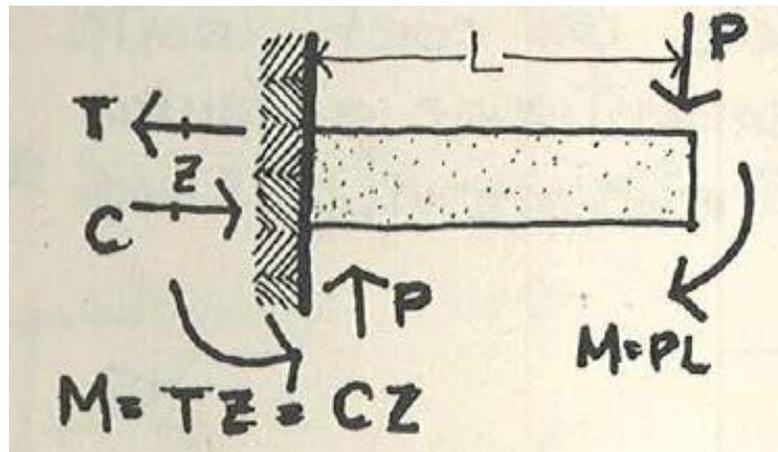


Figura 9. Ménsula o voladizo. Fuente: Tremari, 1981.

En una viga simplemente apoyada, el traslado de la fuerza se efectúa a través del par interno desarrollado en el elemento. Ver figura 10.



De los ejemplos anteriores se deduce que en un momento dado, la flexión puede tomarse como un mecanismo estructural que permite trasladar cargas verticales en dirección horizontal.

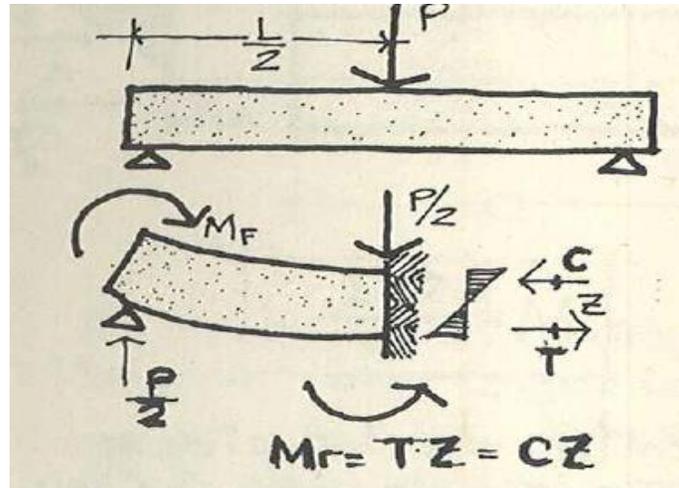


Figura 10. Viga simplemente apoyada con carga concentrada a mitad del claro. Fuente: Tremari, 1981.

Se busca que los esfuerzos generados por la flexión no sobrepasen valores a los que se ha introducido un coeficiente de seguridad para garantizar el buen comportamiento del elemento.

La capacidad resistente de la pieza dependerá de la mayor separación (z) de las componentes del par interno. Ver figura 11.

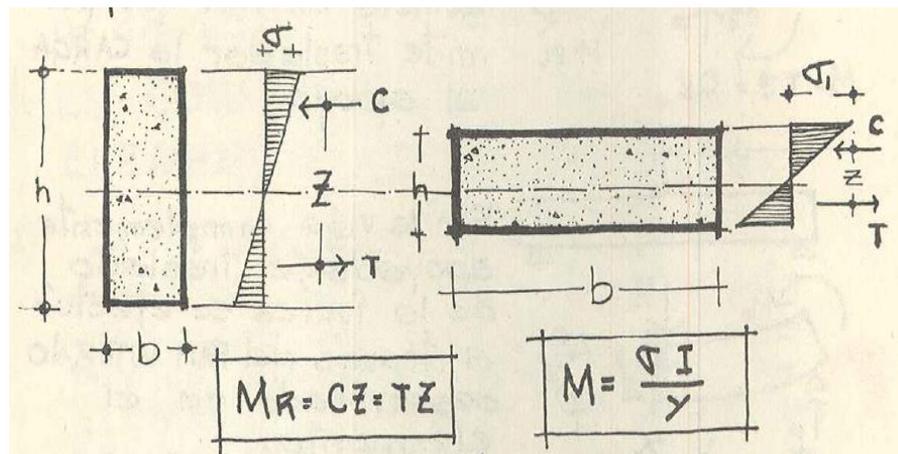


Figura 11. Diagrama de esfuerzos por flexión. Fuente: Tremari, 1981.



Momento de Inercia en X	Área	Momento de Inercia	Modulo de Sección en X
	$A = bh$	$I_x = \frac{bh^3}{12}$	$S_x = \frac{bh^2}{6}$
	$A = bh$	$I_x = \frac{bh^3}{12}$	$S_x = \frac{bh^2}{6}$
	$A = bh$	$I_x = \frac{bh^3}{12}$	$S_x = \frac{bh^2}{6}$
	$A = \frac{\pi D^2}{4}$	$I_x = \frac{\pi D^4}{64}$	$S_x = \frac{\pi D^3}{32}$
	$A = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4}$	$I_x = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64}$	$S_x = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32D}$

Tabla 7. Fórmulas para calcular el momento de inercia y el módulo de sección. Fuente: autor.

En la tabla 7, se puede observar que la fórmula, para calcular el momento de inercia S_x , de una sección cuadrada, es igual a la de una sección rectangular.

El módulo de sección S_x de un cuadrado o rectángulo, se obtiene al dividir el momento de inercia I , entre $h/2$ (es distancia vertical del centroide hacia el borde superior o inferior del cuadrado o rectángulo).

Para un rectángulo, en posición vertical, por ejemplo: $b=10\text{cm}$ y $h=20\text{cm}$, su módulo de sección es de 666.66 cm^3 y en posición horizontal, por ejemplo: $b=20\text{cm}$ y $h=10\text{cm}$, su módulo de sección " S_x " es de 333.33 cm^3 .

En el caso de las traveses de sección rectangular, la altura o el peralte, es lo que le da mayor resistencia a la flexión a estos elementos estructurales.

En el caso de una sección circular, por ejemplo: $D=10\text{cm}$, el módulo de sección se obtienen de dividir el momento de inercia I entre $D/2$. Su módulo de sección " S_x " es de 98.17 cm^3 .

En el caso de una sección tubular ($D=10\text{cm}$ y $d=9\text{cm}$), el modulo se sección " S_x "= 33.76cm^3 .



Por lo tanto, se observa que al comparar el módulo de sección circular vs tubular, el segundo disminuye considerablemente.

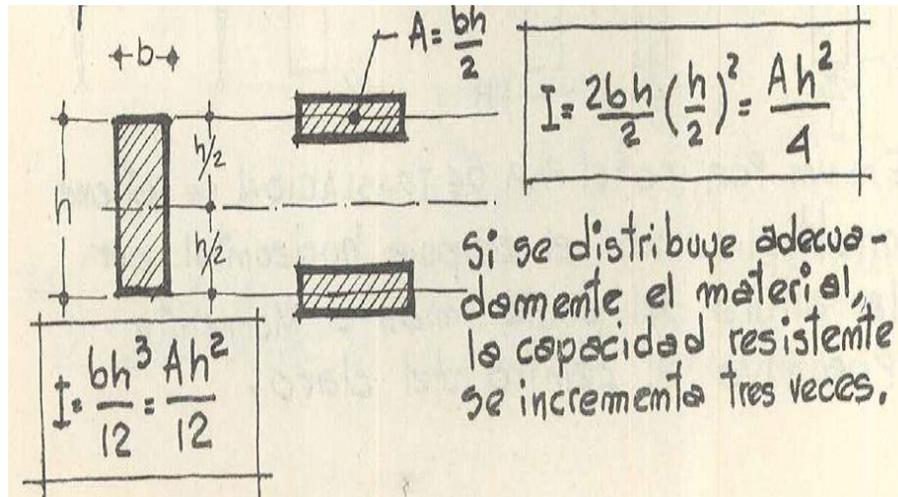


Figura 12. Momento de Inercia en vigas. Fuente: Tremari, 1981.

Son más resistentes las piezas en las cuales, la mayor parte del material, queda lo más retirada posible del baricentro de la sección. (Tremari, 1981).

Momento de Inercia en X	Dimensión en cm	Modulo de Sección en X
	$D_e = 10$ $t = 0.5$	$S_x = \frac{\pi(D_e^4 - (D_e - 2t)^4)}{32D_e}$
	$D_e = 10$ $t = 0.5$	$S_x = \frac{\pi(5D_e^4 - 4D_e^2(D_e - 2t)^2 - (D_e - 2t)^4)}{32D_e}$
	$D_e = 10$ $t = 0.5$	$S_x = \frac{\pi(35D_e^4 - 4D_e^2(D_e - 2t)^2 - (D_e - 2t)^4)}{96D_e}$

Tabla 8. Fórmulas para calcular el módulo de sección "Sx" en vigas compuestas. Fuente: E100 Bambú.

En la tabla 8 se muestran las fórmulas para calcular el módulo de sección "Sx" en vigas compuestas por dos o tres culmos. Estos se apilan verticalmente. Por ejemplo



considerando un \varnothing de 10cm y un espesor de 0.5 cm, considerando únicamente un culmo Sx es de 33.76 cm³, considerando dos culmos Sx es de 108.38 cm³ y considerando tres culmos Sx= 1,017 cm³. Lo anterior significa que al incrementar el número de culmos, el módulo de sección incrementa significativamente y por lo tanto aumenta su capacidad de carga.

Soluciones estudiadas

Vigas compuestas de dos o más culmos.

La Norma Técnica E.100 del Perú, propone vigas compuestas de dos o más culmos, para soportar sistemas de entrepiso y de azotea. Estas vigas se unen (transversalmente, una por encima de la otra) utilizando varillas roscadas, mínimo a $\frac{1}{4}$ de longitud por cada pieza. Se pueden unir (longitudinalmente) dos culmos con diámetros similares, para obtener claros más grandes. Dichas uniones se pueden hacer con madera, metal (solera) o bambú. (Ver Figura 13). Las Normas Técnicas Complementarias de madera del Reglamento de la Ciudad de México no recomiendan este tipo de vigas porque hasta el momento no hay conexiones que transmitan con eficiencia esfuerzos cortantes horizontales debidos a la flexión.

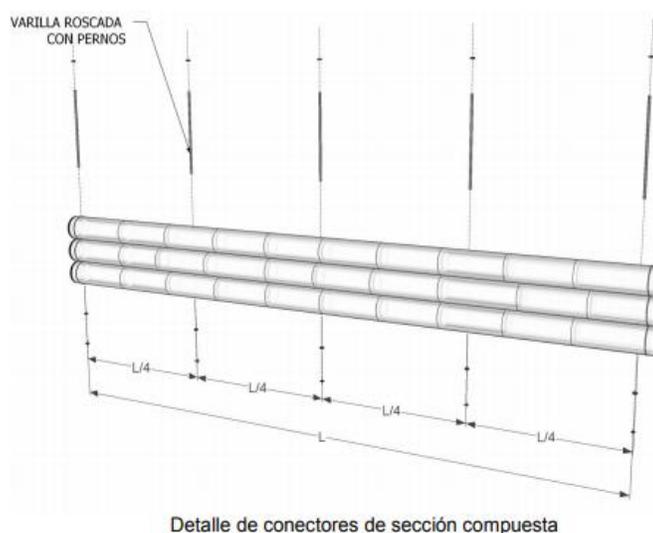


Figura 13. Sección compuesta de tres culmos. Fuente: E-100 Bambú.



Bambulosa

La patente (WO 2016122302 A1) consiste en un sistema prefabricado para la construcción de entre pisos y cubiertas, este fue desarrollado en México por Kaltia: empresa dedicada al diseño y construcción de estructuras, consta de un conjunto de vigas presforzadas de bambú colocadas en paralelo para soportar losas de entrepiso o de cubierta. (Google patents: WO2016122302A1, 2016)

A la viga, ver figura 14, se le añade una solera de acero que pasa por debajo de la misma, esta se atornilla en ambos extremos del culmo y en medio del claro se sujetan ambos elementos mediante un tubo (vástago), este mecanismo impide la deformación de la viga en dicho punto (flecha).

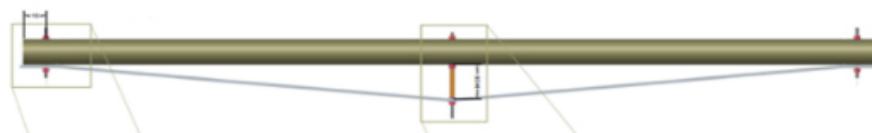


Figura 14. Vista esquemática de una viga compuesta presforzada. Fuente: Kaltia.

El sistema se basa en la disposición en un arreglo en paralelo de un conjunto de vigas compuestas presforzadas, que dan soporte a una cubierta compuesta por capas de cualquier material. Las vigas compuestas son elementos formados por tramos de culmos de bambú, elementos de acero y rellenos de mortero u otros materiales, dispuestos en forma tal que permiten obtener la máxima eficiencia mecánica.

El objetivo primordial de la presente invención consistió de un sistema estructural para la construcción de pisos y techos, que se encuentra soportado por un arreglo en paralelo de vigas compuestas presforzadas. Cada viga está constituida por dos regiones: a) la región superior y b) la región inferior, las cuales toman la compresión y la tensión, respectivamente.

La cubierta se conforma de un diafragma de una o varias capas de cualquier material que proporcionan los acabados de la región superior e inferior del sistema. El diafragma transfiere las cargas que actúan sobre el techo o piso a las vigas compuestas arriostrando o proporcionando una restricción a las deformaciones en el



plano de diafragma tal como se define en el sistema de pisos, ya que hace trabajar a las columnas o muros de apoyo en conjunto y proporciona a las vigas compuestas resistencia ante un pandeo lateral.

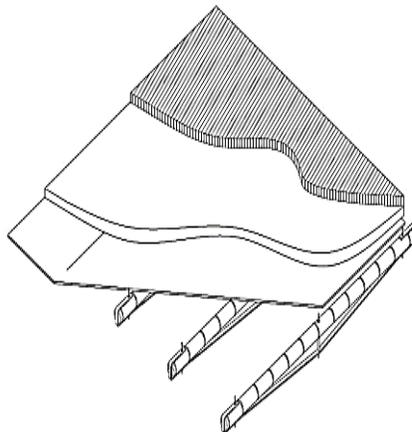


Figura 15. Sistema estructural para pisos y techos. Fuente: Kaltia.

Proporciona como consecuencia del arriostramiento, la uniformidad en las deformaciones, debido a que las cargas se pueden transferir a los elementos de soporte de la estructura, traveses, muros, columnas, entre otros.

Proporcionar a las capas de acabado superior e inferior, funciones estéticas, acústicas y térmicas.

Empieza vigas compuestas presforzada que están constituidas por piezas cuya configuración geométrica busca la mayor eficiencia mecánica para optimizar los materiales en las vigas.

El culmo de bambú soporta la compresión y los elementos de acero dispuestos longitudinalmente, debido a que por debajo del culmo soportan la tensión. Es importante mencionar que los elementos que constituyen la viga, se disponen en forma tal que el culmo se encuentra presforzada y ciertos elementos de acero pretensados, generando una condición de contra-flecha inicial de la viga, la cual desaparece o se reduce cuando actúan las cargas.

El culmo de bambú, tiene preparaciones especiales en las zonas de transmisión de esfuerzos por cortante, para impedir la ocurrencia de fallas locales como el desgarramiento en planos paralelos a las fibras, el pandeo, o el aplastamiento, para garantizar una condición de falla dúctil.



Capítulo 3. Metodología aplicada

3.1 Enfoque y tipo de estudio

El tipo de estudio tiene que ver con el nivel de conocimiento científico al que espera llegar el investigador, se debe formular el tipo de estudio, es decir de acuerdo al tipo de información que se espera obtener, así como el nivel de análisis que deberá realizar. También se tendrán en cuenta los objetivos y las hipótesis planteadas.

El enfoque y tipo de estudio del presente trabajo fue catalogado según: a.- su propósito como investigación aplicada ya que, el objetivo fue encontrar resultados de las fatigas del bambú en una viga compuesta reforzada con acero que puedan ser empleados en el abordaje de un diseño estructural específico. b.- su nivel de profundización es explicativa porque se encargó de establecer relaciones de causa y efecto en relación a cargas aplicadas a las barras de bambú generalizando sus resultados para que puedan ser aplicados a realidades similares. c.- es cuantitativa por el tipo de datos obtenidos y su tratamiento que se vale del uso de herramientas matemáticas, estadísticas e informáticas para medirlos y poder hacer conclusiones generalizadas. d.- es experimental, ya que se diseñó replicando el fenómeno de flexo-compresión en la barra manipulando en condiciones controladas, respetando el método científico, e.- el tiempo en que fue realizada fue transversal ya que los cambios resultantes del fenómeno experimental se midieron durante la aplicación de las cargas y finalmente f.- es hipotética-deductiva porque la hipótesis que dio lugar a este trabajo busco de manera deductiva obtener resultados que permitieron concluir el conocimiento a partir de la experimentación.

3.2 Área del estudio

En la primera fase de esta investigación mencionada anteriormente se estudió la adaptabilidad del bambú de la especie *oldhamii* en el municipio de Comala, Estado de Colima, en la localidad del Remudadero, el ingeniero Rogelio Lira, productor y miembro fundador del Consejo Colimense del Bambú, cuenta con 40 hectáreas de bambú de donde fueron obtenidos los culmos que se utilizaron en la experimentación, esta especie es una de las más utilizadas en el mundo por sus características estructurales y es originaria de sureste asiático principalmente de China. Debe mencionarse, que



los factores climáticos, como la precipitación, temperatura, asoleamiento y humedad, así como la altura respecto al nivel del mar y el tipo de suelo del predio el Remudadero están dentro de los rangos recomendados por (Botero Cortés, 2009) y (Forero, 2005).

La segunda fase se desarrolló en las instalaciones del Instituto Tecnológico de Colima en el laboratorio de resistencia de materiales de mecatrónica, que cuenta con la prensa universal en la que se ensayaron los especímenes que fueron creados con ese fin.

3.3 Población y muestra

Como resultados del estudio presentado en la revista ingeniantes denominado: “Adaptabilidad del bambú en el municipio de Comala: un recurso forestal no maderable”, en el que se evaluó en términos de la comparación de diámetros y alturas, de una población de 14,000 plantas mayores a 5 años de edad del sitio mencionado en el párrafo anterior. (Chihuahua., 2018). El tamaño mínimo necesario de la muestra para que los resultados del estudio tengan un nivel de confianza del 95%, con un margen de error del 5%, es de aproximadamente 100 plantas, las que se analizaron y se eligieron aleatoriamente.

Para efecto de este trabajo de investigación se consideró tomar la muestra de los 100 culmos anteriores (población), ya que se conocían los diámetros de las plantas considerando que según el manual de construcción de bambú de Aguilar Lucila, los diámetro mínimos estructurales deberán ser de 9 cm, por lo que se consideró una desviación estándar de 8 cm en los diámetros, un nivel de confianza del 90% y un error de 3 cm, dando como resultado 19 muestras.

3.4 Determinación de variables

Con el objeto de poder estudiar de forma ordenada y considerando las variables expresadas en nuestra hipótesis de trabajo, se utilizó el diseño experimental DCA (diseño completamente al azar), este es el que más se ajustó a nuestra experimentación, pues se utiliza para comparar uno o más tratamientos, considera dos fuentes de variabilidad: los tratamientos y el error aleatorio, se llama completamente al azar porque todas las corridas experimentales se realizan en orden aleatorio, solo



considera un factor que afecta a la variable de respuesta. (Diseño Completamente al Azar DCA, 2017)

El propósito del DCA aplicado a nuestra experimentación fue el de obtener la fatiga del bambú al ser sometido a un esfuerzo de flexo-compresión, en dos posiciones del refuerzo interno o externo de la viga de bambú, el factor a considerar fueron las tres secciones: base, media y superior. Para este caso, la variable de respuesta es la resistencia a la flexo-compresión (N) y la unidad experimental son las vigas compuestas de bambú.

A continuación se muestra la tabla 9, en ella observamos que los tratamientos considerados se refieren a la posición en la que se encontró el acero de refuerzo, en ambos se ubicó en la parte baja del culmo con la diferencia de que uno se colocó en el interior y el otro en el exterior. El factor considero la parte del culmo siendo la sección base los primeros 3 m, la media de 3 a 6m y la superior de 6 a 9m, la unidad experimental son las barras o vigas que se fabricaron para que fueran ensayadas. Las variables de respuesta esperadas fueron los resultados obtenidos al aplicar la carga sobre cada unidad experimental.

ELEMENTOS Y TRATAMIENTOS	CULMO	ACERO DE REFUERZO INTERIOR			ACERO DE REFUERZO EXTERIOR		
		BASE	MEDIO	SUPERIOR	BASE	MEDIO	SUPERIOR
ESFUERZO CARACTERISTICA A FLEXION (N)	1	1BI	1MI	1SI	1BE	1ME	1SE
	2	2BI	2MI	2SI	2BE	2ME	2SE
	3	3BI	3MI	3SI	3BE	3ME	3SE

Tabla 9. Diseño Completamente al Azar: oldhamii de 9 cm de Ø.

El diseño de nuestro experimento es balanceado porque se realizaron el mismo número de pruebas o ensayos, en este caso 9 por cada tratamiento.

3.5 Técnicas de recolección de datos. Segunda etapa.

Como se comentó en el apartado “Descripción del proceso metodológico”, el trabajo experimental se desarrolló en tres etapas, a continuación se describe la segunda etapa, que corresponden a las pruebas iniciales.



