

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS  
SUPERIORES DE MONTERREY  
CAMPUS MONTERREY  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA**



**TECNOLÓGICO  
DE MONTERREY®**

**ESTUDIO ANALÍTICO Y EXPERIMENTAL DE LOSAS  
PREFABRICADAS ALVEOLARES REFORZADAS CON BAMBÚ  
SUJETAS A FLEXIÓN.**

**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO  
PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO  
ACADÉMICO DE MAESTRO EN CIENCIAS CON  
ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA Y  
ADMINISTRACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN.**

**POR:**

**MILAGROS DEL CARMEN PINTO NÚÑEZ**

**DICIEMBRE, 2008  
MONTERREY, N. L., MEXICO**

## **Dedicatoria**

Ha sido el omnipotente, quien ha permitido que la sabiduría dirija y guíe mis pasos. Ha sido el todopoderoso, quien ha iluminado mi sendero cuando más oscuro ha estado, ha sido el Creador de todas las cosas, el que me ha dado fortaleza para continuar cuando a punto de caer he estado; por ello, con toda la humildad que de mi corazón puede emanar, dedico primeramente mi trabajo a **Dios**.

De igual forma a mi hija **Nayheli Arlenys** que con sus ojitos y cariño me dan la fuerza necesaria para estar de pie y con la cabeza en alto para enfrentar cualquier situación por difícil que sea.

A mis padres, **Lidia y Mariano** por su dedicación, paciencia y temple de soportar y apoyar sin condición a su primogénita.

A mis hermanas, **Audrey y Mariana**, quienes contribuyen día a día a esforzarme por ser mejor persona y ser un ejemplo para ellas.

## **Agradecimientos**

**A Dios**, por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud, fuerza y valor para lograr mis objetivos y terminar con éxito mis estudios de maestría.

**A mi hija Nayheli**, como un testimonio de gratitud ilimitada, porque su presencia ha sido y será siempre el motivo más grande que me ha impulsado para lograr esta meta.

**A mi madre Lidia y mi padre Mariano**, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por los ejemplos de perseverancia y constancia que los caracterizan y que me han infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante, por su amor y sobretodo por haber cuidado de Nayheli en mi ausencia.

He sido afortunada al tener la asesoría de personas como la **Maestra Delma Almada**, a quien le agradezco el tiempo que me dedicó, al Dr. **Francisco Yeomans Reyna** quien hizo que este trabajo tuviera más calidad y al Maestro **Carlos Nungaray**, sin su ayuda, paciencia y asesoría no hubiera podido realizar esta tesis. Agradezco de sobremanera su apoyo, aliento y estímulos que posibilitaron la conquista de esta meta. Sus consejos, paciencia y opiniones y conocimientos sirvieron para que me sienta satisfecha de mi participación dentro del proyecto de investigación.

A todos los maestros de la MAC que me asesoraron, porque cada uno, con sus valiosas aportaciones, me ayudaron a crecer como persona y como profesionalista.

A mis compañeros del **Centro de Diseño y Construcción**, y el personal del **Laboratorio de estructuras**, por su apoyo en la realización de este trabajo y por la gran calidad humana que me han demostrado con una actitud de respeto.

A los alumnos de la carrera de Ingeniería Civil que me apoyaron en el Proyecto de Cátedra, ya que realizaron un gran trabajo en el laboratorio, y que sin su ayuda este trabajo no hubiera sido posible.

A mis amigas **Mariela, María Antonieta y Vicky** porque la constante comunicación con ustedes ha contribuido en gran medida a transformarme y mejorarme como persona, agradezco todos los momentos en que me brindaron su cariño, comprensión y apoyo, dándome con ello, momentos muy gratos. Las llevaré siempre conmigo.

Agradecimiento especial a la **Lic. Jenny Medina Izaguirre** por su invaluable apoyo, mi respeto y admiración por la excelente calidad de persona y brillante profesional que eres. Al Ingeniero **Javier Arquieta** y su esposa **Ibis de Arquieta**, quienes desde el primer día me hicieron sentir como en casa y me apoyaron enormemente en la realización exitosa de mi investigación.

A la comunidad Panameña, cuyas personas especiales a las que me gustaría agradecer su amistad, apoyo, ánimo y compañía en las diferentes etapas de mi vida. Algunas están conmigo y otras en mis recuerdos y en el corazón. Sin importar en donde estén o si alguna vez llegan a leer estas dedicatorias quiero darles las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado y por todas sus bendiciones. Pido disculpas a aquellos cuya inestimable ayuda he podido omitir inconscientemente.

¡Gracias!