Se realizaron las pruebas de flexión en el laboratorio de mecatrónica del Tecnológico de Colima, se utilizó una prensa hidráulica (figura 16), de la marca Komatsu de 50 toneladas, en estas pruebas se utilizaron dos rieles de acero como apoyos, estos estaban sobre la cama de pruebas y la distancia entre dichos apoyos fue de 60 cm.



Figura 16. Prensa hidráulica y monitor.

Pruebas iniciales con vigas simples

La prueba # 1. Para realizar esta prueba se contó con una vara del predio del Remudadero, proporcionado por el ing. De Lira (productor de bambú), se procedió posteriormente a tomar las medidas correspondientes a los diámetros exterior e interior de los extremos de la misma obteniendo 5.49 cm (2.16") y 3.57 cm (1.41") cm de diámetro exterior e interior promedios respectivamente, datos base para el cálculo y procesamiento de la experimentación.

Prueba # 2. Con el objeto de introducirnos y comprobar el comportamiento y los resultados obtenidos en la prueba # 1, se adquirió con BABUCOL (Consejo Colimense del Bambú) un culmo de 7.55 cm (2.97") y 4.10 cm (1.61") de \varnothing exterior e interior promedios respectivamente, se tomaron los primeros tres metros de longitud a partir de su base y se partieron en tres partes iguales quedando probetas de 1 m cada una. En la figura 17 se muestra una de las probetas sobre los rieles de la cama de prueba, localizando el centro del mismo lugar donde fue aplicada la carga hasta su destrucción.





Figura 17. Prueba #2: culmo de $\approx 3''$ de \emptyset .

Pruebas iniciales con vigas compuestas

Dado que nuestro objeto de estudio contempla que la sección del culmo este reforzada con acero, se procedió a realizar pruebas de carácter preliminar implementado cable de acero en diferente posición para lograr una viga compuesta.

Prueba # 3. En esta prueba se añadió al culmo de diámetro promedio exterior de 5.5 cm (2.17") e interior de 1.6 cm (0.63"), un cable de acero de 3/16" de diámetro por el interior del mismo, aprovechado las perforaciones que se le realizaron a los diafragmas para el preservado químico del bambú, el cable se tensó con la ayuda de un malacate de palanca, con una fuerza de 10 kg, para anclar el cable en los extremos de la viga se utilizaron guardacabos, casquillos y mortero de alta resistencia (Grout), también se utilizó un dinamómetro para medir la fuerza de tensión aplicada, se utilizaron eslingas para sujetar la viga compuesta a dos columnas para tensar el cable.

Prueba # 4. En esta prueba se utilizó un culmo de 5.3 cm y 3.3 cm de diámetro exterior e interior promedio respectivamente, con cable exterior, se realizó el mismo procedimiento al descrito en la prueba #3 pero el cable se colocó en la parte baja. Además se utilizaron dos abrazaderas para impedir que el cable cambiara de posición durante el desarrollo de la prueba.



3.6 Técnicas de procesamiento de datos. Segunda etapa.

Para Determinar las propiedades geométricas de las muestras se utilizaron los procedimientos que se describen a continuación:

El área de la viga se obtuvo con la fórmula para el cálculo del área del círculo en función al diámetro:

$$A = \frac{\pi D^4}{4}$$

Dónde: A, es el área del círculo en cm^2 , D, es el diámetro en cm y π es la constante 3.1416.

Para obtener el espesor, se restó el diámetro interior del exterior y el resultado se dividió entre 2, para calcular el módulo de sección de la viga se utilizó la siguiente fórmula:

$$s = \frac{\pi D e^4 - (D e - 2t)^4}{32 D e}$$

Dónde: S, es el módulo de sección en cm^3 , De, es el diámetro exterior y t, es el espesor.

Esta fórmula se obtuvo de la norma técnica E100 BAMBÚ, anexo B1; del ministerio de vivienda, construcción y saneamiento del Perú.

En la figura 18. Se muestra la parte final de la prueba #1, en donde se evidencia la falla de la probeta debido a la aplicación de la carga.



Figura 18. Prueba #1: culmo de bambú de $\approx 2''$ de \emptyset .



En la tabla 10 se puede observar los diámetros promedio exterior e interior calculados a partir de la medición de los mismos en cada extremo del bambú, ya que estos no son iguales, debido a que el culmo es el tallo de una planta y al incrementar la altura disminuye su diámetro. Por ejemplo en un tubo de acero los diámetros y el espesor se mantienen constantes.

\varnothing prom. Ext.	\varnothing prom. Int.	Espesor anillo	Área anillo	módulo sección
cm	cm	cm	cm ²	cm ³
5.49	3.57	0.96	13.66	15.32

Tabla 10. Propiedades geométricas: culmo de bambú de $\approx 2"$ de \varnothing .

Como se puede ver en la tabla 11, la viga soportó una carga máxima de 6,145 N. y una deformación máxima de 1.41 cm. Se pudo apreciar en el proceso de prueba que la falla tuvo un comportamiento frágil.

Tramo	Carga máxima (N)	Def. Máxima (cm)
único	6,145	1.41

Tabla 11. Carga y flecha máxima: Culmo de bambú $\approx 2"$.

En la prueba #2, se procedió de igual manera que en la #1, calculando las propiedades geométricas del culmo utilizado, se puede observar en la tabla 12 que el módulo de sección promedio es de 41.07 cm³, considerando los diámetros promedio, mismo que dada sus características es mucho mayor que el de la prueba uno de 15.32 cm³ por lo que se puede deducir que al aumentar el diámetro de la viga, aumenta su módulo de sección y por lo tanto su capacidad de carga.

\varnothing prom. Ext.	\varnothing prom. Int.	Espesor anillo	área anillo	módulo sección
cm	cm	cm	cm ²	cm ³
7.55	4.10	1.72	31.57	41.07

Tabla 12. Propiedades geométricas: Culmo de bambú $\approx 3"$, tramo de 0 a 1 metro.

Una vez terminada dicha prueba, la probeta correspondiente a la base (de 0 a 1m) registró la carga máxima de 14,250.01 N con una deformación máxima de 4.44 cm, mientras que la del tramo superior (de 2 a 3 m) fue de 11,250 N con una deformación



de 1.89 cm, ver tabla 13, esto significa que el culmo es más resistente y flexible en la base.

Tramo	Carga máx. (N)	Deformación máx. (cm)
base	14,250.01	4.44
superior	11,250.01	1.89

Tabla 13. Carga y flecha máxima: bambú de $\approx 3''$ de \varnothing .

En la figura 19 se puede observar el ensaye de la prueba #3, que como se explicó en rubro anterior cuenta con acero de refuerzo en su interior.



Figura 19. Viga con acero interior, culmo de bambú de $\approx 2''$ de \varnothing .

El diámetro promedio exterior del culmo fue de 5.5 cm, en la tabla 14 se muestran las propiedades geométrica de la probeta: diámetros interior y exterior, espesor, área del anillo y el módulo de sección promedio que fue de 16.17 cm³.

\varnothing prom. Ext.	\varnothing prom. Int.	Espesor anillo	Área anillo.	módulo sección
cm	Cm	cm	cm ²	cm ³
5.5	1.6	3.9	21.75	16.17

Tabla 14. Propiedades geométricas viga c/acero interior de $\approx 2''$ de \varnothing .

La probeta soportó una carga máxima de 5,500 N, con una deformación máxima de 1.6 cm, ver tabla 15, Al finalizar la prueba, esta presentó una falla dúctil debido al cable de acero.



Tramo	Carga máx. (N)	Def. Máx. (cm)
único	5,500	1.6

Tabla 15. Carga máxima y flecha viga c/acero interior de $\approx 2"$ de \varnothing .

Como ya se comentó la prueba #4 se realizó con acero en el exterior como se aprecia en la figura 20.



Figura 20. Culmo de bambú de $\approx 2"$ \varnothing con acero exterior.

En la tabla 16 se muestran las propiedades geométricas del culmo de 5.3 cm de \varnothing promedio exterior.

\varnothing prom. Ext.	\varnothing prom. Int.	espesor anillo	Área anillo.	Módulo sección.
cm	cm	cm	cm ²	cm ³
5.3	3.3	2	13.51	14.60

Tabla 16. Propiedades geométricas viga con acero exterior de $\approx 2"$ de \varnothing .

En este caso la viga con cable exterior soportó una carga máxima de 7,500 N y una deformación máxima de 3.53 cm, ver tabla 17. Al realizar la prueba, se observó que la probeta presentó la falla con un comportamiento dúctil.

Tramo	Carga máx. (N)	Def. Máx. (cm)
único	7,500 N	3.53

Tabla 17. Carga y flecha máxima: viga c/acero exterior Culmo de bambú $\approx 2"$.



3.7 Técnicas de recolección de datos. Tercera Etapa.

La especie *oldhamii* es considerada un bambú estructural por las NTC de Madera, las cepas de donde se obtuvieron los culmos para la realización de las pruebas finales, estaban ubicadas en un predio del Remudadero, localidad que pertenece al municipio de Comala, Colima. Las coordenadas registradas por el GPS en el lugar son: - 103°44'59.26" O, latitud: 19°24'48.33" N y elevación de 1,120 metros de altura sobre el nivel del mar. En la Figura 21. Se puede observar una vista aérea de Remudadero, para marca el lugar donde está el predio, se colocó una tachuela amarilla.



Figura 21. Vista aérea de Remudadero. Fuente: Google Earth.

Para las pruebas correspondientes a la tercera etapa y siguiendo las pautas del diseño experimental empleado en esta investigación, se procedió a cortar 6 culmos de bambú, de la especie *oldhamii*, como se mencionó anteriormente en el proceso metodológico, se consideró para su selección, la cepa resultante al azar y de esta, el culmo con más de 9 metros de altura y mayor de 9 cm de diámetro en su base (ver figura 22). En cuanto a su apariencia se cuidó que el seleccionado no presentara polvo blanco en los entre nudos, cuando presentan dicho polvo, significa que es un brote joven menor de los 5 años requeridos, por lo que se nos recomendó cortar los que presentaran algunas manchas claras que contrastaran con el color de la pared (verde oscuro), esas manchas indican que ya está maduro, el corte se realizó en el primer entre nudo a partir del nivel del terreno, este se efectuó en forma diagonal (no horizontal).





Figura 22. Corte de culmos: especie oldhamii.

Los culmos se dividieron en secciones de 3 metros aproximadamente. Estos se trasladaron manualmente de cada una de las cepas donde se realizó el corte (aproximadamente a 1,000 m), a la camioneta de redilas, vehículo que los transportaría, los culmos se sujetaron con una cuerda para garantizar su conservación durante el traslado. Por cada culmo se obtuvo tres secciones: baja, media y alta.



Figura 23. Etapa inicial de secado. Oldhamii de $\approx 4'' \text{ Ø}$.

Es importante señalar que si no se va a realizar la preservación química, el secado deberá hacerse por el método de avinagrado, el cual se describió en el marco teórico.

En el proceso de secado no aparecieron fisuras, sin embargo algunas varas las presentaron, pudieron haber sufrido algún golpe durante su traslado, el bambú por tratarse de un material vegetal, se debe de transportar con cuidado, si la fisura tiene



una longitud que exceda el 50% de la longitud total del culmo, este no se podrá utilizar como elemento estructural.

Para emplear un culmo como elemento estructural, debe de tener por lo menos 9 cm de diámetro (Lucila Aguilar Arquitectos, 2018) y estar maduro. También se observó que el espesor del culmo en donde se realizó el corte es significativamente más grueso que en los demás cortes del culmo, debido a que se trata de la conicidad que ya fue mencionada en el estado del arte.

El lugar donde se almacenaron los culmos para la etapa de secado, estaba techado y tenía piso de concreto, ver figura 24 condiciones que coadyuvaron a proteger las probetas de la intemperie. Se procedió a realizar una perforación con una broca 1/8" con la ayuda de un taladro, a 5 cm de cada entrenudo, con el fin de acelerar su secado considerando que el tiempo promedio es de dos meses.



Figura 24. Etapa final de secado: Oldhamii $\approx 4''$ de \emptyset

Con la ayudada de un dinamómetro se procedió a pesar cada sección, como se observa en la figura 25.





Figura 25. Obtención del peso, antes y después del proceso de secado.

El peso en kg registrado después de cortar los culmos, se comparó con el peso obtenido una vez que terminó el proceso de secado, ver tabla 18, se observó una reducción de peso en porcentaje del 36% al 60% de su peso inicial húmedo.

Las secciones bajas tienen mayor peso que las medias y las superiores. La sección de mayor peso húmedo es la 1BI (12.25 kg) y la de menor es la 3SE (3.40 kg).

Refuerzo	Interior (I)			Exterior (E)		
Culmo	1	2	3	1	2	3
Sección baja (B)	1BI	2BI	3BI	1BE	2BE	3BE
Peso húmedo	12.25	10.25	9.35	10.95	9.70	8.90
Peso seco	6.95	5.55	4.20	5.60	4.20	4.60
% Reducción de peso	43%	46%	55%	49%	57%	48%
Sección media (M)	1MI	2MI	3MI	1ME	2ME	3ME
Peso inicial	7.85	6.50	5.75	7.10	5.80	5.40
Peso seco	4.85	3.85	3.70	4.05	2.55	2.60
% Reducción de peso	38%	41%	36%	43%	56%	52%
Sección sup. (S)	1SI	2SI	3SI	1SE	2SE	3SE
Peso húmedo	5.75	4.60	3.60	5.25	3.75	3.40
Peso seco	3.30	2.70	1.65	2.60	1.50	1.45
% Reducción de peso	43%	41%	54%	50%	60%	57%

Tabla 18. Registro de pesos: después del corte, secado y % de reducción de peso.

En la tablas 19 y 20 se relacionan los diámetros exteriores e interiores respectivamente en su estado húmedo y seco, así como sus diferencias.



Refuerzo	Interior (I)			Exterior (E)		
	1	2	3	1	2	3
Culmo	1	2	3	1	2	3
Sección baja (B)	1BI	2BI	3BI	1BE	2BE	3BE
Ø inicial húmedo	9.90	9.60	9.50	9.20	9.00	9.20
Ø inicial seco	9.60	8.80	8.90	9.10	8.60	8.80
Diferencia	0.3	0.8	0.6	0.1	0.4	0.4
Sección media (M)	1MI	2MI	3MI	1ME	2ME	3ME
Ø inicial húmedo	9.90	9.40	9.60	9.80	9.50	8.80
Ø inicial seco	9.80	9.00	9.20	9.20	8.90	8.70
Diferencia	0.1	0.4	0.4	0.6	0.6	0.1
Sección superior (S)	1SI	2SI	3SI	1SE	2SE	3SE
Ø inicial húmedo	8.80	8.30	7.70	8.10	7.80	7.30
Ø inicial seco	8.60	8.10	7.70	8.00	7.60	7.20
Diferencia	0.2	0.2	0	0.1	0.2	0.1
Ø final húmedo	7.30	6.6	6.4	7.3	6.4	5.9
Ø final seco	7.30	6.4	6.3	7.1	6.3	5.7
Diferencia	0	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2

Tabla 19. Diámetros exteriores. Bambusa oldhamii.

Refuerzo	Interior (I)			Exterior (E)		
	1	2	3	1	2	3
Culmo	1	2	3	1	2	3
Sección baja (B)	1BI	2BI	3BI	1BE	2BE	3BE
Ø inicial húmedo	6.10	5.90	6.30	5.90	6.20	5.90
Ø inicial seco	5.80	5.50	5.90	5.80	5.80	5.60
Diferencia	0.30	0.40	0.40	0.10	0.40	0.30
Sección media (M)	1MI	2MI	3MI	1ME	2ME	3ME
Ø inicial húmedo	8.30	8.00	8.20	8.40	7.80	7.60
Ø inicial seco	8.10	7.60	7.80	7.90	7.40	7.40
Diferencia	0.20	0.40	0.40	0.50	0.40	0.20
Sección sup. (S)	1SI	2SI	3SI	1SE	2SE	3SE
Ø inicial húmedo	7.30	7.00	6.70	6.60	6.80	6.50
Ø inicial seco	7.20	6.80	6.60	6.50	6.70	6.30
Diferencia	0.10	0.20	0.10	0.10	0.10	0.20
Ø final húmedo	5.90	5.5	4.8	6.1	5.5	4.7
Ø final seco	5.90	5.3	4.6	6	5.3	4.5
Diferencia	0.00	0.20	0.20	0.10	0.20	0.20

Tabla 20. Diámetros interiores, Bambusa oldhamii.

Para la fabricación de las probetas con acero de refuerzo interior, fue necesario implementar una herramienta que nos permitiera perforar los diafragmas del culmo, esta consistió en un redondo liso (varilla lisa) a la que se le soldó una broca de 3/8”, ver figura 26a, una vez que se perforo, se procedió a introducir una varilla corrugada



del mismo \varnothing en la posición requerida (lecho bajo), figura 26b, posteriormente se colocó mortero en los extremos de la probeta para fijar la varilla a la pared interior del culmo. Figuras 26c y 26d.



Figura 26a, b, c y d respectivamente. Fabricación de probeta con acero interior.

Para las probetas con acero exterior, se perforaron transversalmente las paredes en ambos extremos para fijar la varilla corrugada al culmo, se diseñó un sistema de sujeción mecánico que consistió en soldar 5 cm de varilla roscada del mismo diámetro en ambos extremos, ver figura 27a y 27b, además dicho sistema tiene un tubo a manera de camisa que protege las paredes del culmo de las rondanas y tuercas que ejercen presión directa en ellas.





Figura 27a, vista superior y b, vista inferior respectivamente. Fabricación de probeta con acero exterior.

3.8 Técnicas de procesamiento de datos. Tercera etapa.

Como se mencionó en la parte de limitaciones, la prensa con la que cuenta el laboratorio de mecatrónica del Instituto Tecnológico de Colima, no está acondicionada para el tipo de prueba que se requería en este estudio, por lo que fue necesario el diseño y fabricación de un adaptador metálico para la cama de pruebas de flexo-compresión en vigas, como se puede ver en la figura 28, este consta de 2 elementos tubulares que tienen por objeto sujetar la pieza, los cuales están ligadas mediante dos marcos de acero, los que transmiten la carga a través de los rieles que se encuentran en la base o cama, la que se levanta lentamente, mientras la parte superior de la prensa, se mantiene fija, durante el ensaye.

Dado que el procedimiento para los ensayos es el mismo, a continuación se procederá hacer la descripción de algunas de las pruebas. Una vez que se fabricó el adaptador, se procedió a colocar la probeta en el soporte de apoyo, para su sujeción se emplearon unas placas y tornillos garantizando de esta forma que no se moviera la probeta a aplicar las cargas.



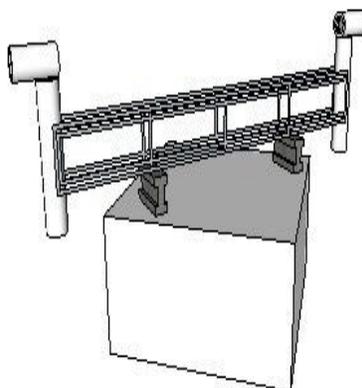


Figura 28. Adaptador metálico para la realizar las pruebas de flexión.

Se revisó que la probeta estuviera en la posición adecuada, realizando las adecuaciones necesarias. Una vez que todo estuvo en su posición correcta el operador de la prensa ajusto las condiciones de inicio (indicadores en cero) y aplico la carga al espécimen, las unidades en que está programada la prensa son: Newton (N) para medir la carga con una precisión de 50 N y milímetros (mm) para medir la deformación con una precisión de una décima de mm, ver figura 29.



Figura 29. Condición de inicio para ensayar cada una de las probetas.

Se grabó en video cada ensayo, los datos se procesaron mediante software de Excel, obteniendo las gráficas del comportamiento presentado en relación a la deformación que sufrió la pieza provocada por la carga aplicada hasta el momento de su falla que corresponde a su máxima resistencia, por ejemplo la probeta 1BI, resistió una carga



máxima de 9,350 N y generó una deformación de 85 mm como se muestra en la pantalla de la prensa hidráulica, ver figura 30.



Figura 30. La pantalla muestra la carga y la deformación máxima: ensayo 1BI.

De la misma forma como se describió en el párrafo anterior, la probeta 2BI, resistió una carga máxima de 5,450 N y una deformación de 66 mm, ver figura 31.



Figura 31. La pantalla muestra la carga y la deformación máxima: ensayo 2BI.

Con el objeto de evidenciar el comportamiento de la viga de bambú con acero de refuerzo a la flexo-compresión se trataron los datos obtenidos resaltando que los presentados en las dos figuras anteriores solamente corresponden a dos de los ensayos que se identificaron desde el diseño experimental con la siguiente simbología: el primer número corresponde al culmo seleccionado para la prueba, la primer letra corresponde a la sección del culmo de acuerdo a la altura en que se



encontraba en su estado natural pudiendo ser base, media y superior y la segunda letra corresponde al tratamiento que se le dio al acero de refuerzo pudiendo ser esta interior o exterior. De tal manera que a continuación, en la figura 32, se presenta el comportamiento de la deformación generada por la carga aplicada a las mismas, en las probetas 1BI y 2BI, resaltando con una línea horizontal la resistencia máxima alcanzada por cada una, con la línea azul observamos la viga 1BI y de color rojo la 2BI que corresponden a los culmos número 1 y 2 en su sección basal con el tratamiento del acero de refuerzo en su interior respectivamente. Comparando el comportamiento de 1BI con respecto a 2BI observamos que el culmo número 1 resistió alrededor de 9,300 N con una deformación aprox. de 85 mm mientras que el 2, logra resistir alrededor de 7,500 N, deformándose 67 mm. Bajo esta observación podemos considerar que el comportamiento del bambú como una viga reforzada con acero en su interior es similar hasta que presenta la falla el número 2, pudiendo ser la causa, la diferencia de diámetros entre el culmo 1 y el 2.

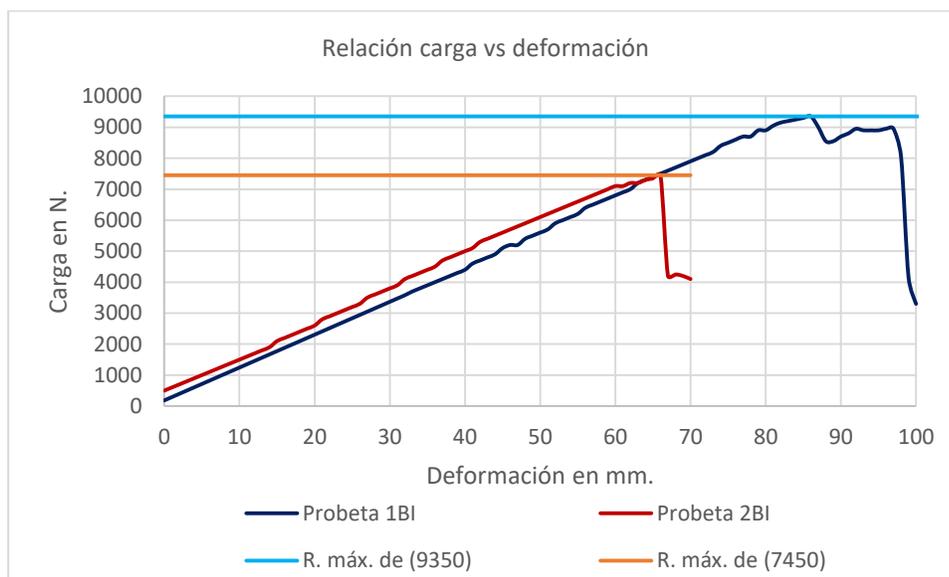


Figura 32. Comparación de las probetas: 1BI y 2BI.

Igualmente en las probetas con acero exterior se aplicó la carga hasta el momento de su falla que correspondió a su máxima resistencia, la probeta 3ME, alcanzó una carga máxima de 2,450 N y una deformación de 60 mm, ver figura 33.



De la misma forma, la probeta 1SE, ver figura 34, alcanzó una carga máxima de 2,750 N y una deformación de 92 mm.



Figura 33. La pantalla muestra la carga y la deformación máxima: ensaye 3ME

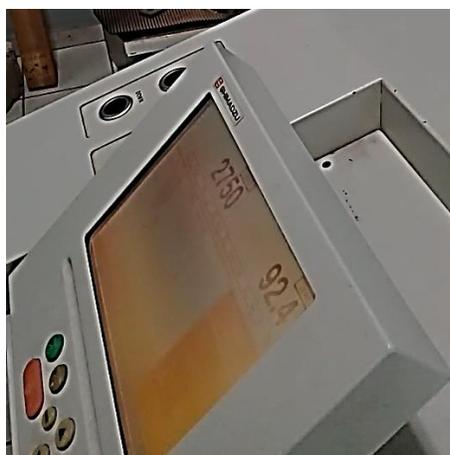


Figura 34. La pantalla muestra la carga y la deformación máxima: ensaye 1SE.

A continuación se presenta el comportamiento de la deformación generada por la carga aplicada a las probetas 3ME y 1SE ver figura 35, resaltando con una línea horizontal la resistencia máxima alcanzada por cada una, la línea azul representa la viga 3ME y de color rojo la 1SE correspondientes a los culmos número 3 y 1 en su sección media y superior respectivamente con el tratamiento del acero de refuerzo en el exterior. Comparando el comportamiento de 3ME con respecto a 1SE observamos que el culmo número 3 resistió alrededor de 2450 N con una deformación aprox. de 60 mm mientras que el 2, logra resistir alrededor de 2,300 N, deformándose 90 mm aprox.



Bajo esta observación podemos considerar que el comportamiento del bambú como una viga reforzada con acero en el exterior presenta a la falla aproximadamente la misma resistencia, notándose una diferencia en la deformación entre 3ME menor que 1SE, se interpreta con esto que la parte superior del culmo es más flexible que las partes medias.

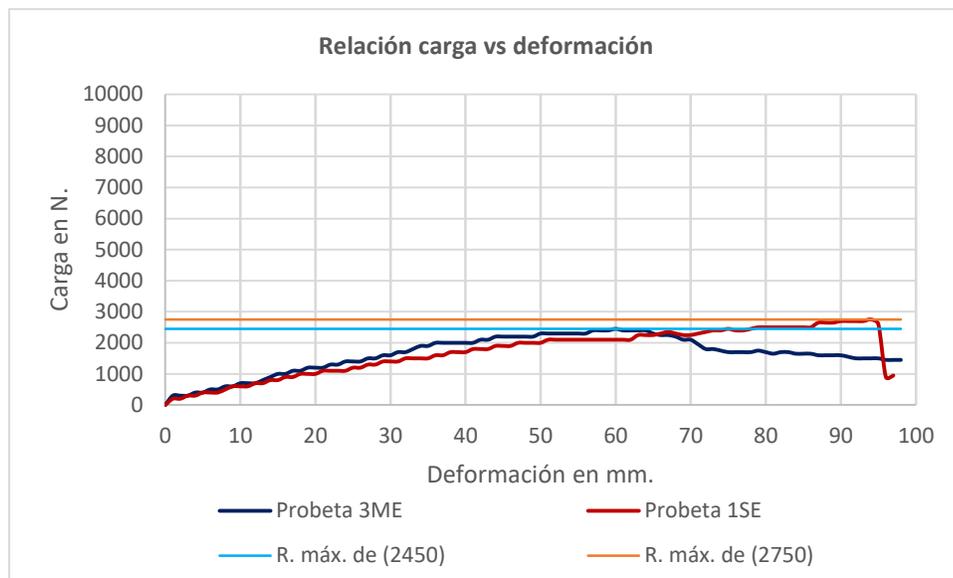


Figura 35. Comparación de las probetas: 3ME y 1SE.



Capítulo 4. Resultados obtenidos

Siguiendo el modelo generado por el diseño experimental, a continuación presentamos en la tabla 21, las variables de respuesta esperadas en el total de unidades o vigas que se fabricaron para realizar los ensayos.

La tabla se organiza por el tipo de tratamiento que considera la posición del acero de refuerzo dividiéndose en interior y exterior, utilizando la simbología descrita anteriormente, podemos identificar la unidad experimental, por ejemplo 2BI, 3SE, etc. En la primera columna se menciona el concepto de la fila que podrá ser: la sección del culmo, la carga y su deformación máximas en (N) y (mm) respectivamente.

Refuerzo	Acero de refuerzo interior (I)			Acero de refuerzo exterior (E)		
	1BI	2BI	3BI	1BE	2BE	3BE
Sección baja (B)						
Carga Max (N)	9,350	7,450	4,100	6,000	4,150	5,400
δ (mm)	86.5	66.1	44.2	56.6	56.8	84.5
Sección media (M)						
Carga Max (N)	6,450	2,750	4,650	3,400	3,150	2,450
δ (mm)	61.2	30.1	57.2	38.1	52.8	57.9
Sección superior (S)						
Carga Max (N)	3,450	2,800	1,150	2,750	1,300	1,150
δ (mm)	51.1	59.2	42.1	93.0	34.8	72.1

Tabla 21. Registro de los valores correspondientes a la carga y deformación máxima de las 18 probetas.

4.1 Discusión de resultados

De la misma manera la tabla 22 se organizó por el tipo de tratamiento, ya sea acero de refuerzo interior o exterior, igualmente podemos identificar la unidad experimental correspondiente, observando en la primera columna el concepto de la fila que podrá ser en este caso los diámetros exterior e interior promedios, el espesor del anillo el cual se obtiene de dividir entre dos el resultado de la diferencia de sus diámetros y finalmente el módulo de sección, para calcularlo se utilizó el procedimiento se describió en la segunda etapa.



Refuerzo	Acero de refuerzo interior (I)			Acero de refuerzo exterior (E)		
	1BI	2BI	3BI	1BE	2BE	3BE
Sección baja (B)						
Ø ext. (cm)	9.60	8.80	8.90	9.10	8.60	8.80
Ø int. (cm)	5.80	5.50	5.90	5.80	5.80	5.60
Espesor (cm)	1.9	1.65	1.50	1.65	1.40	1.60
S (cm ³)	83.18	63.66	64.96	70.10	58.33	63.41
Sección media (M)						
Ø ext.	9.80	9.00	9.20	9.20	8.90	8.70
Ø int.	8.10	7.60	7.80	7.90	7.40	7.40
Espesor (cm)	0.85	0.70	0.70	0.65	0.75	0.65
S (cm ³)	78.68	59.99	63.88	63.22	58.68	53.88
Sección superior (S)						
Ø ext.	8.60	8.10	7.70	8.00	7.60	7.20
Ø int.	7.20	6.80	6.60	6.50	6.70	6.30
Espesor (cm)	.70	0.65	0.55	0.75	0.45	0.45
S (cm ³)	52.68	43.93	37.12	43.29	34.81	29.81

Tabla 22. Módulos de sección calculados a partir de los Diámetros del culmo.

Una viga es un elemento estructural horizontal cuya función es recibir cargas verticales y transmitir las a los elementos de soporte, trabaja a esfuerzos de flexo-compresión.

El objetivo principal de nuestra experimentación fue el conocer e incrementar el desempeño estructural de las vigas de bambú con acero de refuerzo, considerando dos posiciones para su colocación, una interna y la otra externa en ambos culmos por la parte baja.

En el estado del arte se mencionó que las características geométricas de los elementos estructurales son muy importantes de considerar, ya que la posición y la forma pueden hacer de un elemento más resistente a pesar de tener la misma área de trabajo, como son el momento de inercia (I) y el módulo de sección (S), ya que en ambos casos la altura de la pieza en relación a su eje horizontal define la capacidad de carga del elemento, para su cálculo se emplean las ecuaciones descritas en la tabla 7 del estado del arte, por ejemplo: Si contáramos con una viga rectangular de las mismas dimensiones 5 cm por 15 cm, al trabajar de forma vertical, la base $b = 5$ cm y $h = 15$ cm, su módulo de sección resultante aplicando la fórmula es de 187.5 cm^3 y de forma contraria al trabajar de manera horizontal donde $h = 5$ cm resulta 62.5 cm^3 ,



quiere decir que la altura o peralte define su módulo de sección y a partir de ahí la capacidad de carga de los elementos.

Una de las características de los materiales estructurales es la capacidad que muestran o poseen para resistir cargas, de tal manera que para conocerlas es necesario realizar pruebas de laboratorio en las que se sometan a una carga creciente que va deformando la pieza hasta lograr su destrucción. A la relación de la carga última aplicada y el esfuerzo resistente debido a sus características geométricas, principalmente al módulo de sección, se le denomina fatiga.

En nuestros ensayos obtuvimos las cargas incrementales a los que fueron sometidos, se presentaron a manera de ejemplo 4 de ellos, obteniendo la máxima deformación y el máximo esfuerzo causado por la carga última aplicada.

Al aplicar la carga concentrada en la viga se generó un momento de flexión que es la fuerza resultante de una distribución de tensiones sobre la sección transversal del culmo, que es perpendicular al eje longitudinal en el que se produce la flexión. De hecho, el momento resistente es calculable a partir de la forma y dimensiones de la sección transversal (módulo de sección S), y el esfuerzo de flexión aplicado sobre ella. Entonces podemos decir que:

$$M = f_m * S$$

Dónde: M , es el momento flexionante en $\text{Kg}\cdot\text{cm}$, f_m , es el máximo esfuerzo resistente en Kg/cm^2 y S , es el módulo de sección en cm^3 .

En la figura 35, se muestra el concepto del momento flexionante aplicado a una viga con carga concentrada en el centro, esta es la misma situación a la que se sometieron las unidades experimentales por lo que se tomaron las mismas fórmulas para calcular el momento máximo.

Para una viga con carga en el centro del claro y con apoyos simples en los extremos. El momento resultante (M), se obtuvo de multiplicar la carga (P) por la longitud (L) y después el resultado fue dividido entre 4: $M_{\text{MAX}} = PL/4$.



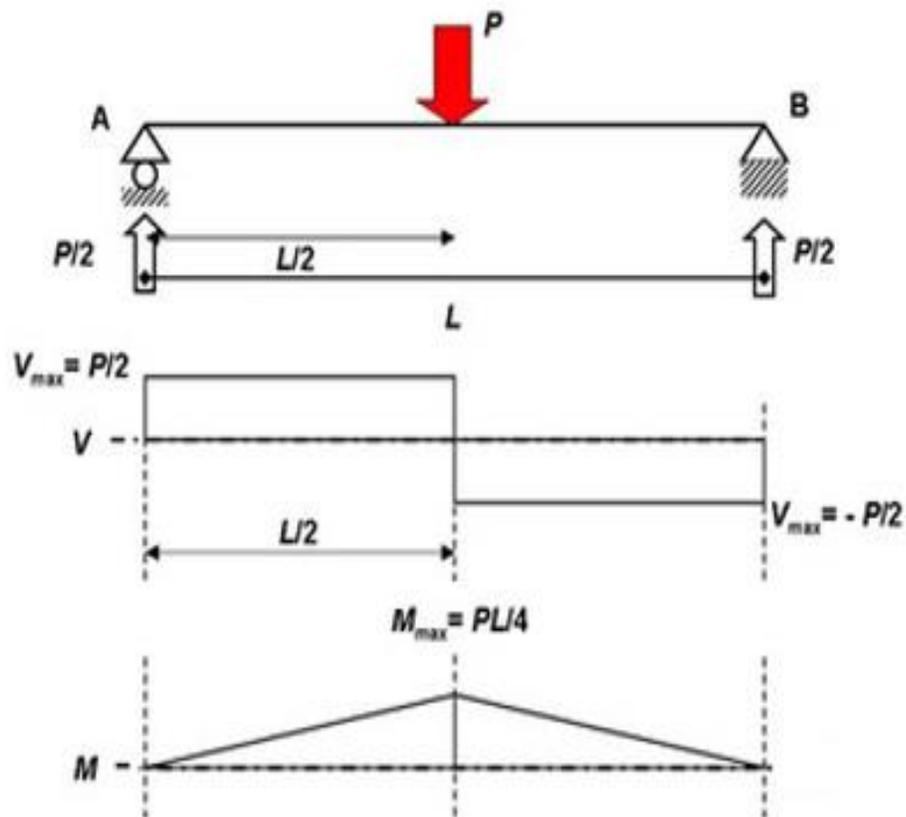


Figura 35. Diagrama de Cuerpo libre. Fuente: blog de estática weebly.

El momento flexionante está en función del esfuerzo último (fatiga) y del módulo de sección, este a su vez, de la longitud del claro de la viga y la carga aplicada, considerando que los culmos presentaban un longitud de 3 m, al quitar las partes correspondientes a los apoyos genero un claro de 2.50 m (250 cm), para sustentar la hipótesis de nuestra investigación, se muestran los resultados obtenidos del proceso de cálculo de las diferentes variables que intervinieron, las cuales relacionan la capacidad de resistencia a flexo compresión de una viga de bambú con acero de refuerzo, en la tabla 23 se presenta en la primer columna los culmos con sus tratamientos y los resultados en las siguientes columnas: la carga máxima soportada, el momento flexionante calculado para esa carga, el módulo de sección correspondiente a la viga y finalmente la fatiga que soportó cada uno de los ensayos.



Probeta	Carga (Kg)	Momento (kg*cm)	S (cm ³)	Fatiga bambú (kg/cm ²)
1BI	953.11	59569.32	83.18	716.15
2BI	759.43	47464.32	63.66	745.59
3BI	417.94	26121.30	64.96	402.11
1BE	611.62	38226.30	70.10	545.31
2BE	423.04	26439.86	63.41	416.97
3BE	550.46	34403.67	58.33	589.81
1MI	657.49	41093.27	78.68	522.28
2MI	280.33	17520.39	63.88	274.27
3MI	474.01	29625.38	59.99	493.84
1ME	280.33	17520.39	43.29	404.72
2ME	321.10	20068.81	58.68	342.00
3ME	249.75	15609.07	53.88	289.70
1SI	351.68	21980.12	52.68	417.24
2SI	285.42	17838.94	43.93	406.08
3SI	117.23	7326.71	37.12	197.38
1SE	346.59	21661.57	63.22	342.64
2SE	132.52	8282.36	29.81	277.84
3SE	117.23	7326.71	34.81	210.48

Tabla 23. Tabla de fatigas máximas (último esfuerzo).

Considerando que el objetivo de esta investigación fue: diseñar y construir una viga de bambú con acero de refuerzo, para incrementar su desempeño a la flexo-compresión, se consideraron dos tratamientos: acero interno y externo, ambos por la parte baja del culmo, inicialmente fue necesario conocer las dimensiones de los diámetros tanto interior como exterior para obtener el módulo de sección, el cual incide en la resistencia de la viga, para esto se requirió realizar un procedimiento estadístico, en donde se consideraron todas las cargas presentadas durante el ensaye, las cuales se convirtieron en momentos, aplicando el procedimiento y las ecuaciones presentadas, se obtuvieron los esfuerzos o fatigas soportados por la unidad experimental.

Cuando se analizan ciertos atributos de grupos de estudio o fenómenos que suceden en la naturaleza, es muy común que su comportamiento describa una distribución normal en sus resultados, es decir, la mayoría de los valores estarán cercanos al promedio mientras que una menor cantidad estarán ubicados en los extremos, por lo que es importante obtener la media (μ , μ) de esos valores, otro factor de importancia



es la desviación estándar (sigma, σ) la cual mide la cercanía de cada uno de los valores respecto al promedio. Entre más alejados del promedio se encuentren los valores, mayor será la desviación estándar. El área generada bajo la curva que describe el comportamiento de la distribución normal es igual al 100% de los valores.

Otra herramienta estadística es la distribución acumulada que se presenta como una ojiva, existen dos tipos: las ojivas "mayores que" y las "menores que", en ambos casos los extremos no tocan el eje horizontal, para la "mayor que" sucede en el extremo izquierdo; para la "menor que", en el derecho. Para realizar el análisis correspondiente de los resultados obtenidos en los ensayos (ver figura 36), de acuerdo a nuestro diseño experimental se clasificaron por: factor o tipo de sección, siendo: base, medio y superior, y cada uno de los factores por el tipo de tratamiento: sin acero, acero exterior y acero interior, (Ortiz, 2020).

Las etiquetas de las unidades experimentales se determinaron por la sección y su tratamiento, por ejemplo: BE, base con acero exterior o SI, superior con acero interior, cada una de estas estuvo formada por tres culmos, la información generada por cada una de las unidades experimentales fue procesada para obtener los datos de la media (μ) y la desviación estándar (σ), posteriormente se definió la clase o rango para obtener la distribución normal, con esta se construyó la ojiva de distribución acumulada, en donde podremos comparar las fatigas soportadas por cada una de las probetas.

FACTOR / SECCION	TRAT.	Unid. exp.	Dist. Normal
BASE	SIN AC	BS	ESFUERZOS SIN AC.
	CON AC. EXT.	BE	ESFUERZOS CON AC. EXT.
	CON AC. INT.	BI	ESFUERZOS CON AC. INT.
MEDIO	SIN AC	MS	ESFUERZOS SIN AC.
	CON AC. EXT.	ME	ESFUERZOS CON AC. EXT.
	CON AC. INT.	MI	ESFUERZOS CON AC. INT.
SUPERIOR	SIN AC	SS	ESFUERZOS SIN AC.
	CON AC. EXT.	SE	ESFUERZOS CON AC. EXT.
	CON AC. INT.	SI	ESFUERZOS CON AC. INT.

Figura 36. Diagrama de clasificación de resultados.



Análisis de resultados por factor base.

En este caso, para las bases con tratamiento acero interior: se obtuvieron alrededor de 900 resultados de esfuerzos para el 1BI, 700 para el 2BI y 550 para el 3BI; para el tratamiento con acero exterior, 650 para el 1BE, 700 para el 2BE y 1000 para el 3BE; finalmente para las probetas sin acero se obtuvieron alrededor de 1500, 500 por cada uno de los culmos 1BS, 2BS y 3BS. En la tabla 24, se muestra la distribución normal proveniente del procedimiento estadístico de los esfuerzos descritos anteriormente.

FACTOR BASE			
Media (μ)	299.74	339.38	383.84
Desv. Est. (σ)	141.95	165.85	194.37
RANGO	SIN AC.	AC. EXT.	AC. INT.
10	3%	3%	3%
50	6%	5%	5%
100	10%	8%	7%
150	16%	13%	10%
200	22%	17%	13%
250	26%	21%	16%
300	28%	23%	19%
350	26%	24%	20%
400	22%	22%	20%
450	16%	19%	19%
500	10%	15%	17%
550	6%	11%	14%
600	3%	7%	11%
650	1%	4%	8%
700	1%	2%	5%
750	0%	0%	3%
800			2%
850			1%
900			1%
950			0%

Tabla 24. Distribución normal de esfuerzos: factor base.

Como se puede ver en la Figura 37. La curva de color azul representa la distribución normal para las bases con acero interior, obtenida de 2,150 esfuerzos, la media es de 384 kg/cm²; 2,350 esfuerzos, con la curva gris representaron las bases con acero exterior, su media es de 339 kg/cm²; finalmente 1,500 en la amarilla, representaron las bases sin acero; la media de los esfuerzos es de 299 kg/cm².