## **Lista de Figuras**

Figura 1.1. Losas prefabricadas tipo alveolar reforzadas con acero de refuerzo convencional. ....	17
Figura 2.1. Distribución Natural del bambú (www.inbar.cn).....	22
Figura 2.2. Distribución del bambú en su especie Guadua Angustifolia en México.....	28
Figura 2.3. Taxonomía de la Guadua. ....	31
Figura 2.4. Método de "Boucherie"(a) simple, (b) con bomba de aire (Stultz 1981) .....	37
Figura 2.5. Sistema de Entrepiso de Madera.....	44
Figura 2.6. Sistema de entrepiso de esterilla con guadua .....	44
Figura 2.7. Entrepiso de guadua cubierta por ambos lados.....	45
Figura 2.8. Entrepiso de guadua con tablilla para acabado de piso y de cielo raso .....	45
Figura 2.9. Losa de concreto reforzado con guadua. ....	45
Figura 2.10. Sistema de Entrepiso de guadua con concreto simple. ....	46
Figura 3.1. Arreglo típico para el ensayo de losas en una sola dirección.....	61
Figura 3.2. Relaciones de falla de adherencia por corte para anchos de refuerzo constantes .....	62
Figura 4.1. Portada de la Norma ISO 22157-1.....	70
Figura 4.2. Portada de la Norma ISO 22157-2.....	71
Figura 4.3. Esquema para ensayo a compresión.....	76
Figura 4.4. Esquema de la prueba a Flexión .....	85
Figura 4.5. Dispositivo de apoyo para ensayo a flexión del bambú. ....	86
Figura 4.6. Prueba a Corte.....	89
Figura 4.7. Espécimen de prueba a tensión propuesto por Zhou Fangchun (1981). ....	92
Figura 4.8. Espécimen de prueba a tensión propuesta por Arce (1993). ....	93
Figura 4.9. Espécimen de prueba a tensión utilizada en Japón. Cortesía del Prof. Inoue. ....	93
Figura 4.10. Contenido de humedad (%) versus Resistencia a la compresión paralela (MPa), de acuerdo con resultados promedios obtenidos experimentalmente, para la Guadua angustifolia, 1950 - 2005.....	101
Figura 4.11. Resistencia a la compresión perpendicular (MPa) versus Resistencia a la compresión paralela (MPa), de acuerdo con resultados promedios obtenidos experimentalmente, para la Guadua angustifolia, 1950 - 2005.....	101
Figura 4.12. Resistencia a la compresión paralela (MPa) versus Resistencia a la tensión paralela (MPa), de acuerdo con resultados promedios obtenidos experimentalmente, para la Guadua angustifolia, 1950 - 2005.....	101
Figura 4.13. Resistencia a la tensión paralela (MPa) versus Módulo de elasticidad a la tensión (MPa), de acuerdo con resultados promedios obtenidos experimentalmente, para la Guadua angustifolia, 1950 - 2005.....	102
Figura 4.14. Resistencia a la cortante paralela (MPa) versus Resistencia a la flexión (MPa), de acuerdo con resultados promedios obtenidos experimentalmente, para la Guadua angustifolia, 1950 - 2005.....	102
Figura 5.1. Sección Transversal de los prototipos LATS1 y LAUS1 .....	109
Figura 5.2. Sección Transversal de los prototipos LATS2 y LAUS2 .....	110
Figura 5.3. Sección Transversal de las secciones LATS3 y LAUS3 .....	111
Figura 5.4. Sección transversal de los prototipos LBTS1 y LBUS1.....	112
Figura 5.5. Sección Transversal de los prototipos LBTS2 y LBUS2 .....	113
Figura 5.6. Sección transversal de los prototipos LBTS3 y LBUS3.....	114

## **Lista de Fotos**

Foto 2.1. A la izquierda apreciamos la especie Guadua Velutina en Huamanguillo, Tabasco, México, y a la derecha la especie Guadua Aculeata, Mizantla, Veracruz, México. ....	26
Foto 2.2. Viviendas Construidas con bambú (Guadua Velutina) en Huamanguillo, Tabasco, México .....	27
Foto 2.3. Preservación de Guadua angustifolia mediante el método de Boucheri modificado. Estación Experimental Los Diamantes, Guápiles, Costa Rica .....	38
Foto 4.1. Pesaje de las muestras, una vez realizado el ensayo a compresión. (Peso Húmedo) .....	73
Foto 4.2. Colocación de las muestras en el horno durante 24 horas, a 103 °C.....	73
Foto 4.3. Ensayo a Compresión, en la máquina universal.....	77
Foto 4.4. Muestras de bambú después del ensayo a compresión .....	77
Foto 4.5. Ensayo a Flexión.....	86
Foto 4.6. Dispositivos utilizados en el ensayo a Corte. ....	90
Foto 4.7. Colocación de la muestra para el ensayo a Corte. Prueba realizada en la máquina Universal Laboratorio de Estructuras ITESM. ....	90
Foto 4.8. Muestra de probetas de sección reducida.....	94
Foto 4.9. Dispositivos de amarre para realizar el ensayo a tensión.....	94
Foto 4.10. Vista Lateral de la sujeción de las probetas en la maquina universal para el ensayo a tensión.....	95
Foto 4.11. Falla a Tensión del bambú.....	97
Foto 6.1. Corte de las piezas de Bambú para ser colocadas como refuerzo a flexión en las losas .....	118
Foto 6.2. Colocación y nivelación de la cimbra. ....	118
Foto 6.3. Colocación del bambú dentro de las cimbras, manteniendo el recubrimiento propuesto. ....	119
Foto 6.4. Colocación de las mangueras de bombeo para el colado del concreto.....	119
Foto 6.5. Colado de las losas. ....	120
Foto 6.6. Configuración de prueba para la realización del ensayo a flexión de las losas. ....	121
Foto 6.7. Muestra del bambú después de haber realizado el ensayo a flexión.. ....	137
Foto 6.8. Sección incompleta de losa de 10 cm de espesor, ensayada a flexión.....	138
Foto 6.9. Falla por corte en losas de 1.5 metros. ....	138
Foto 6.10. Falla por flexión presentada en losas de 3 metros de Longitud. ....	139
Foto 6.11. Grietas longitudinales presentes en las losas de 10 cm de espesor, debido al poco recubrimiento provisto para el bambú.....	139
Foto 6.12. Falla por adherencia del bambú dentro del concreto. ....	140
Foto 6.13. Grieta transversal en losa de 15 cm de espesor y reforzada con 5 bambúes. Vista Inferior de la misma.....	140