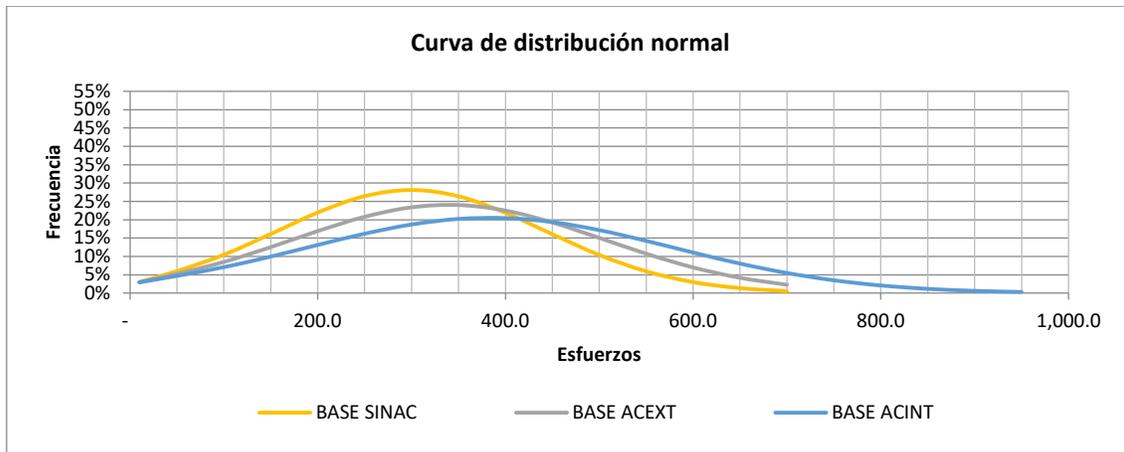


Figura 37. Curva de distribución normal: factor base.

En la tabla 25, se muestra la distribución acumulada de esfuerzos para: factor base, la cual se obtuvo a partir de su distribución normal.

FACTOR BASE			
RANGO	SIN AC.	AC. EXT.	AC. INT.
10	2%	1%	1%
50	5%	4%	4%
100	10%	8%	7%
150	18%	15%	12%
200	29%	23%	19%
250	42%	33%	27%
300	56%	45%	36%
350	69%	57%	46%
400	80%	68%	57%
450	88%	78%	66%
500	93%	86%	75%
550	96%	91%	82%
600	98%	94%	88%
650	99%	97%	92%
700	99%	98%	94%
750			96%
800			97%
850			98%
900			98%
950			98%
1000			

Tabla 25. Distribución acumulada de esfuerzos: factor base.

En la Figura 38. Considerando un nivel de confianza del 90% para todos los tratamientos, se observa que en la curva de color azul que representa a las bases con acero interior la fatiga es de 637 Kg/cm², la curva gris que representa a las bases con



acero exterior su fatiga es 551 kg/cm^2 , la curva de color amarillo representa a las base sin acero su fatiga es de 469 kg/cm^2 .

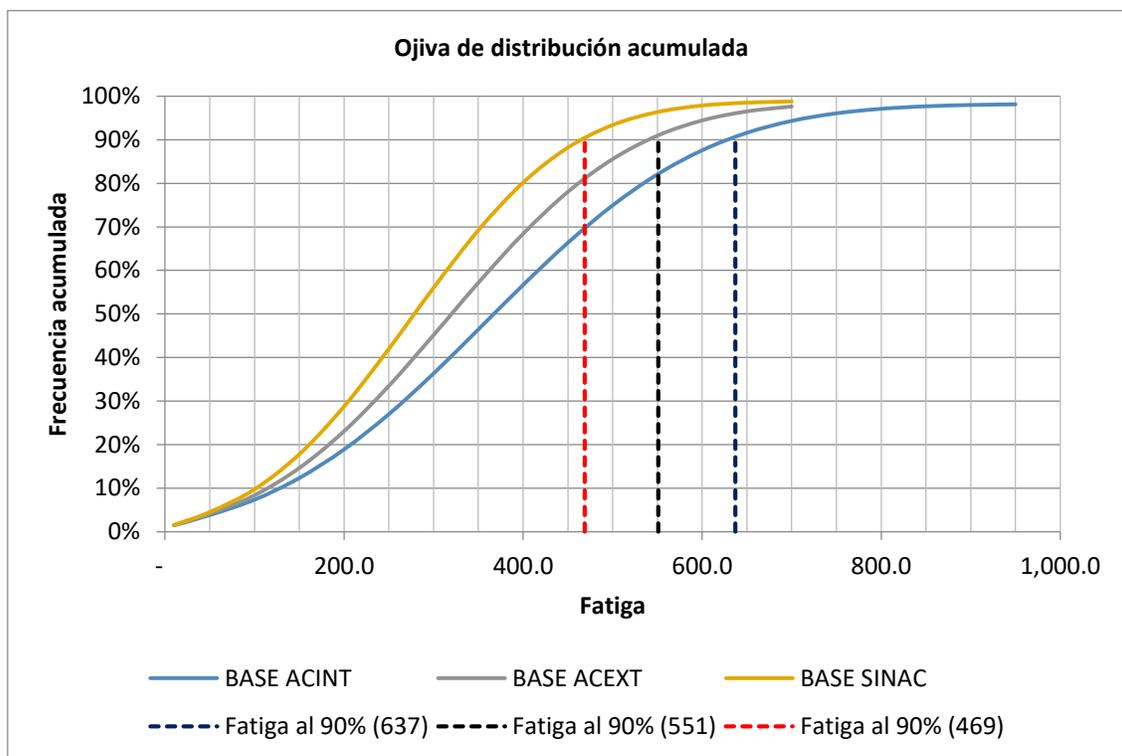


Figura 38. Ojiva de distribución acumulada: factor base.

Análisis de resultados por factor medio

En este caso, para los medios con tratamiento acero interior: se obtuvieron alrededor de 630 resultados de esfuerzos para el 1MI, para 2MI, 330 y para el 3MI, 600; para el tratamiento con acero exterior, 420 para el 1ME, 550 para el 2ME y 980 para el 3ME; finalmente para las probetas sin acero no se realizaron ensayos, razón por la cual no tuvimos resultados para 1MS, 2MS y 3MS.

En la tabla 26, se muestra la distribución normal del factor medio, proveniente del procedimiento estadístico de los esfuerzos descritos anteriormente, estos resultados se muestran gráficamente en la figura 39.



FACTOR MEDIO			
Media (μ)	n/a	228.04	248.80
Desv. Est. (σ)	n/a	93.59	154.15
RANGO	SIN AC.	AC. EXT.	AC. INT.
10	n/a	2%	7%
50	n/a	7%	11%
100	n/a	17%	16%
150	n/a	30%	21%
200	n/a	41%	25%
250	n/a	41%	26%
300	n/a	32%	24%
350	n/a	18%	21%
400	n/a	8%	16%
450	n/a	3%	11%
500	n/a	0%	7%
550	n/a		4%
600	n/a		2%
650	n/a		1%
700	n/a		0%
750	n/a		
800	n/a		
850	n/a		
900	n/a		
950	n/a		

Tabla 26. Distribución normal de esfuerzos: factor medio.

Como se puede ver en la Figura 39. La curva de color azul representa la distribución normal, obtenida de 1,560 esfuerzos para el factor medio con acero interior; la media es de 249 kg/cm², por la curva gris se representaron 1,950 esfuerzos, con acero exterior, la media es de 228 kg/cm²; finalmente el tratamiento sin acero, no aparece por las razones descritas en anteriormente.

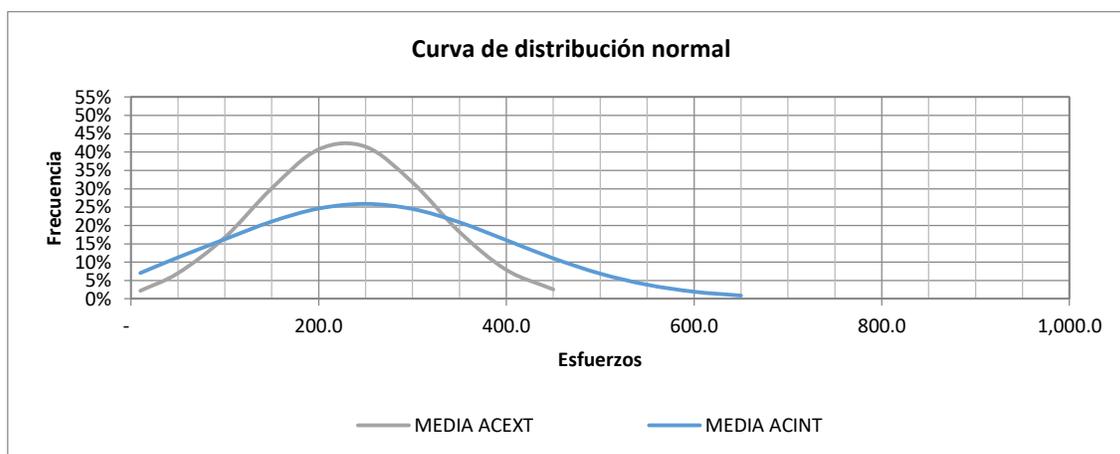


Figura 39. Curva de distribución normal: factor medio.



En la tabla 27, se muestra la distribución acumulada de esfuerzos del factor medio, la cual se obtuvo a partir de su distribución normal.

FACTOR MEDIO			
RANGO	SIN AC.	AC. EXT.	AC. INT.
10	n/a	1%	4%
50	n/a	5%	9%
100	n/a	13%	17%
150	n/a	28%	28%
200	n/a	48%	40%
250	n/a	69%	53%
300	n/a	85%	65%
350	n/a	94%	76%
400	n/a	98%	84%
450	n/a	99%	89%
500	n/a		93%
550	n/a		95%
600	n/a		96%
650	n/a		96%
700	n/a		96%
750	n/a		96%
800	n/a		96%
850	n/a		

Tabla 27. Distribución acumulada de esfuerzos: factor medio

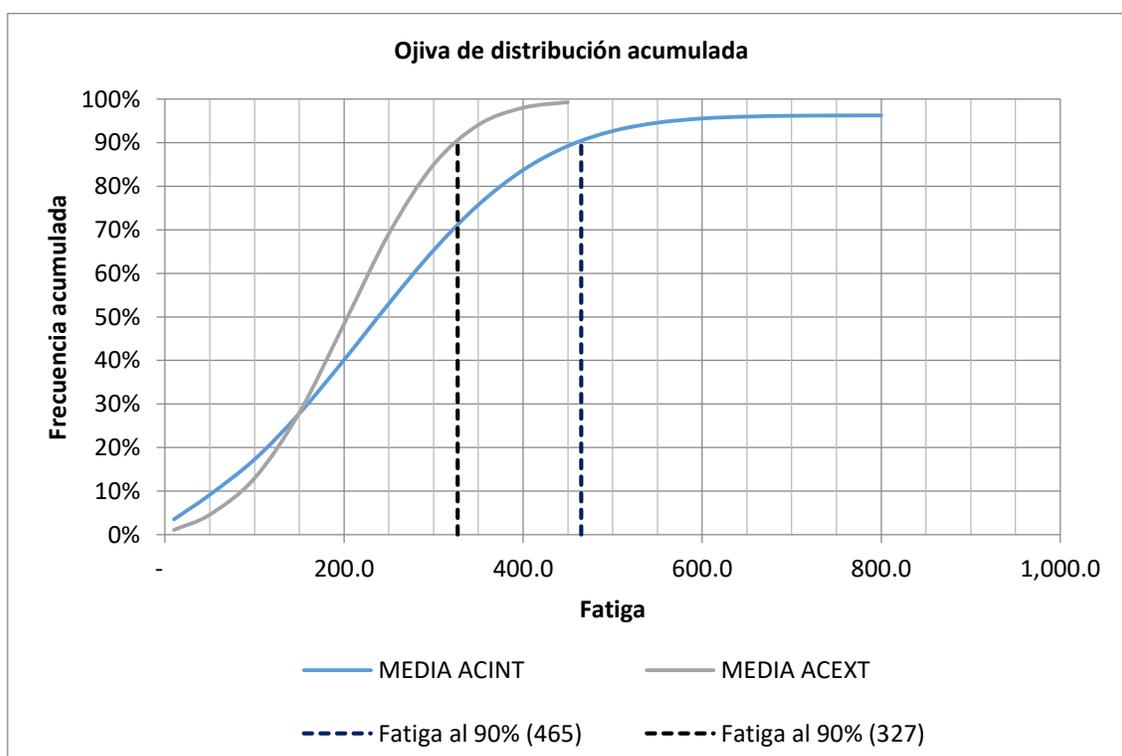


Figura 40. Ojiva de distribución acumulada: factor medio.



En la Figura 40, (anterior). Para el tratamiento de acero interior con un nivel de confianza del 90%, la fatiga es de 465 Kg/cm² representada por la intersección de la curva de color azul con la vertical de dicho valor; mientras que la curva gris para el tratamiento con acero exterior; su fatiga es 327 kg/cm² para el mismo nivel de confianza.

Análisis de resultados por factor superior

En este caso, para las puntas con tratamiento acero interior: se obtuvieron alrededor de 540 resultados de esfuerzos para el 1SI, para 2SI de 630 y para el 3SI, 540; para el tratamiento con acero exterior, 970 para el 1SE, 360 para el 2SE y 820 para el 3SE; finalmente para las probetas sin acero se obtuvieron alrededor de 300, para los culmos 1SS, 2SS, ya que solo se probaron dos probetas.

En la tabla 28, se muestra la distribución normal factor superior proveniente del procedimiento estadístico de los esfuerzos descritos anteriormente, estos resultados se muestran en la figura 41.

FACTOR SUPERIOR			
Media (μ)	131.18	160.61	188.24
Desv. Est. (σ)	75.29	83.84	118.51
RANGO	SIN AC.	AC. EXT.	AC. INT.
10	12%	8%	10%
50	30%	20%	17%
100	49%	37%	26%
150	51%	47%	32%
200	35%	43%	33%
250	15%	27%	29%
300	4%	12%	22%
350	1%	4%	13%
400	0%	1%	7%
450		0%	3%
500			1%
550			0%
600			
650			
700			
750			
800			

Tabla 28. Distribución normal de esfuerzos: factor superior.



Como se puede ver en la Figura 41. La curva de color azul representa la distribución normal, obtenida de 1,710 esfuerzos para los (culmos) superiores con acero interior; la media de las fatigas es de 188 kg/cm², 2,150 esfuerzos representados por la curva gris, con acero exterior, la media es de 161 kg/cm²; finalmente 1,500 en la amarilla, representa los superiores sin acero; la media de los esfuerzos es de 131 kg/cm².

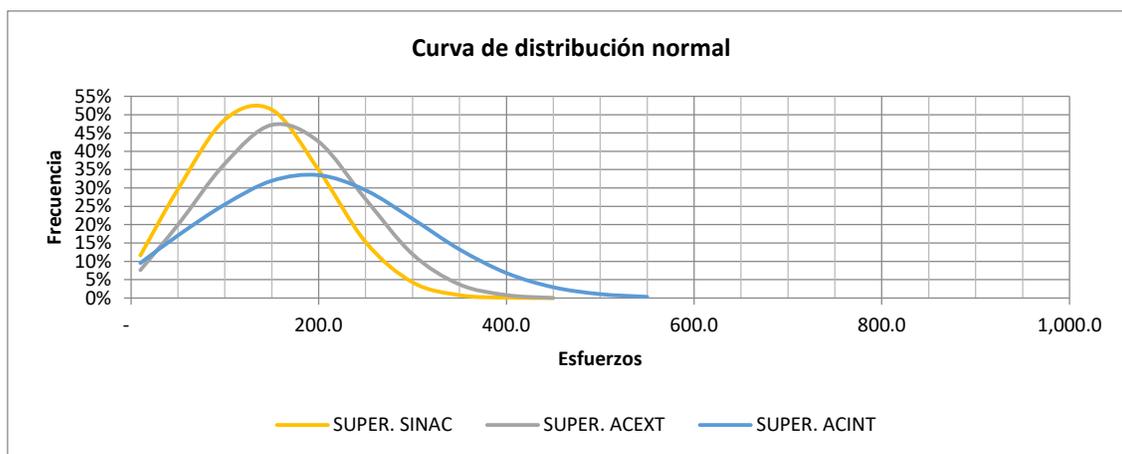


Figura 41. Curva de distribución normal: factor superior

En la tabla 29, se muestra la distribución acumulada de esfuerzos: factor superior, la cual se obtuvo de su distribución normal.

FACTOR SUPERIOR			
RANGO	SIN AC.	AC. EXT.	AC. INT.
10	6%	4%	5%
50	21%	14%	13%
100	45%	32%	26%
150	71%	56%	42%
200	88%	77%	59%
250	96%	90%	73%
300	98%	96%	84%
350	98%	98%	91%
400	98%	99%	94%
450	98%		96%
500			96%
550			96%
600			96%

Tabla 29. Distribución acumulada de esfuerzos: factor superior.

En la Figura 42. Considerando un nivel de confianza del 90%. Se observa que la curva de color azul que representa a los superiores con acero interior; su fatiga es de 351



Kg/cm², la curva gris que representa a los superiores con acero exterior; su fatiga es 250 kg/cm², la curva de color amarillo representa a los superiores sin acero, su fatiga es de 213 kg/cm².

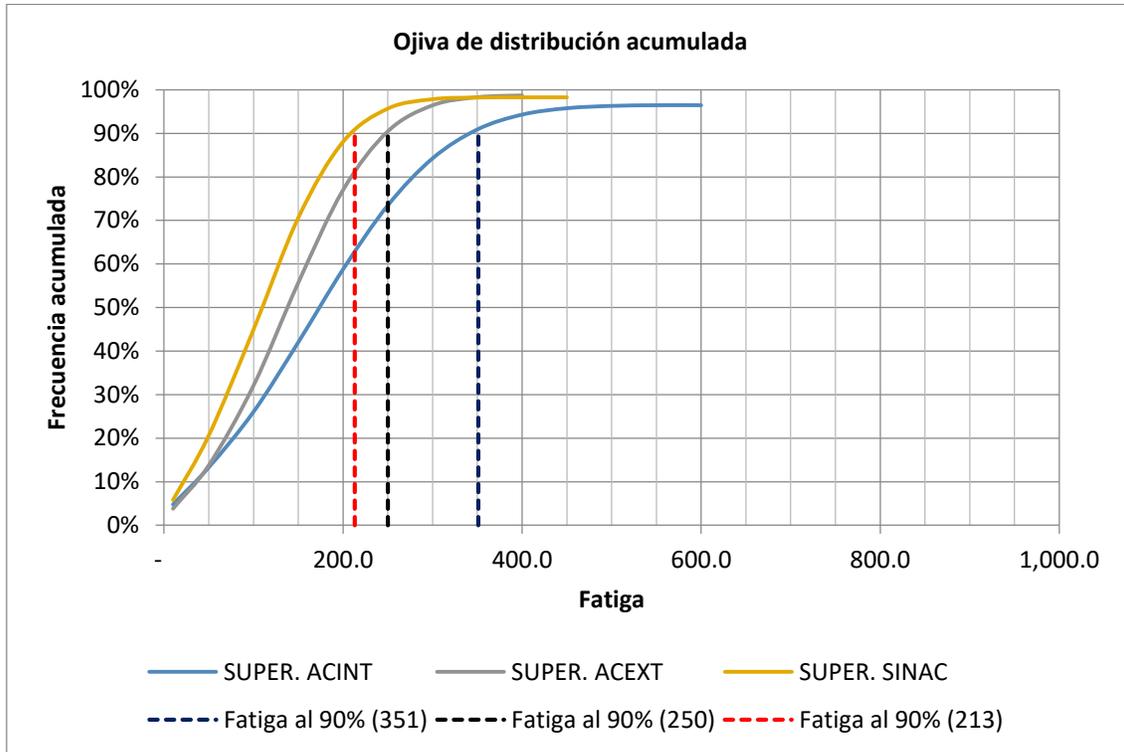


Figura 42. Ojiva de distribución acumulada: factor superior.



Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones.

Los resultados presentados en esta investigación reflejan la amplitud e importancia de los conocimientos básicos del bambú que son necesarios para generar estructuras confiables y seguras, para poderlos presentar, se ordenaron de acuerdo a su alcance: los de carácter general que se refieren a la investigación en su conjunto y los de carácter específico derivados de la investigación experimental.

De carácter general.

Sobre el objetivo del estudio.

El diseño de las vigas propuestas, se realizaron con bambú de la especie Oldhamii, que se obtuvo en el municipio de Comala, Colima, a partir de: la investigación básica, cultivo de los culmos, trabajos iniciales y del conocimiento estructural de las vigas. El procedimiento constructivo se implementó innovando herramientas y procedimientos para lograr la correcta colocación del refuerzo de acero, las unidades experimentales se construyeron con un claro de 3 m que es el más común en el sector de la vivienda. En el estudio de la viga reforzada propuesta se determinó su potencial estructural.

Con relación a los objetivos particulares

Para efecto de este trabajo se cumplieron con la totalidad de los objetivos particulares, sin embargo, el objetivo de probar de manera preliminar el bambú simple con diferentes diámetros y especies para conocer su comportamiento, se ejecutó parcialmente porque solamente fue posible obtener el bambú de la especie Oldhamii, en el proceso de pruebas iniciales de las vigas compuestas de bambú con cable de acero en diferentes posiciones, se realizó pero no se reflejaron los resultados por no ser viables y comparables con el diseño experimental propuesto.

De la indagación se descubrieron nuevas áreas de oportunidad que requieren atención como es el caso de probar otras especies, por lo que los aportes de esta investigación podrán servir de base para futuras investigaciones.



Sobre el cumplimiento de la hipótesis.

La hipótesis que se planteó para este trabajo fue que al añadir acero de refuerzo en el interior de un culmo de bambú, estaríamos diseñando un elemento compuesto que incrementaría su resistencia a la flexo-compresión, para poderla ratificar o desaprobar fue necesario determinar las variables involucradas que fueron: a.- variables independientes: la sección del culmo, que corresponde a su parte baja, media y superior, el tratamiento, que considera la colocación de acero en el interior, en el exterior o sin acero, el diámetros del tallo y finalmente la carga aplicada, b.- variables dependientes como: el módulos de sección, la deformación causada por la carga, el momento resistente y el esfuerzo o fatiga. Una vez que se concluyó con este proceso se procedió a realizar los ensayos cuyos resultados nos permitieron ratificar que al añadir acero de refuerzo en el interior del culmo incremento su capacidad de resistencia comparativamente con los resultados de añadirlo en el exterior o de no considerarlo, la finalidad planteada de poder ser utilizada la viga compuesta en un sistema de cubierta plana es totalmente factible ya que las resistencia obtenidas superan considerablemente las establecidas por las normas utilizadas en este tema.

De carácter específico

Sobre el enfoque teórico metodológico.

La revisión de la literatura que da origen al estado del arte, así como la experiencia obtenida en el campo en el proceso del cultivo del bambú en la zona norte del estado de Colima, integró una serie de nuevos conocimientos que proceden del ámbito forestal, del comportamiento estructural, conocimiento empírico, además del diseño experimental y la organización metodológica de las variables. En este sentido una de las aportaciones es la integración metodológica y los resultados que abonan al conocimiento de las condiciones requeridas de los tallos del bambú para su uso como material constructivo-estructural.

Las experimentaciones realizadas para conocer las resistencias de los diferentes tratamientos de los culmos reforzados de bambú no son concluyentes, ya que solo se aplicaron en una sola especie, Oldhamii.



Importancia de los resultados obtenidos

Los estudios de carácter científico relacionados con las propiedades mecánicas del bambú como es el caso de este trabajo que se refiere al comportamiento estructural cuando se somete a esfuerzos de flexo-compresión, son escasos comparados con los relacionados con el cultivo, propagación y beneficios ambientales. El bambú es un recurso forestal no maderable con mayor ventaja que la madera dado que su crecimiento es más rápido, en un periodo de 5 años adquiere su madurez mientras que la madera lo hace en 20, además al talar la madera se genera deforestación en la zona, mientras que con el bambú solo se cortaran las cañas que cumplan con la madurez quedándose las más jóvenes en el sitio manteniendo su nivel de follaje además de que su propagación es a través de rizomas garantizando la permanencia del cultivo, por todas estas características se vuelve un producto altamente rentable y por su capacidad de absorber las emisiones de CO₂ es amigable con el medio ambiente, razón por la cual universidades, empresas y gobierno recientemente han mostrado interés en este material.

La importancia de la investigación radicó, en el reforzamiento de los conocimientos básicos del bambú como: las especies existentes en México, el cultivo y la adaptabilidad que ha tenido en la parte norte del Estado de Colima, las fases del corte, el tratamiento para la conservación y secado, así como en los resultados obtenidos de las experimentaciones realizadas, a partir de la segunda etapa de esta investigación que correspondió a las pruebas iniciales, en las que se comprobó que al comparar vigas de la misma especie Oldhamii de 2"Ø versus 3"Ø, el diámetro de tres pulgadas contiene un mayor módulo de sección por lo tanto, mayor capacidad de carga, razón por la cual tiene sentido que en el "Manual de construcción en bambú" (Lucila Aguilar Arquitectos, 2018), se recomienda que los culmos empleados para las estructuras, presenten un diámetro mínimo de 9 cm. Así mismo al comparar tallos de diámetros exteriores similares, (oldhamii de 3"Ø), se observó (tabla 22) que a pesar de eso, uno de ellos puede tener un módulo de sección más grande por presentar paredes más gruesas que el otro, tal es el caso de las unidades experimentales que tuvieron un diámetro exterior igual de 8.90 cm, mientras que el interior de 3BI fue de 5.90 cm con un espesor de 1.50 cm obteniendo un módulo de sección de 64.96 cm³, en cambio



para 2ME su diámetro interior fue de 7.40 cm, un espesor de 0.75 cm y un módulo de 58.78 cm^3 , por lo que es muy importante caracterizar el material que vaya a ser utilizado como elemento estructural principalmente los diámetros y espesores de las cañas.

Continuando con las pruebas iniciales, para sustentar el diseño experimental se ensayaron probetas con refuerzo a base de cable de acero pretensado en culmos de 2" de diámetro para compararlos con los que no tenían refuerzo, observando que estos últimos presentaron una falla frágil mientras que los primeros la presentaron dúctil, por lo que podemos concluir que al añadir el cable de acero a la viga, se obtiene mayor seguridad estructural.

Para la última etapa de pruebas, las unidades experimentales se clasificaron por factor o sección del culmo, estas a su vez fueron discriminadas por el tratamiento con acero interior o exterior, de tal manera que el procedimiento estadístico aplicado para las distribuciones normales y acumuladas en el caso de "las bases" que son presentadas en las figura 43,

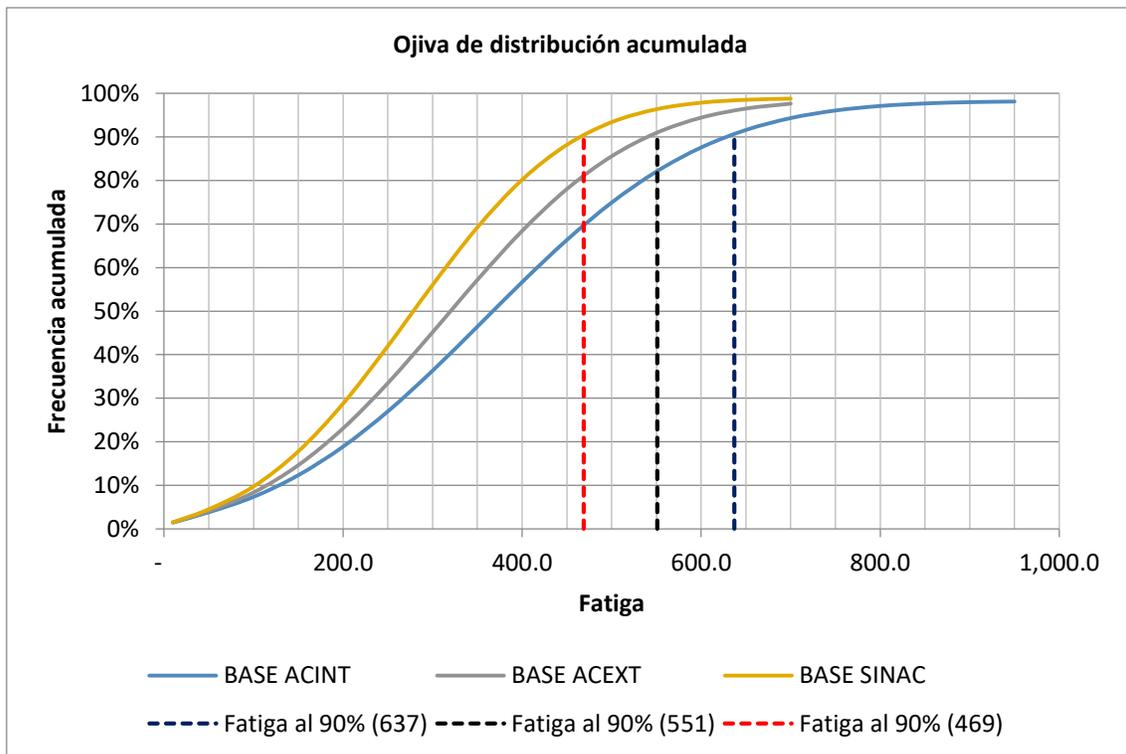


Figura 43. Ojiva de distribución acumulada: factor base.



Si pudiéramos considerar las vigas simples (sin acero) como testigo al 100%, al comparar las vigas con refuerzo de acero en el interior con respecto a las que fueron reforzadas con el acero en el exterior, si consideramos el máximo esfuerzo permisible al 90% de su fatiga, observamos que fueron de 135% para las primeras y de 117% para las segundas, entonces las primeras fueron las que tuvieron el mejor desempeño (fatiga).

En el caso del factor “sección media”, debido a que en las pruebas iniciales aún no se tenía definido el diseño experimental, además solo se contaba con culmos correspondientes a la base y a las partes superiores a partir de los 6 m de altura, igualmente se realizaron las vigas tanto con refuerzo de acero exterior como de acero en el interior, observamos que considerando también un esfuerzo máximo permisible al 90% de su fatiga para compararlas entre ellas, la diferencia resultante entre ambos esfuerzos fue de 42%, siendo en este factor, el tratamiento con acero interior el que mostro el mejor desempeño, ver figura 44.

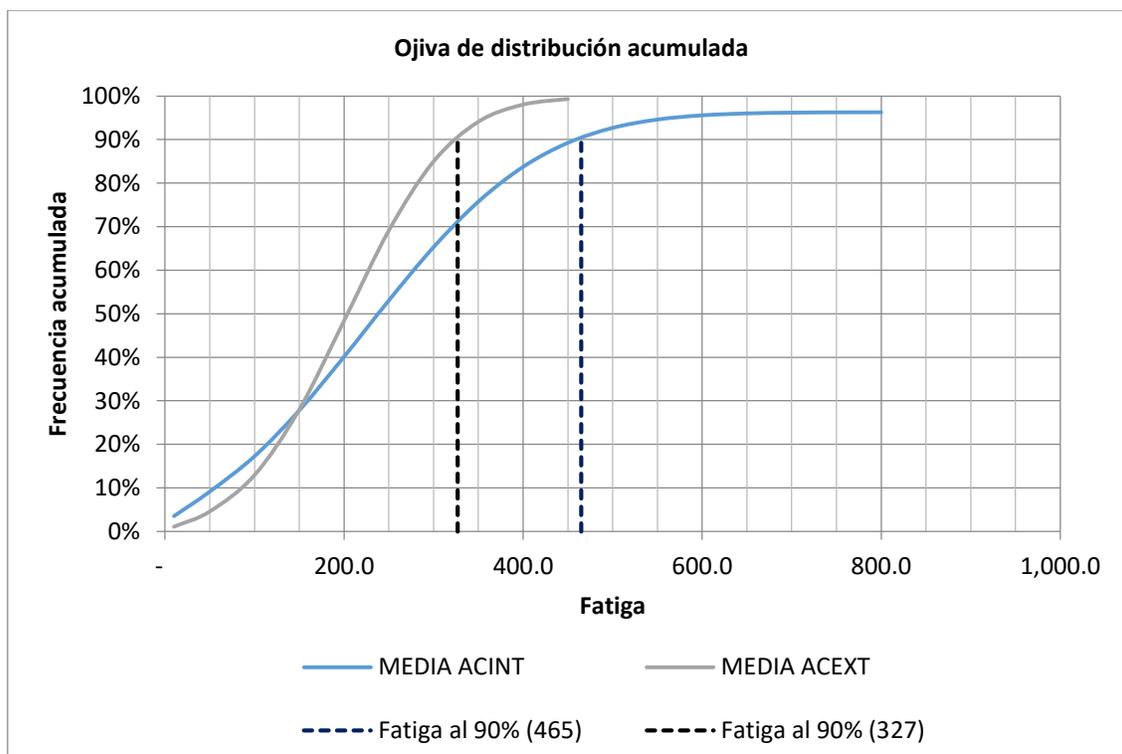


Figura 44. Ojiva de distribución acumulada: factor medio.



En el caso de “las puntas” ver figura 45, si pudiéramos considerar las vigas simples como testigo al 100%, al comparar las vigas con refuerzo de acero en el interior con respecto a las que fueron reforzadas con el acero en el exterior, si consideramos el máximo esfuerzo permisible al 90% de su fatiga, observamos que fueron de 165% para las primeras y de 117% para las segundas, al igual que en “las bases” y “los medios”, “las puntas” con acero interior tuvieron el mejor desempeño (fatiga).

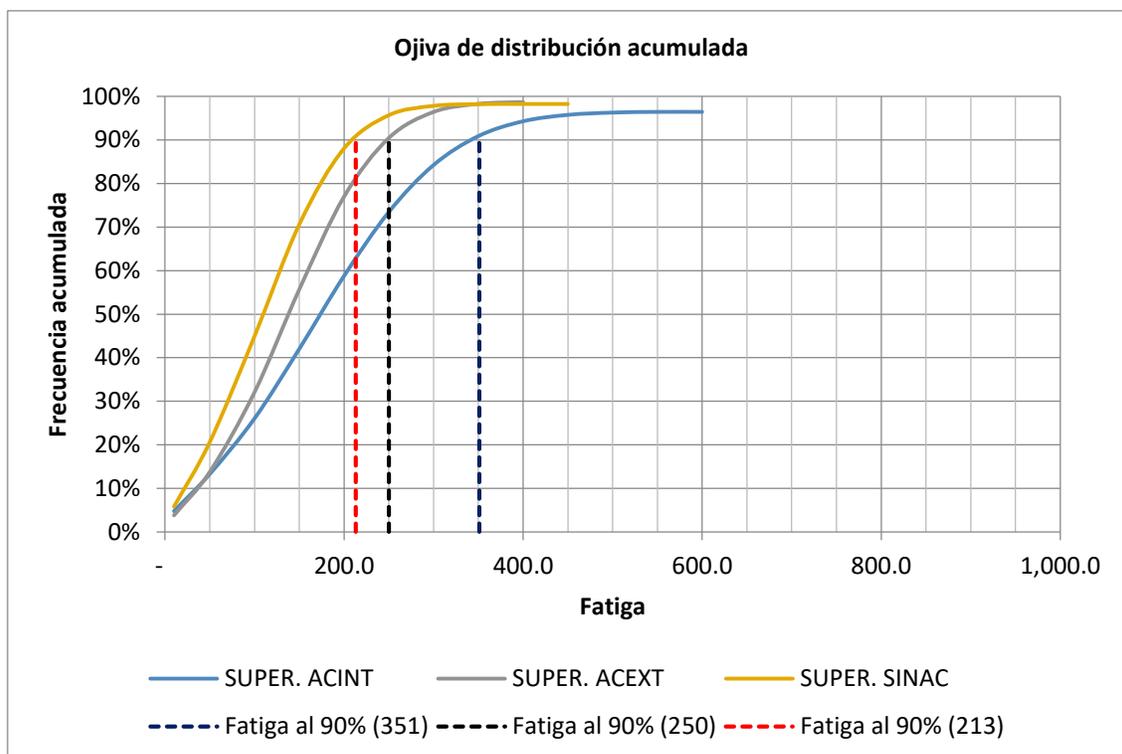


Figura 45. Ojiva de distribución acumulada: factor superior.

La causa por la que las vigas con refuerzo de acero interior presentaron un mejor desempeño con respecto a las de acero con refuerzo exterior pudiera ser que en el caso de las primeras, el acero de refuerzo tienen mayor sujeción ya que se observó durante las pruebas que este se mantuvo en su posición inicial después de presentarse la falla, en cambio en el caso de las segundas, el acero de refuerzo se movió al estarles aplicando la carga.

Dado que los esfuerzos generados de flexo-compresión, son la respuesta a las cargas aplicadas en una viga y estos esfuerzos están en función de las características geométricas y físicas de los materiales de tal manera que el acero tendrá una mayor



capacidad de soportar esfuerzos a tensión que el concreto, al exponer el material a su máximo esfuerzo entendiéndose permisible antes de su destrucción se le denomina fatiga del material, por lo que este estudio fue dirigido a determinar las fatigas del bambú con los diferentes tratamientos ya expuestos, entonces se concluye que las vigas de bambú reforzadas con acero interior presentaron los valores más altos de fatigas por lo que son los que tienen una mayor resistencia a los esfuerzos de flexo-compresión.

Otra forma de evaluar los resultados obtenidos en esta experimentación fue mediante la recopilación de información y el análisis de las normas vigentes consultadas para Latinoamérica, destacando principalmente las Normas Técnicas Complementarias para madera de la Ciudad de México y las Normas E 100 del Perú, de las cuales obtuvimos los esfuerzos máximos permisibles, (ver figura 46), en ella podemos observar que en las primeras el esfuerzo máximo permisible es 340 kg/cm^2 marcado con la línea roja y en las segundas el esfuerzo máximo permisible es de 65 kg/cm^2 , se desconoce la razón por la que sus valores difieren significativamente, en este caso solo se presentan como producto de la literatura estudiada, tomando como referencia las NTC para madera, no perdamos de vista el comportamiento de los diferentes factores pudiendo afirmar que todas las bases con sus diferentes tratamientos, se encuentran por encima del máximo esfuerzo permisible de la norma, en el caso de los medios el tratamiento de acero interior sucede lo mismo que en las bases, pero en el tratamiento acero exterior casi alcanza este valor con una diferencia del -3%, en los superiores, solo en el tratamiento con acero interior sobrepasa en 3% el valor, por lo que concluimos que los valores de esfuerzos máximos permisibles para el tratamiento del acero interior en su totalidad cumplen, destacando las bases con un 87% más y los medios con un 37%.



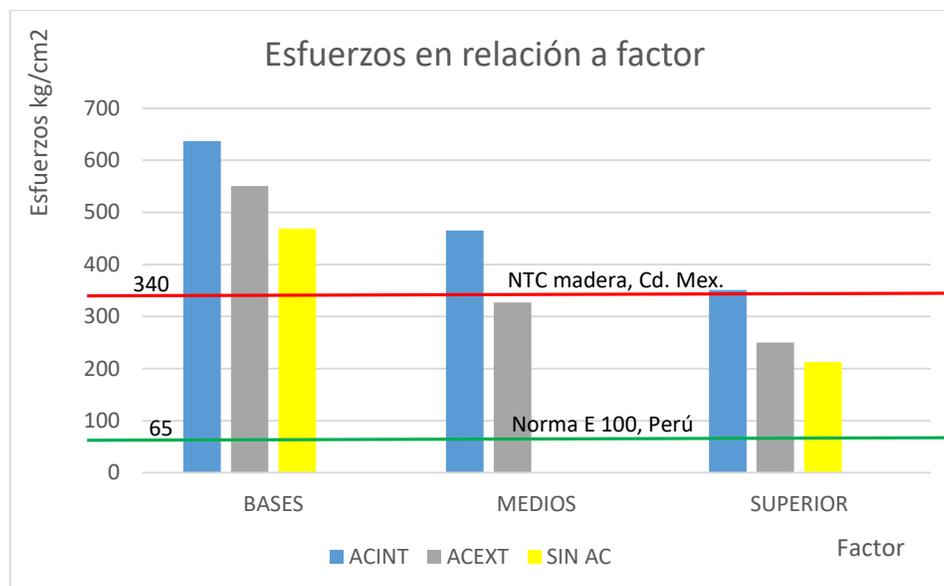


Figura 46. Esfuerzos máximos permisibles.

Aportaciones

La mayoría de los estudios que se revisaron en la literatura nos mencionan la carencia de resultados científicos del uso del bambú a nivel estructural, presentándose una gran cantidad de respuestas empíricas con las que se está trabajando este material, por lo que esta investigación se presenta como una innovación científica ya que según el estado del arte no existen estudios similares, la mayor parte de la información relacionada con el tema, se refiere a estudios sobre las propiedades mecánicas a tensión, compresión y cortantes paralelas y perpendiculares a la fibra del bambú, todos ellos en relación a las uniones.

Existe ya una patente en el mercado denominado Bambulosa, esta consiste en un sistema diseñado para cubiertas y entre pisos, en donde se utilizan vigas a las que se les añade el refuerzo por la parte exterior que consiste en una solera que se sujeta en los extremos y en el centro a manera de arco se coloca un tubo, esta propuesta sigue siendo una respuesta empírica ya que parte del mismo principio de uniones realizadas con elementos de sujeción ajenos al mismo material y que no se discriminan las características geométricas de las secciones de los culmos, ignorando las verdaderas capacidades estructurales del bambú.



Es decir, que la mayoría de las estructuras realizadas hasta ahora se concentran principalmente en dar solución a las uniones de los elementos generados en las mismas por lo que consideramos que nuestro trabajo aporta un nuevo enfoque en el que se busca entender el comportamiento del elemento en su totalidad así como en su particularidad física del material para poder explotar sus ventajas y considerar sus desventajas en un diseño estructural más consciente y con fundamentos científicos.

Finalmente el aporte más importante que sabemos no es concluyente es el de la obtención de aprox. 14,000 resultados de esfuerzos que concluyeron en la obtención de esfuerzos máximos permisibles al 90% de las fatigas registradas, que servirán para el diseño de vigas.

Al igual que el sistema de cubiertas y entre pisos patentado denominado Bambulosa que está formado por una serie de vigas paralelas entre sí, para formar un diafragma con los resultados obtenidos se puede diseñar de manera óptima cualquier tipo de cubiertas y entrepisos considerando los esfuerzos máximos permisibles, los módulos de sección de la sección transversal del culmo a utilizarse y las máximas deformaciones.

Recomendaciones para continuar con la investigación en lo futuro

Profundizar en el conocimiento acerca de las propiedades físicas y mecánicas de la especie estudiada Oldhamii, para considerar su uso como un material estructural factible de ser empleado de forma combinada con otros materiales como el barro, el jalcreto y el concreto.

Para ampliar los conocimientos obtenidos y presentados en la presente investigación se recomienda realizar trabajos análogos para determinar los esfuerzos últimos permisibles para compresión y tensión, además es necesario ensayar con otras especies como la Angustifolia y Aculeata, que también se encuentran cercanas a la zona de estudio.

Es sustancial considerar al bambú como una opción para la edificación de vivienda por las virtudes que ostenta, al mismo tiempo que con un apropiado manejo forestal puede crear riqueza sostenible para este sector.



Para fijar estándares en las resistencias del bambú se necesita uniformidad en los protocolos de los ensayos, de tal suerte que de la edad del culmo se debe de tomar en cuenta durante las pruebas para aprovechar las propiedades de este material al máximo que se da cuando este ha terminado su ciclo biológico.

Se necesitan divulgar los resultados obtenidos de la escasa investigación realizada sobre este material desde el punto de vista estructural en México para establecer indicadores de diseño a partir de las propiedades geométricas y mecánicas del bambú.

Nuevas preguntas de investigación

¿Cuáles serán las fatigas para las vigas de bambú sujetas a flexión, para la especie estructural Oldhamii aplicando Norma Técnica Colombiana NTC 5525?

¿Cuáles serán las fatigas para vigas de bambú sujetas a flexión, para las especies estructurales: Angustifolia y Aculeata?

¿Cuáles serán las fatigas para columnas de bambú sujetas a compresión para las especies estructurales: Angustifolia, Aculeata y Oldhamii?

¿Cuáles serán las fatigas para elementos de bambú sujetos a cortante para las especies: Angustifolia, Aculeata y Oldhamii?

¿Cuál es la configuración apropiada para la construcción de una cubierta utilizando las vigas de bambú con refuerzo interior que pueda ser utilizada en el sector de la vivienda?

¿Bajo qué condiciones de madurez, contenido de humedad, preservación es recomendable el uso del bambú para la construcción de viviendas?



Referencias Bibliográficas

- Arquitecturapura. (XXI). Obtenido de arquitectura-vernacula:
<https://www.arquitecturapura.com/arquitectura-vernacula/>
- Barrera, J. V. (2002). Diseño y elaboración a escala natural de armaduras en guadua angustifolia. Obtenido de
https://www.usmp.edu.pe/centro_bambu_peru/pdf/Diseno_elaboraci%C3%B3n_armaduras.pdf
- Botero Cortés, L. F. (2009). Reproducción de la guadua angustifolia por el método de chusquines. Obtenido de https://www.doc-developpement-durable.org/file/Arbres-Bois-de-Rapport-Reforestation/FICHES_ARBRES/bambou/Propagation-of-Guadua-Angustifolia-using-the-Chusquines-method.pdf
- Castillo, A. C. (segundo semestre de 2011). El bambú en México. Obtenido de revista electronica de arquitectura urbana, número 6, pp. 223-243:
https://www.usjt.br/arq.urb/numero_06/arqurb6_06_ponto_de_vista_03_alberto_cedeno.pdf
- Chihuahua., I. T. (11 de 10 de 2018). Cálculo del Tamaño de la Muestra para Estimar una Media. Obtenido de
<http://www.itchihuahua.edu.mx/academic/industrial/estadistica1/cap01d.html>
- Diseño Completamente al Azar DCA. (6 de noviembre de 2017). Obtenido de https://www.youtube.com/watch?v=d_F8idzvp6U
- El bambú como material de construcción. (24 de mayo de 2015). Obtenido de <https://bambumaterialconstruccion.blogspot.com/2015/05/el-bambu-es-uno-de-los-materiales.html>
- González, J. T. (2010). La arquitectura sin arquitectos, algunas reflexiones sobre arquitectura. Obtenido de Revista AUS, núm. 8, pp. 12-15:
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=281722857004>
- Google patents: WO2016122302A1. (2016). Sistema prefabricado para losas y techos con bambu estructural. Obtenido de <https://patents.google.com/patent/WO2016122302A1/es?q=WO+2016%2f122302+A1>
- Lucila Aguilar Arquitectos. (6 de 11 de 2018). Manual para la construcción con bambú. Obtenido de <https://www.forestmaderero.com/articulos/item/manual-de-construccion-en-bambu-por-la-arquitecta-mexicana-lucila-aguilar.html>
- Norma Técnica Colombiana NTC 5525. (13 de junio de 2018). Obtenido de <https://construccionesuce.wordpress.com/2018/06/13/propiedades-fisico-mecanicas-bambu-ntc-5525/>



- Norma Técnica E.100 Bambú. (03 de marzo de 2012). Obtenido de <http://apuntesdearquitecturadigital.blogspot.com/2019/09/norma-tecnica-e100-bambu-ministerio-de.html>
- NTC de Diseños y construcción de estructuras de madera. (15 de DIC de 2017). Obtenido de <https://www.smig.org.mx/archivos/NTC2017/normas-tecnicas-complementarias-reglamento-construcciones-cdmx-2017.pdf>
- Ordóñez Candelaria, V. R. (1999). Perspectivas del bambú para la construcción en México. Obtenido de Madera y Bosques, vol. 5, núm. 1, pp. 3-12: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61750102>
- Ortiz, M. (2020). Exceltotal. Obtenido de Cómo hacer una campana de Gauss en excel: <https://exceltotal.com/como-hacer-una-campana-de-gauss-en-excel/>
- Rodriguez, C. (2000). Los bambúes nativos de México. CONABIO. Biodiversitas, 30:12-15.
- Rodríguez, R., Galicia, L., Sánchez, W., Gómez, L., Zarco, A., & Cecon, E. (2009). Usos actuales, distribución potencial y etnolingüística de los bambúes leñosos (bambuseae) en México. Obtenido de Ethnobotany|CEB2009Tradiciones & transformaciones en Etnobotánica: <http://scifunam.fisica.unam.mx/mir/el/marinacapitulodelibroRodriguez.pdf>
- Romo, I. J. (enero-junio de 2006). El bambú como material de construcción. Obtenido de Conciencia Tecnológica, núm. 31, pp. 67-69: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94403115>
- Santiago, A. H. (agosto de 2018). “Potencial estructural del bambú Guadua aculeata y su integración a un sistema constructivo para la vivienda unifamiliar” Caso de estudio: Estado de Veracruz. Tesis. CdMx, México.
- Tremari, R. G. (julio de 1981). El calculo y diseño en las estructuras de concreto reforzado. Guadalajara: EDUG/Uniersidad de Guadalajara.
- Víctor Ordóñez, M. M. (2002). Manual para la construcción sustentable. CONAFOR.

ANEXOS.



Anexo 1. Artículo para revista.

Revista Ingeniantes 2019 Año 6 No.2 Vol. 2

Ingeniantes

Adaptabilidad del bambú en el municipio de Comala: un recurso forestal no maderable



Colaboración

Víctor Manuel Guevara Aguilar; José Ricardo Moreno Peña; Santiago Arceo Díaz; Tecnológico Nacional de México / Tecnológico de Colima, Rogelio Cesar de Lira Fuente, Consejo Colimense del Bambú

RESUMEN: El cultivo del bambú dado su rápido crecimiento ayuda a frenar la deforestación, así mismo favorece la restitución del suelo y cambio climático. Este trabajo tiene como objetivo medir la adaptabilidad de la especie de bambú *guadua angustifolia* a las condiciones climatológicas y tipos de suelo en un cultivo de 40 hectáreas, en la localidad "El Remudadero", municipio de Comala, estado de Colima. El diámetro y la altura de los brotes medidos se compararon con la información existente en la literatura. Los registros se tomaron de plantas de cinco años de edad. El diámetro y la altura promedio de una muestra de 100 brotes de bambú fue del 79% y del 98% del valor esperado. Finalmente se observa que es viable el cultivo de esta especie en el Estado de Colima.

PALABRAS CLAVES: adaptabilidad, bambú, especies maderables, *guadua angustifolia*, recurso forestal.

ABSTRACT: The cultivation of bamboo, given its rapid growth, helps to stop deforestation, as well as favoring the restitution of soil and climate change. This work aims to measure the adaptability of the *guadua angustifolia* bamboo species to the weather conditions and soil types in a 40-hectare crop, in the town "El Remudadero", municipality of Comala, state of Colima. The diameter and height of the measured shoots were compared with the information in the literature. Records were taken from five-year-old plants. The average diameter and height of a sample of 100 bamboo shoots was 79% and 98% of the expected value. Finally, it is observed that the cultivation of this species is viable in the State of Colima.

KEY WORDS: adaptability, bamboo, forest resource, *guadua angustifolia*, timber species.

INTRODUCCIÓN

Actualmente existe un problema serio de deforestación en el país, provocando el aceleramiento de la desertificación. Por otro lado, la madera es un recurso indispensable para el ser humano, desde la antigüedad se ha utilizado como leña para calentar agua, preparar alimentos, calentar el hogar, fabricar muebles, construir casas, etc. Además su industrialización genera fuentes de trabajo, por ejemplo: en estructuras y cimbras para la construcción, para la producción de diferentes tipos de papel, fabricación de muebles, etc. La madera es un recurso forestal renovable pero lento, un pino necesita más de 20 años para que se pueda aprovechar todo su potencial.



Ingeniantes

Revista Ingeniantes 2019 Año 6 No. 2 Vol. 2

Es importante señalar que hay más de 1200 especies de bambú en el mundo. En México tenemos alrededor de 40 especies nativas de bambú. Comparado con las especies maderables, los bosques de bambú captan más agua y bióxido de carbono [1]. Las plantaciones de Guadua pueden funcionar como sumideros de CO₂. Los cambios en la capacidad de fijación dependen de la edad de la plantación, del crecimiento y de la madurez de los culmos, esto aunado a su rápido crecimiento y al hecho de que no necesita de un sistema de riego lo vuelve una alternativa viable para frenar la deforestación, ayudando a revertir el cambio climático; coadyuvando al desarrollo sustentable de las comunidades.

El municipio de Comala se encuentra en la parte norte del Estado de Colima, en las faldas del Volcán de Fuego, donde las condiciones climáticas son similares a las de regiones en donde el cultivo del bambú (*Guadua angustifolia*) es favorable. Debido a la creciente demanda de este recurso natural se conformó el Consejo Colimense del Bambú, integrado por investigadores, artesanos, arquitectos y productores que han arriesgado parte de sus recursos y reservas territoriales para probar la producción de la especie de bambú *Guadua angustifolia*, de origen centroamericano y considerada una de las más resistentes del continente Americano.

En la República Mexicana según [2] se encontraron especies de bambú en 23 de las 36 Entidades Federativas, sin embargo la mitad de ellas se concentra en sólo 4: Chiapas 17%, Veracruz 14%, Oaxaca y Guerrero con 13 y 6 % respectivamente".

[3] plantea que dadas las características de la especie de bambú *Guadua angustifolia*, se puede adaptar a la región noreste del estado de Colima, ayudada por sus condiciones climáticas similares. La *Guadua* crece óptimamente en sitios cuya altura sobre el nivel del mar va desde los 0 a los 1800 metros, precipitaciones entre 1200 y 2500 milímetros anuales, temperaturas entre 18° y 25° centígrados y humedad relativa superior al 70%. (Condiciones similares a las que pueden encontrarse en el Estado de Colima). Se adapta a otras condiciones extremas y fuera de los rangos antes mencionados pero su desarrollo no es ideal. No aguanta condiciones de sequía prolongadas. Los suelos ideales para su desarrollo son aquellos ricos en materia orgánica, bien drenados, de textura franco arenosa, areno-limosa, arcillosa y franco-limosa. A pesar de preferir las orillas de los ríos y quebradas, se encuentra en óptimas condiciones en sitios con pendientes y alejados de fuentes de agua.

[4] comentan en investigaciones realizadas en el Centro Nacional para el Estudio del Bambú - Guadua en el departamento del Quindío donde se presentan condiciones óptimas para el desarrollo de la *Guadua* (temperatura 25 °C; 1240 msnm.; precipitación 2242 mm/año; brillo solar 1757 horas/luz/año).

El presente trabajo de investigación estudia la adaptabilidad del bambú (*Guadua angustifolia*) en el municipio de Comala, estado de Colima. En la localidad del Remudadero, el ingeniero Rogelio Lira, productor y miembro fundador del Consejo Colimense del Bambú, sembró 40 hectáreas de bambú de la especie *Guadua angustifolia*, esta es una de las más utilizadas en el mundo por sus características de uso estructural y es originaria de sur América principalmente de Colombia, Ecuador y Perú.

MATERIALES Y MÉTODOS

El método tradicional de cultivo que [5] menciona, es el de propagación a partir de chusquines, los cuales se encuentran en la base de los plantones, y se originan a partir de las yemas adventicias en las raíces y rizomas. Estas pequeñas plantas emergen una vez que el plantón o el culmo es cosechado o por razones mecánicas del viento son derribadas. Este método de propagación es muy recomendado por el alto índice de supervivencia y desarrollo; cada brote que sale del rizoma puesto en vivero puede producir de dos a 12 plántulas nuevas en cuatro meses.

Otro autor [5] menciona que algunas formas de propagación empleadas con las *Guaduas* incluyen el uso de ramas laterales y secciones completas de culmos y/o rizomas.

El ingeniero de Lira mostró un cultivo entre 4 y 5 años de edad observando brotes con diámetros de más de 6 cm. El método de propagación asexual es decir sin semilla que utiliza el ingeniero, es a partir de chusquines como lo describe [6]. La reproducción con semilla o reproducción sexual del bambú no es viable porque los periodos de floración son de 30, 60, 90 o más de 100 años, hecho que hace inviable esta metodología.

La raíz o rizoma del bambú forma un sistema radicular, esto significa que de un rizoma, nace otro rizoma y así sucesivamente de adentro hacia afuera de manera radial, por cada rizoma hay un tallo, (Figura 1). Conforme pasa el tiempo los nuevos brotes son más gruesos que sus padres y el diámetro de cada uno de los tallos no cambia o sea se mantiene constante desde el nivel del terreno hasta la parte más alta.

A diferencia de los árboles maderables, el bambú no presenta tejido de cambium, es decir el tallo o tronco no crece con el tiempo. Esta es una ventaja del bambú porque desde un inicio sabremos el diámetro que tiene el tallo o culmo al brotar de la tierra.

Los *Guaduales*, deben de estar separados entre sí más de 5 m, además deben de existir camellones para que los mozos puedan acceder con facilidad a cualquiera de ellos para manejar el cultivo que consiste básicamente en realizar un corte exactamente en el primer nodo de cada tallo llegado o maduro, este corte no se



deberá realizar en el entre nodo porque al hacerlo, el tocón (parte del tallo que queda unida a la raíz) puede almacenar agua y la humedad puede provocar que se pudra la planta, en el caso de la guadua nos damos cuenta que el tallo está maduro porque cambia de color, cuando esta tierno el tallo es verde y después de un tiempo, aparecen manchas amarillas, las cuales se expanden por el tallo hasta cubrirlo completamente. Además al cortar los tallos más pequeños, esto permitirá que sus hijos broten y se desarrollen sin problemas de interferencia aérea. Para realizar la poda del bambú, nunca se deberá cortar más del 33% de los tallos, es decir, si tenemos 10 tallos llegados, solo se cortaran 3 y se esperaran tres meses para realizar otro corte. Si se cortan todos los tallos se puede provocar un desequilibrio en la planta para realizar el proceso de fotosíntesis.



Figura 1. Brote de bambú de la especie *Guadua angustifolia*.

Se pudo observar que el proceso de adaptación de las especies al clima de Colima, ha sido mejor de lo que se esperaba al decir de los productores, por lo que se requiere probar las ventajas de este recurso natural para incrementar su uso de forma adecuada y lograr con esto su desarrollo sustentable en el estado y a nivel regional, incidiendo en la rama de la construcción.

La adaptabilidad de los brotes de bambú se evaluó en términos de la comparación del diámetro y altura, de una población de 14,000 plantas de 5 años de edad. De acuerdo a [7], el tamaño mínimo necesario para que los resultados del estudio tengan un nivel de confianza del 95%, con un margen de error del 5%, es de aproximadamente 100 plantas, las que se analizaron y se eligieron aleatoriamente, los diámetros y alturas medidos fueron comparados con la información proporcionada por [8], en donde se dice que "La planta con el transcurrir del tiempo origina cada vez nuevos rebrotes que van evolucionando en diámetro y altura a tal punto que dependiendo del tipo de suelo y de las condiciones cli-

máticas logra entre 10 y 13 cm de altura en 30 días y diámetros que se incrementan a un promedio de 0.10 mm mensuales; al finalizar el primer año tiene un promedio de 12-14 rebrotes con vida productiva de 3-4 meses al cabo de los cuales se secan de arriba hacia abajo para dar paso a nuevos rebrotes con que adquieren mayor altura y salen con diámetro mayores. En condiciones normales en las primeras fases de desarrollo, siempre los nuevos hijos (renuevos) poseen mayor tamaño de rizoma, diámetro y altura, con relación a la planta que los generó. A partir del tercer año de sembrada la planta original, se logra tener entre 18-20 rebrotes, alturas que oscilan entre los 5 y 7 m y diámetros de 4-6 cm; época en la cual se deben realizar los primeros tratamientos silviculturales para evitar exceso de tallos. Entre los 3 y 6 años la planta de guadua entra en una etapa de desarrollo vertiginoso, adquiere alturas entre 12 a 15 m, incremento de los diámetros entre 9 y 11 cm y disminución en el número de renuevos siendo estos de 12-14; A partir de esta etapa la planta estabiliza su desarrollo evolutivo, estandarizando patrones como altura promedio de 15 a 18 m, diámetros entre 10-12 cm y promedio/Ha de 4000 a 4500 individuos diferenciados de manera clara de acuerdo a la edad de desarrollo así: Renuevos, guaduas viches (jóvenes), guaduas hecha (madura) y guaduas secas (las que culminan su ciclo). En esta etapa el guadua se considera desarrollado en cuanto a producción de individuos debidamente formados en diámetro y altura".

Salas fue el autor que mejor describió el crecimiento del bambú de la especie en cuestión, con esta información se construyó la tabla 1.

TABLA 1. Rango de alturas y de diámetros de acuerdo a [8].

Año	Alturas			Diámetros		
	<	Prom.	>	<	Prom.	>
	(m)	(m)	(m)	(cm)	(cm)	(cm)
1	1.2	1.4	1.6	3	3.5	4
3	5	6	7	4	5	6
6	12	13.5	15	9	10.5	12
8	15	16.5	18	10	14	18

Posteriormente estos datos se utilizaron para obtener las gráficas de comportamiento promedio de las alturas en metros (m) y diámetros en centímetros (cm). De los tallos, mostrados en las Figuras 2 y 3.

En la figura 2. Se observan la tendencia del comportamiento de las alturas alcanzadas por los tallos del bambú a diferente edad, a partir de la información proporcionada por Salas.



De manera similar en la figura 3. Observamos la tendencia del crecimiento de los diámetros alcanzados de acuerdo a su edad.

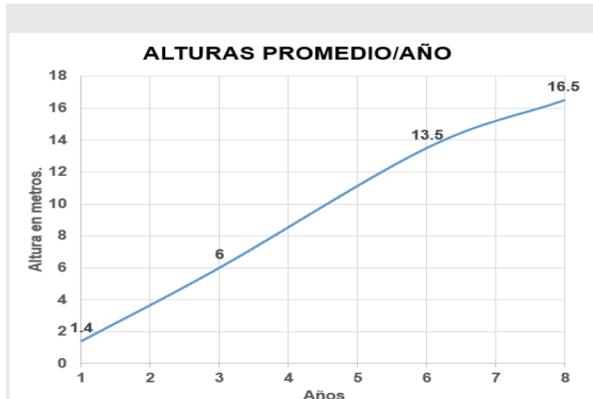


Figura 2. "Comportamiento de crecimiento de los tallos en relación a su edad."

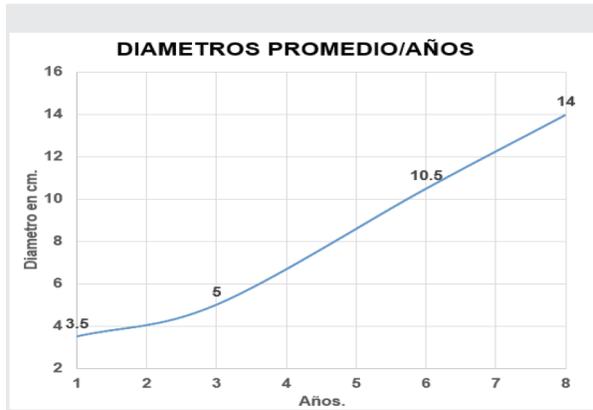


Figura 3. "Comportamiento de crecimiento de los diámetros respecto a su edad"

De acuerdo a la información proporcionada por [8] se obtuvieron dos ecuaciones para cada una de las tendencias presentadas anteriormente, las primeras dos ecuaciones determinan la altura y las otras dos, el diámetro tomando en cuenta la edad de los tallos.

- Las ecuaciones de alturas son:
- I. $y = -0.034x^3 + 0.383x^2 + 1.214x - 0.163$
Obteniendo un coeficiente de correlación $R^2=1$.
 - II. $y = 2.2103x - 0.5966$
Para la que se obtuvo un coeficiente de correlación $R^2 = 0.9924$
- Las ecuaciones obtenidas para los diámetros son:
- III. $y = -0.0333x^3 + 0.55x^2 - 1.0167x + 4$
Obteniendo un coeficiente de correlación $R^2 = 1$
 - IV. $y = 1.5517x + 1.2672$
Para la que se obtuvo un coeficiente de correlación $R^2 = 0.98$

El coeficiente de correlación R2, se define como la proporción de la varianza total de la variable explicada por la regresión. Cuanto más cerca de 1 se sitúe su valor, menor será el ajuste del modelo a la variable. A pesar de que los ajustes lineales dados por las ecuaciones II y IV presentan un coeficiente de correlación muy cercano a 1, se optó por utilizar las ecuaciones polinómicas I y III porque reproducen mejor el crecimiento de altura y diámetros esperados para brotes de 5 años de edad (ver las figuras 4 y 5).

RESULTADOS

Aplicando la ecuación I, polinómica de orden 3 con $R^2=1$, ver figura 4, donde "Y" representa la altura de los brotes, medida en metros, y "X" representa el tiempo, medido en años, se proyecta que para una edad de 5 años la altura será de 11.19 m. Si aplicamos la ecuación II, ecuación lineal con $R^2=0.99$, la altura será de 10.45 m. En cuanto a la altura de los culmos, registrados en campo, el rango de la muestra es de 9.87 m. a 10.92 m.

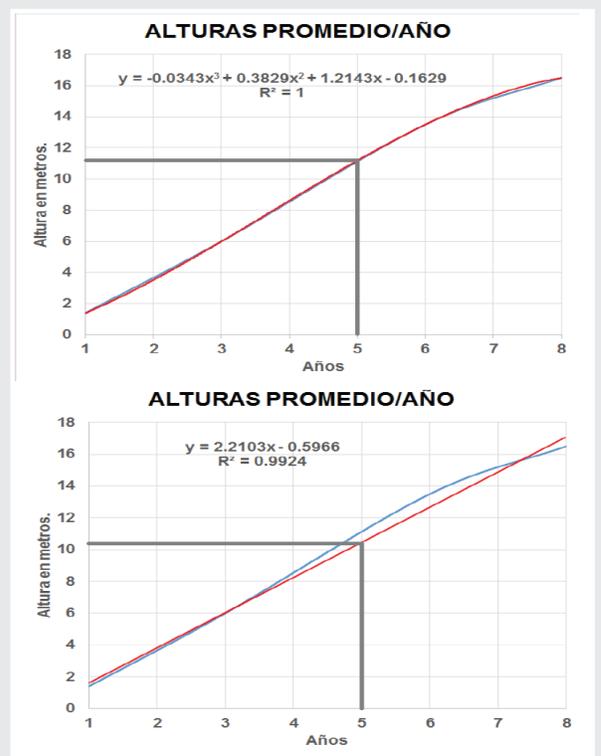


Figura 4. Comparación entre línea de tendencia polinómica y lineal para determinar la altura de los brotes.

Asimismo, el diámetro esperado tras un periodo de 5 años, de acuerdo a la ecuación III, polinómica de orden 3 con $R^2 = 1$, donde "Y" representa el diámetro de los brotes, medido en centímetros, y "X" representa el tiempo, medido en años será de 8.50 cm. Ver figura 5.



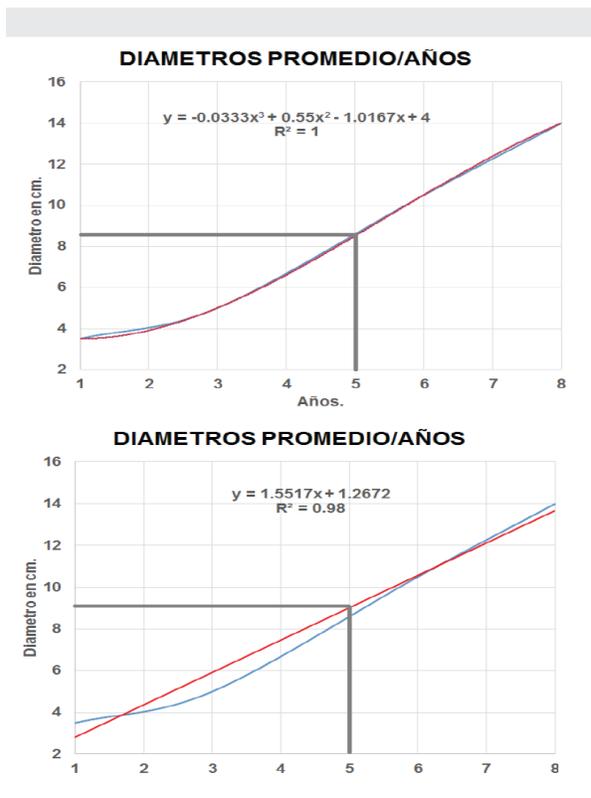


Figura 5. Comparación entre línea de tendencia polinómica y lineal para determinar el diámetro de los brotes.

Si aplicamos la ecuación IV, con $R^2 = 0.98$, el diámetro será de: 9.02 cm.

El rango de los diámetros registrado en el Remudadero son respectivamente 6.50 y 6.98 cm.

CONCLUSIONES

Este trabajo demuestra la viabilidad del cultivo del bambú: de acuerdo a las mediciones realizadas, tanto para el diámetro externo como para la altura, los brotes plantados en el sitio de estudio alcanzaron, respectivamente, 6.74 cm y 10.92 m, equivalentes al 79% y el 98% de los valores reportados por Salas para una edad de 5 años. Debe aclararse que este estudio se encuentra en una fase temprana y se requiere más registros para los años futuros e iniciar con pruebas de resistencia, cuando los culmos presenten más de 9 cm (el diámetro recomendado para utilizar elementos estructurales hechos de bambú).

Debe mencionarse, que los factores climáticos, como la precipitación, temperatura, asoleamiento y humedad, así como la altura respecto al nivel del mar y el tipo de suelo del predio el Remudadero están dentro de los rangos recomendados por [3] y (4). Sin embar-

go, se requieren más estudios que permitan determinar cuál es el factor, de los antes mencionados, que crea el déficit observado en el diámetro de los brotes, que es el que más difiere respecto a los valores óptimos. Así mismo, sería necesario realizar mediciones a futuro para concluir si las plantas en el sitio de estudio pudieron lograr el diámetro y altura óptimos en su estado de madurez: una altura máxima de 30 m y un diámetro máximo de 25 cm para la especie *Guadua angustifolia*. Los autores de este trabajo estiman que el déficit obtenido es debido a que en la región cercana a la plantación, las lluvias se presentan durante el verano, del 21 de junio al 21 de septiembre, disminuyendo significativamente el resto del año, lo cual afecta el desarrollo óptimo de la planta, por ejemplo que esta alcance alturas y diámetros reportados por Salas, aun considerando la capacidad del bambú para almacenar agua.

El presente trabajo contribuye a servir como un estudio base para determinar la viabilidad del bambú en Comala. Este recurso forestal podría coadyuvar al desarrollo social y económico de productores y empresarios que apuestan por alternativas ambientalmente sustentables.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Camargo, J. C., Rodríguez, J. A., & Arango, A. M. (2010). *Crecimiento y fijación de carbono en una plantación de guadua en la zona cafetera de Colombia*. <http://bco.catie.ac.cr/portal-revistas/index.php/RRNA/article/view/99/180>

[2] Rodríguez, R., Galicia, L., Sánchez, W., Gómez, L., Zarco, A., & Ceccon, E. (2009). *Usos actuales, distribución potencial y etnolingüística de los bambúes leñosos (bambuseae) en México*. *Ethnobotany/CEB2009 Tradiciones & transformaciones en Etnobotánica*: <http://scifunam.fisica.unam.mx/mir/el/marinacapitulodelibroRodriguez.pdf>

[3] Botero Cortés, L. F. (2009). *Reproducción de la guadua angustifolia por el método de chusquines*. https://www.doc-developpement-durable.org/file/Arbres-Bois-de-Rapport-Reforestation/FICHES_ARBRES/bambou/Propagation-of-Guadua-Angustifolia-using-the-Chusquines-method.pdf

[4] Forero, L. A., Cabrera, L., & Delgado, C. (2005). *Evaluación de adaptabilidad de la guadua (Guadua angustifolia Kunt.) En las veredas caldera bajo y san antonio municipio de pasto - nariño*. *Revista de ciencias agrícolas*. 22(1): <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6191421.pdf>

[5] Márquez de Hernández, L., & Marín Ch, D. (2011). *Propagación y crecimiento de Guadua amplexifolia Presl., G. angustifolia kunth y Elytostachys typica Mc Clure, en tres tipos de sustratos*. *Obtenido de Bioagro*, 23, (3) pp. 191-198: <https://www.redalyc.org/pdf/857/85721149006.pdf>



Anexo 2. Gráficas prueba inicial:

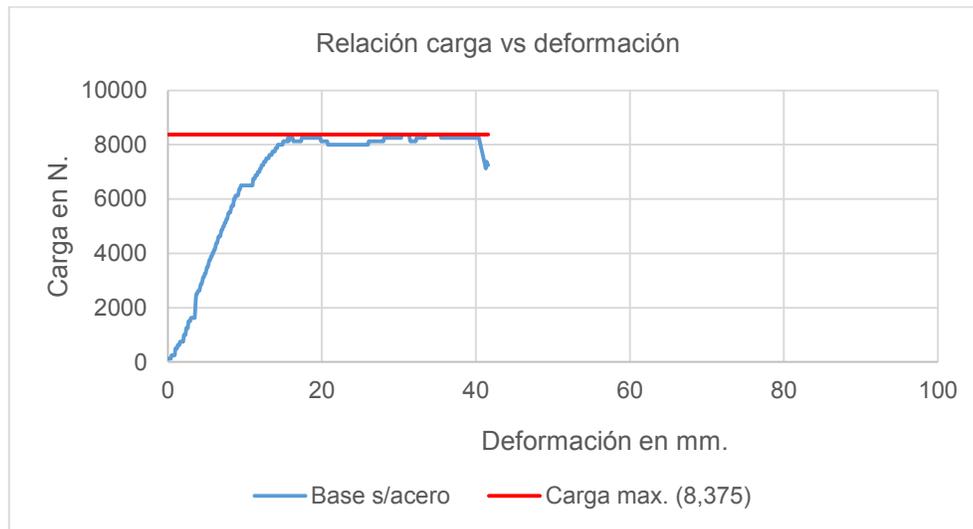


Figura 47. Base s/acero

La probeta base s/acero, resistió una carga máxima de 8,375 N y generó una deformación de 40.5 mm como se muestra en la figura 1.

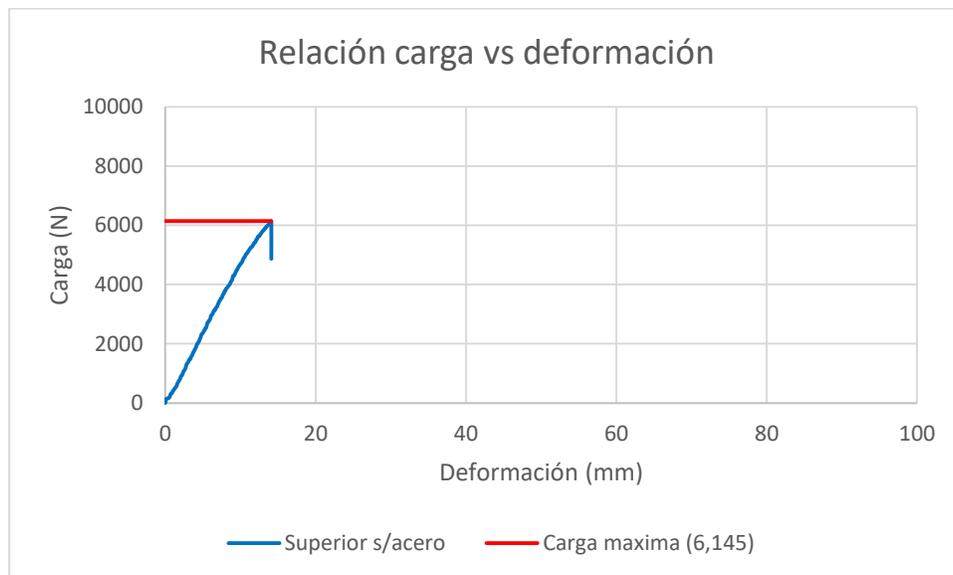


Figura 48. Superior s/acero

La probeta superior s/acero, resistió una carga máxima de 6,145 N y generó una deformación de 14.1 mm como se muestra en la figura 2.



Anexo 3. Gráficas prueba final:

Tratamiento acero interior

Sección base.

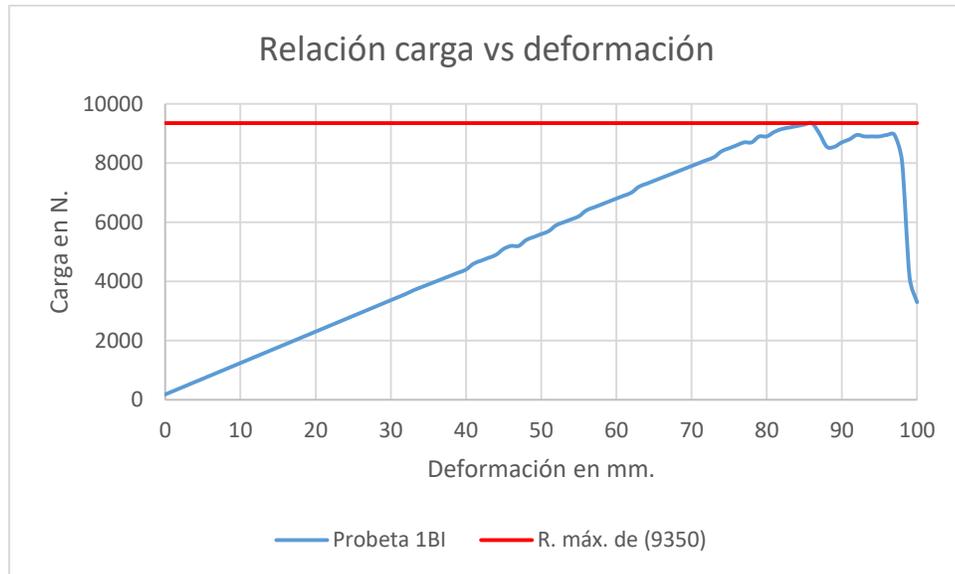


Figura 49. Probeta 1BI.

La probeta uno, sección base c/acero interior, resistió una carga máxima de 9,350 N y generó una deformación de 87.0 mm como se muestra en la figura 3.



Figura 50. Probeta 2BI.



La probeta dos, sección base c/acero interior, resistió una carga máxima de 7,400 N y generó una deformación de 66.0 mm como se muestra en la figura 4.

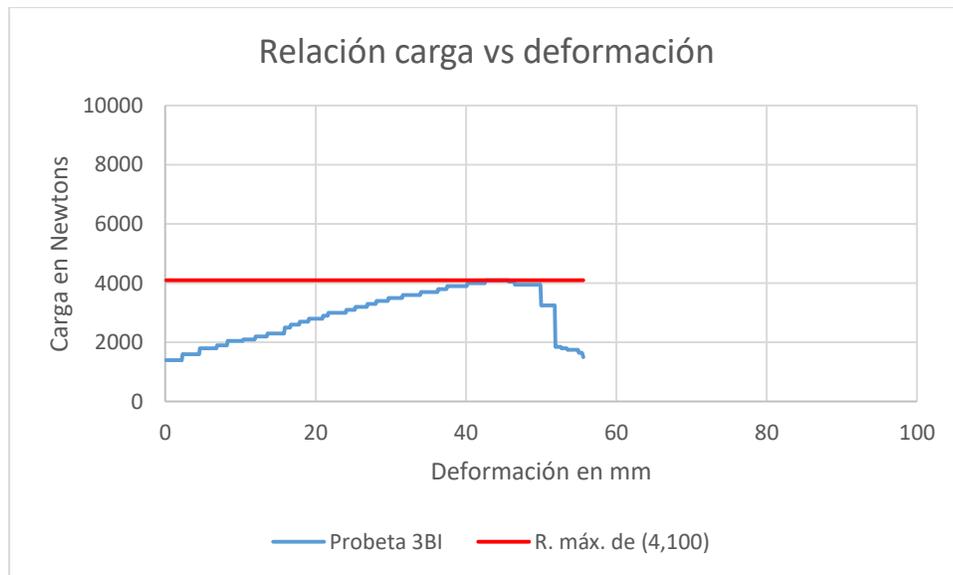


Figura 51. Probeta 3BI.

La probeta tres, sección base c/acero interior, resistió una carga máxima de 4,100 N y generó una deformación de 45.6 mm como se muestra en la figura 5.

Sección media

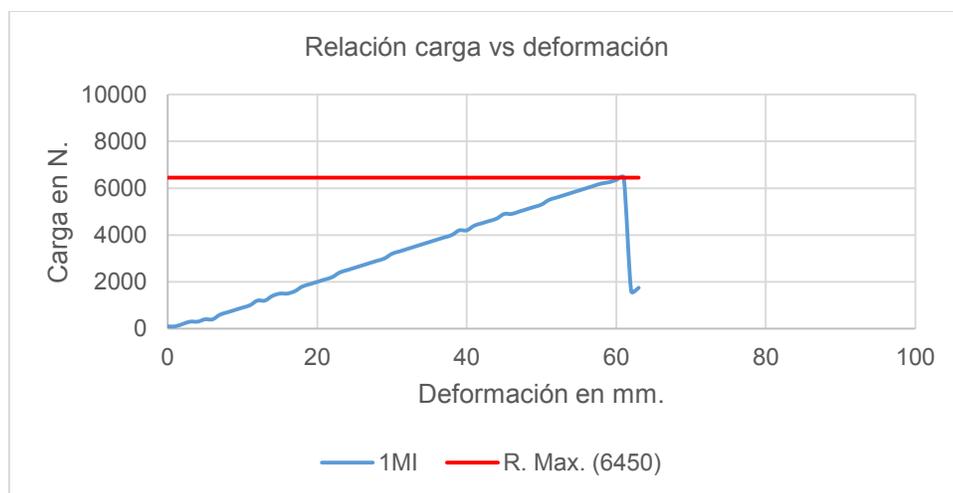


Figura 52. Probeta 1MI.

La probeta uno, sección media c/acero interior, resistió una carga máxima de 6,450 N y generó una deformación de 61.0 mm como se muestra en la figura 6.



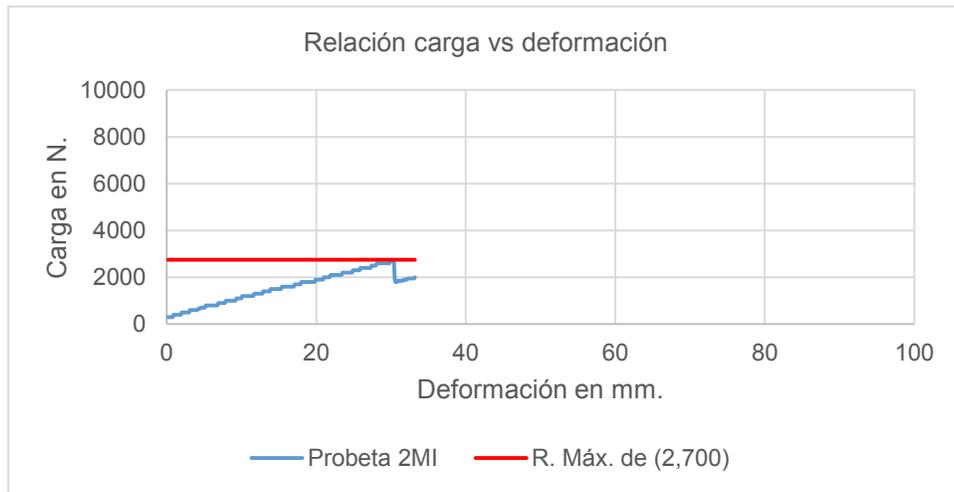


Figura 53. Probeta 2MI.

La probeta dos, sección media c/acero interior, resistió una carga máxima de 6,450 N y generó una deformación de 61.0 mm como se muestra en la figura 7.

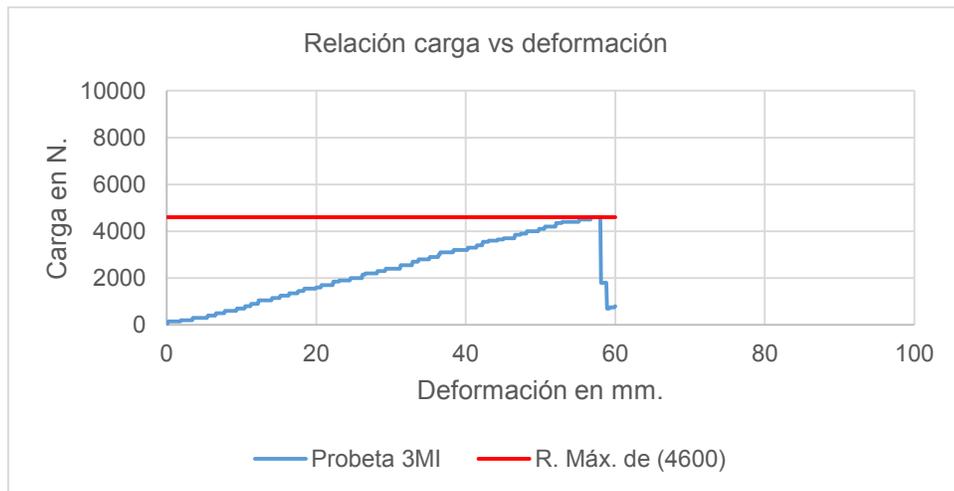


Figura 54. Probeta 3MI.

La probeta tres, sección media c/acero interior, resistió una carga máxima de 4,600 N y generó una deformación de 58.0 mm como se muestra en la figura 8.



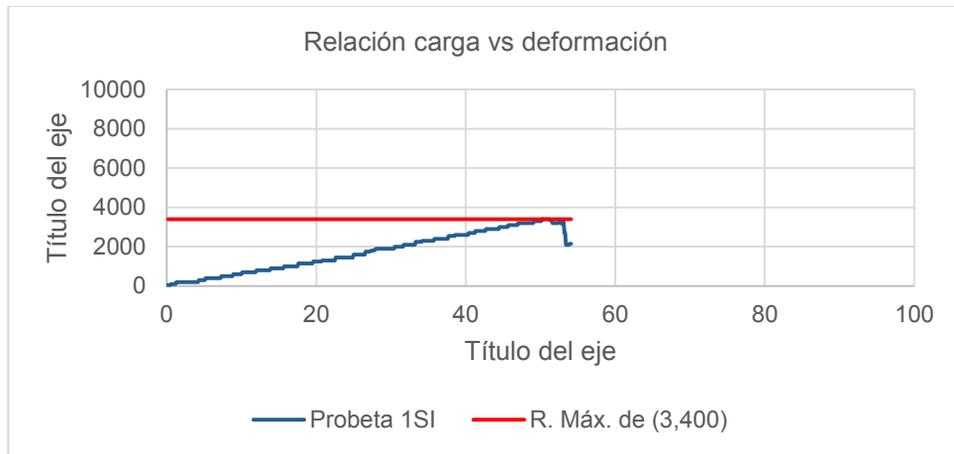


Figura 55. 1SI

La probeta uno, sección superior c/acero interior, resistió una carga máxima de 3,400 N y generó una deformación de 51.2 mm como se muestra en la figura 9.

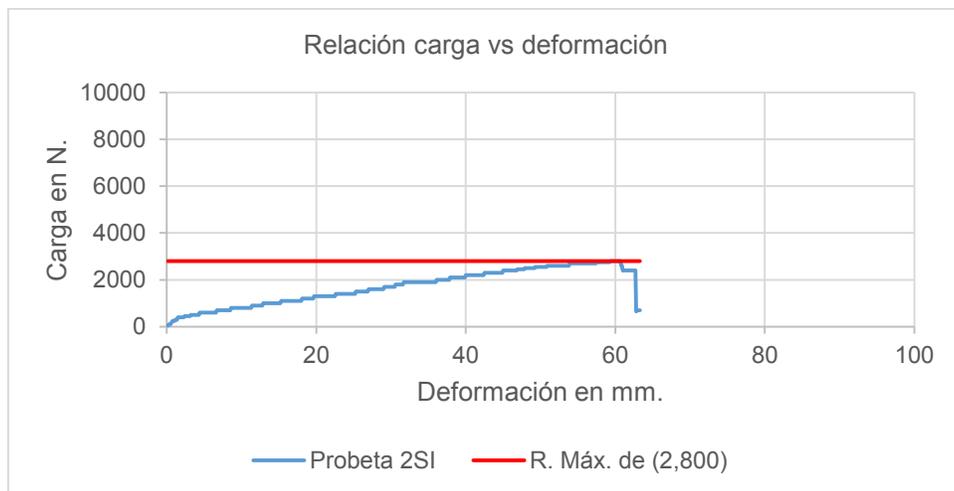


Figura 56. Probeta 2SI.

La probeta dos, sección superior c/acero interior, resistió una carga máxima de 2,800 N y generó una deformación de 59.3 mm como se muestra en la figura 10.



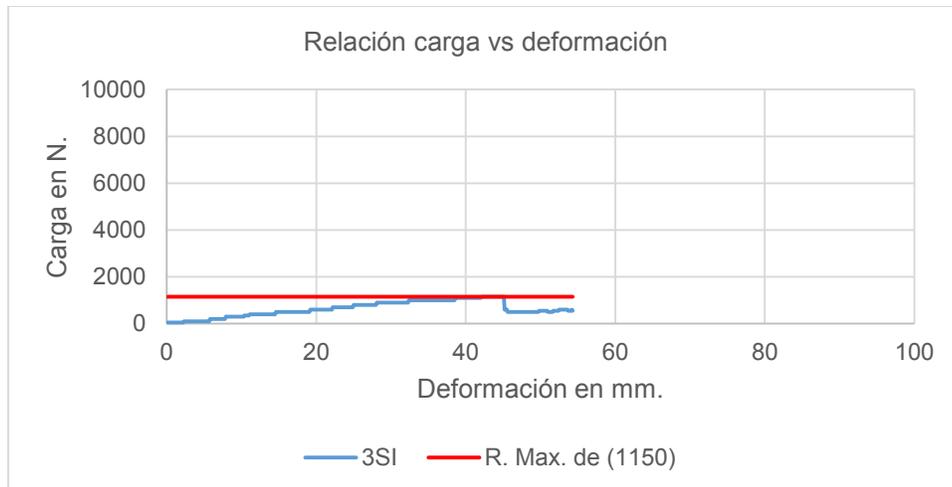


Figura 57. Probeta 3SI.

La probeta tres, sección superior c/acero interior, resistió una carga máxima de 1,150 N y generó una deformación de 45.1 mm como se muestra en la figura 11.

Tratamiento acero exterior.

Sección base

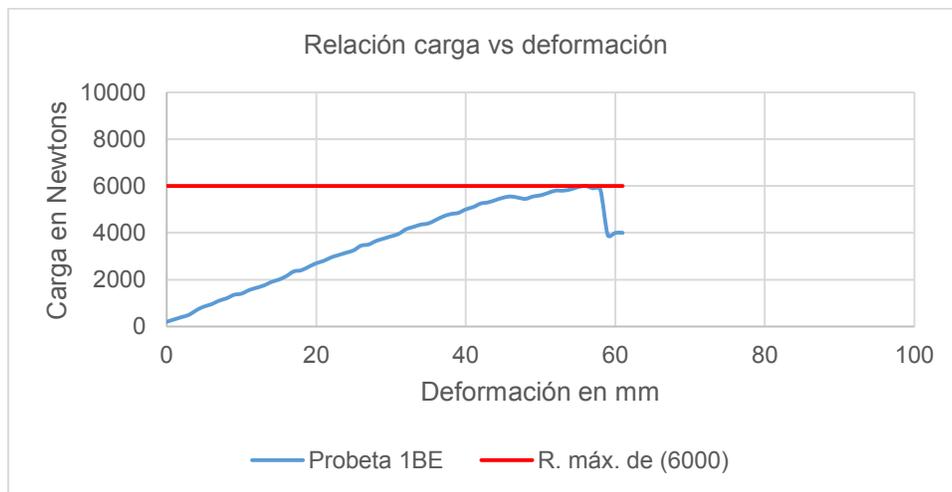


Figura 58. Probeta 1BE.

La probeta uno, sección base c/acero interior, resistió una carga máxima de 6,000 N y generó una deformación de 56.0 mm como se muestra en la figura 12.



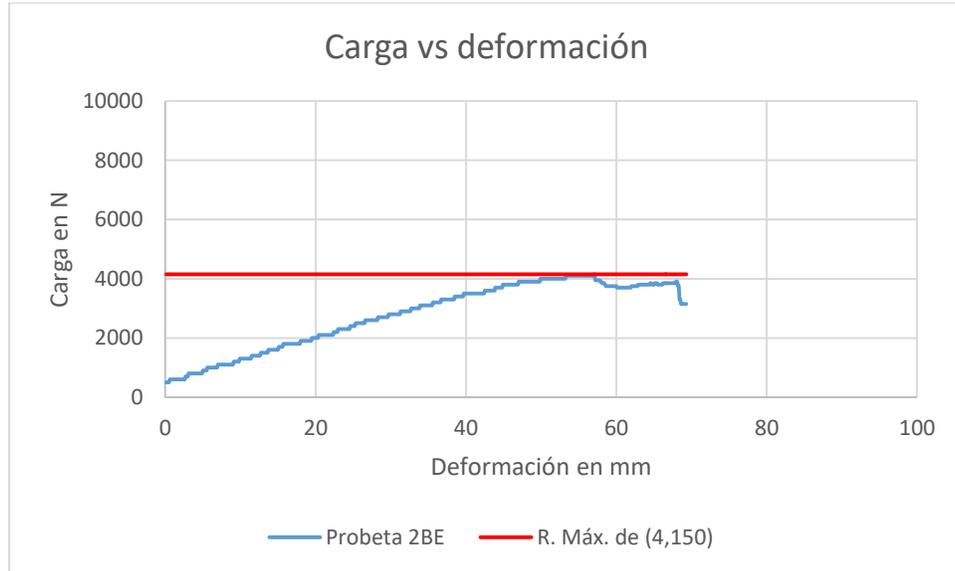


Figura 59. Probeta 2BE.

La probeta dos, sección base c/acero exterior, resistió una carga máxima de 4,150 N y generó una deformación de 57.1 mm como se muestra en la figura 13.

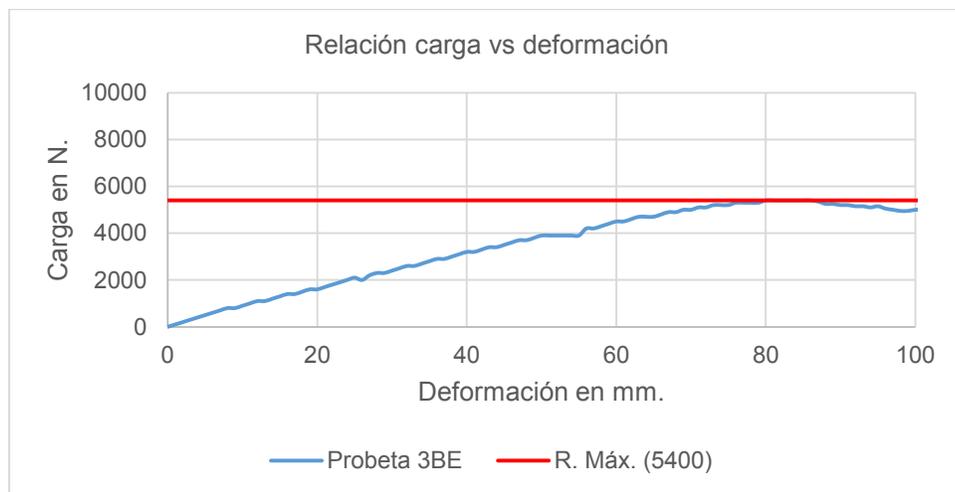


Figura 60. Probeta 3BE

La probeta tres, sección base c/acero exterior, resistió una carga máxima de 5,400 N y generó una deformación de 86.0 mm como se muestra en la figura 14.



Sección media

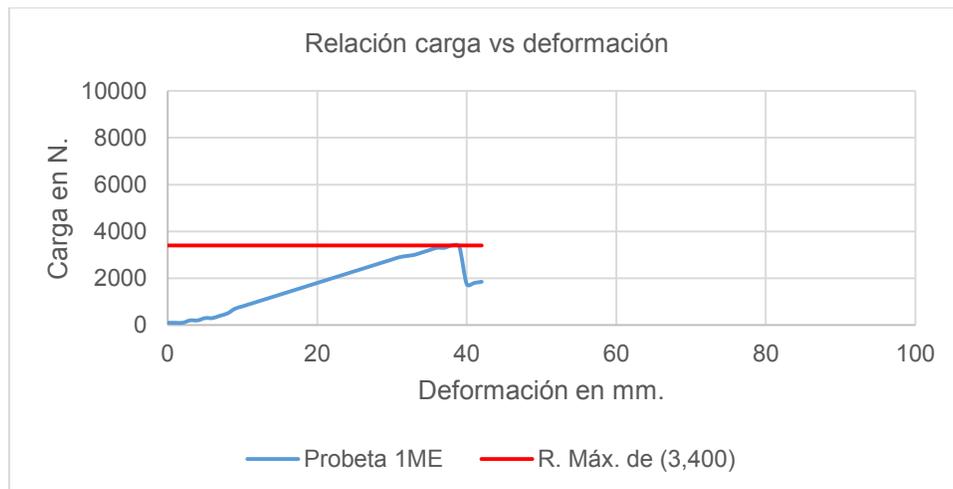


Figura 61. Probeta 1ME.

La probeta uno, sección media c/acero exterior, resistió una carga máxima de 3,400 N y generó una deformación de 38.0 mm como se muestra en la figura 15.

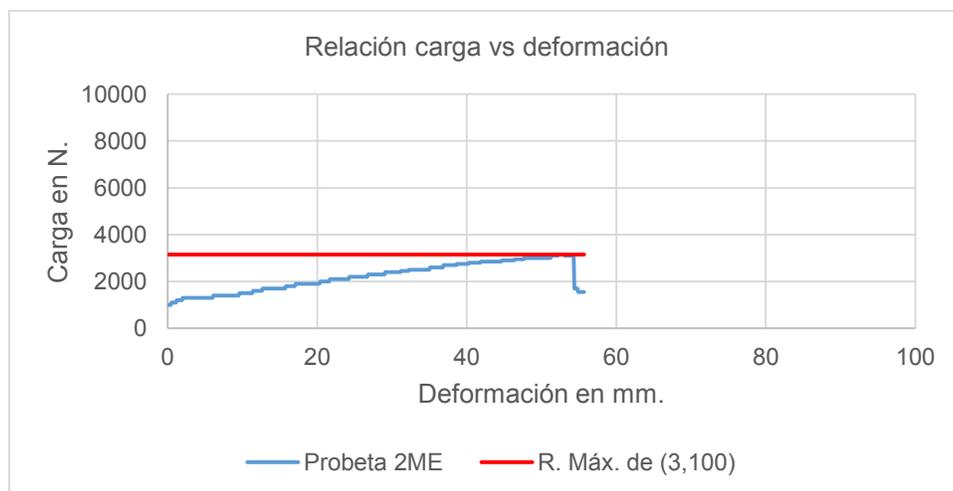


Figura 62. Probeta 2ME.

La probeta dos, sección media c/acero exterior, resistió una carga máxima de 3,150 N y generó una deformación de 53.0 mm como se muestra en la figura 16.



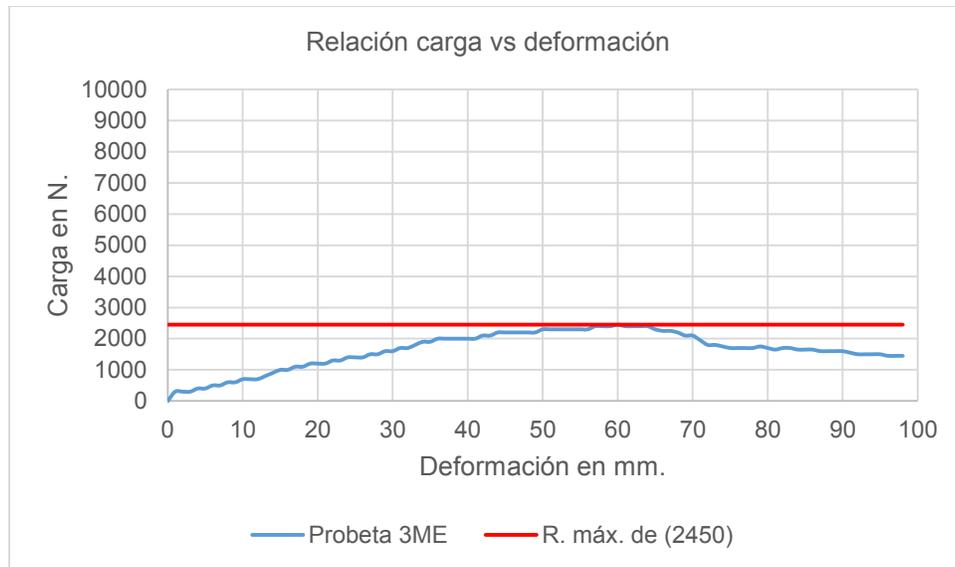


Figura 63. Probeta 3ME.

La probeta tres, sección media c/acero exterior, resistió una carga máxima de 2,450 N y generó una deformación de 60.0 mm como se muestra en la figura 17.

Sección superior

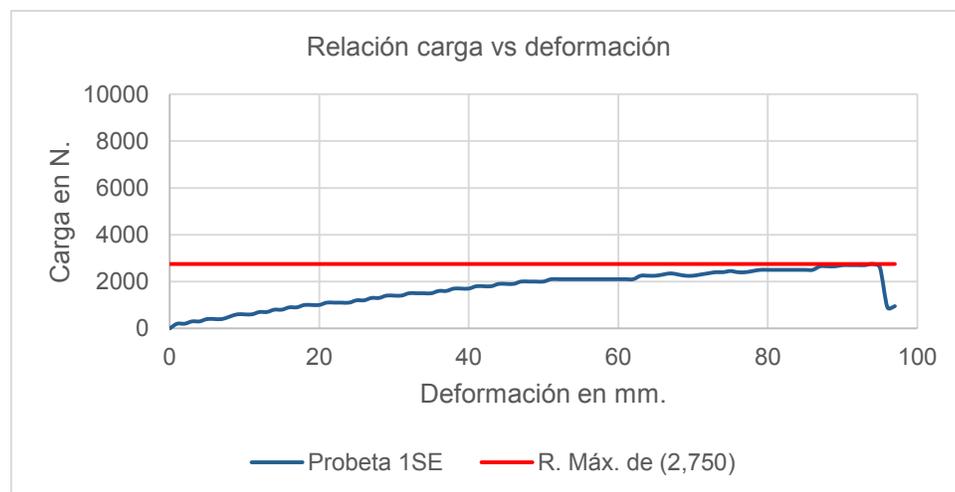


Figura 64. Probeta 1SE.

La probeta uno, sección superior c/acero exterior, resistió una carga máxima de 2,750 N y generó una deformación de 94.0 mm como se muestra en la figura 18.



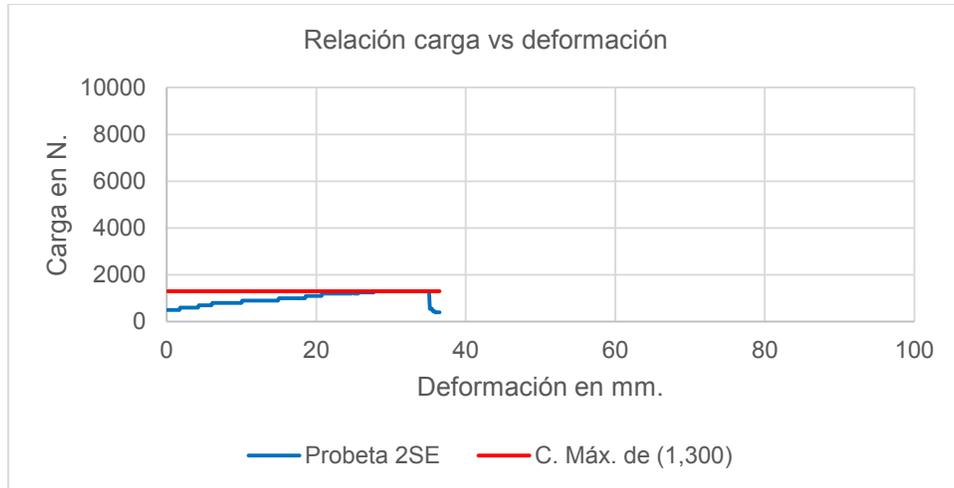


Figura 65. Probeta 2SE.

La probeta dos, sección superior c/acero exterior, resistió una carga máxima de 1,300 N y generó una deformación de 35.0 mm como se muestra en la figura 19.

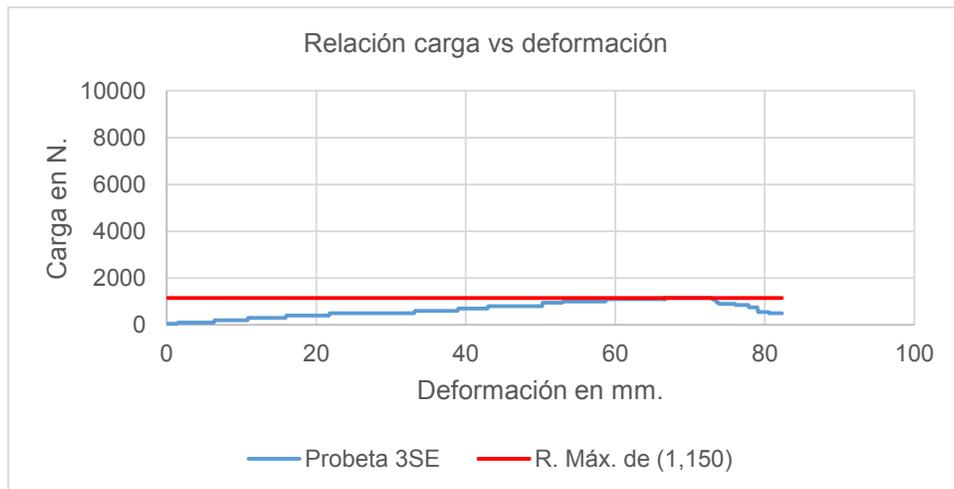


Figura 66. Probeta 3SE.

La probeta tres, sección superior c/acero exterior, resistió una carga máxima de 1,150 N y generó una deformación de 72.9 mm como se muestra en la figura 20.



Anexo 4. Prototipo: diseño y fabricación de adaptador metálico para la cama de pruebas de flexo-compresión en vigas.



Figura 67. Adaptador metálico.

En la figura 21, se observa de izquierda a derecha, al doctor Azael García Rebolledo encargado del laboratorio de mecatrónica y al Dr. José Ricardo Moreno Peña. El Dr. Azael está operando la prensa para realizar las pruebas de flexo-compresión.



Figura 68. Fabricación de dos postes de apoyos para la viga.

Primero se fabricaron dos postes de apoyos metálicos de 1 metro de altura con tubo de 4" de diámetro, la pared del tubo es cedula 40 \approx 5.71 mm de espesor, se realizaron 2 perforaciones en cada soporte como se puede ver en la figura 22.





Figura 69. Detalle de conexión entre marcos y postes de apoyo.

Los dos marcos se conectaron a los dos postes de apoyo con varillas corrugadas, tuercas y rondanas. En la figura se puede observar el detalle para ajustar el claro del marco de acuerdo a las necesidades de la ensaye.



Figura 70. Detalle de ángulos y soleras de los dos marcos.

Para la construcción de cada marco se utilizaron cuatro ángulos (horizontales), de 1" x 1" y cuatro soleras (verticales) de 1" para reforzarlos.





Figura 71. Claro del adaptador.

El claro del adaptador metálico es aprox. 300 cm. Gracias a esta innovación, se realizaron las pruebas a flexo-compresión. Como se observa en la figura 25, el marco se apoya en la base móvil de la prensa hidráulica, mientras la parte de arriba se mantiene.



Figura 72. Falla de una probeta durante el ensaye.

Se aplicaron incrementos de carga en la mitad del claro de la viga hasta alcanzar la fatiga, el último esfuerzo antes de que ocurra la falla del elemento estructural.