## **Lista de Gráficas**

Gráfica 1.1. Crecimiento Poblacional en México.....	11
Gráfica 4.1. Curva Esfuerzo a compresión – Deformación Unitaria de la probeta 6.....	80
Gráfica 4.2. Procedimiento para el cálculo del módulo de elasticidad a compresión del bambú según ISO 22157-1:2004 (E).....	80
Gráfica 4.3. Gráfico Normalizado Esfuerzo – Deformación unitaria del Bambú y Gráfico de ajuste.....	83
Gráfica 4.4. Curva Esfuerzo a Corte - Deformación Unitaria del Bambú de algunas probetas ensayadas. ....	91
Gráfica 4.5. Gráfica Normalizada del esfuerzo a tensión – deformación unitaria a tensión .....	97
Gráfica 6.1. Gráfica Carga Desplazamiento modelo LATS1.....	123
Gráfica 6.2. Gráfica Carga Desplazamiento modelo LATS2.....	124
Gráfica 6.3. Gráfica Carga Desplazamiento modelo LATS3.....	125
Gráfica 6.4. Gráfica Carga Desplazamiento modelo LAUS1 .....	126
Gráfica 6.5. Gráfica Carga Desplazamiento modelo LAUS2 .....	127
Gráfica 6.6. Gráfica Carga Desplazamiento modelo LAUS3 .....	128
Gráfica 6.7. Gráfica Carga Desplazamiento modelo LBTS1.....	129
Gráfica 6.8. Gráfica Carga Desplazamiento modelo LBTS2.....	130
Gráfica 6.9. Gráfica Carga Desplazamiento modelo LBTS3.....	131
Gráfica 6.10. Gráfica Carga Desplazamiento modelo LBUS1 .....	132
Gráfica 6.11. Gráfica Carga Desplazamiento modelo LBUS2 .....	133
Gráfica 6.12. Gráfica Carga Desplazamiento modelo LBUS3 .....	134
Gráfica 6.13. Resumen gráfico de Resultados obtenidos del ensayo a flexión .....	135
Gráfica 6.14. Gráfica Esfuerzo – Deformación Unitaria del concreto.....	142
Gráfica 6.15. Gráficos comparativos del modelo teórico vs valores experimentales. ....	143

## **Lista de Tablas**

Tabla 2.1. Resumen de Factores Climáticos que afectan las propiedades físico-mecánicas de la Guadua.....	32
Tabla 4.1. Resultados del Contenido de Humedad (%).....	74
Tabla 4.2. Resultados de la prueba a Compresión paralela a la fibra.....	78
Tabla 4.3. Módulo de Elasticidad a compresión.....	81
Tabla 4.4. Relación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión del bambú. ....	81
Tabla 4.5. Resultados de la prueba a flexión. ....	87
Tabla 4.6. Tabla de Resultados Pruebas a Corte.....	91
Tabla 4.7. Tabla de resultados de pruebas a tensión paralela a la fibra .....	95
Tabla 4.8. Relación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión del bambú. ....	98
Tabla 4.9. Resumen de resultados de las pruebas de la caracterización .....	98
Tabla 5.1. Distribución del bambú dentro de la sección transversal para los prototipos LATS1 y LAUS1 .....	109
Tabla 5.2. Distribución del bambú dentro de la sección transversal para los prototipos LATS2 y LAUS2.....	110
Tabla 5.3. Distribución del bambú dentro de la sección transversal para los prototipos LATS3 y LAUS3.....	111
Tabla 5.4. Distribución del bambú dentro de la sección transversal para los prototipos LBTS1 y LBUS1 .....	112
Tabla 5.5. Distribución del bambú dentro de la sección transversal para los prototipos LBTS2 y LBUS2.....	113
Tabla 5.6. Distribución del bambú dentro de la sección transversal para los prototipos LBTS3 y LBUS3.....	114
Tabla 6.1. Resultados de la Falla por Adherencia en las losas.....	141
Tabla 7.1. Integración de costos directos para losas con espesor de 10 cm. ....	150
Tabla 7.2. Integración de costos directos para losas con espesor de 15 cm. ....	153
Tabla 7.3. Resumen del análisis de costos.....	156
Tabla 7.4. Comparativa De Costos.....	157
Tabla 8.1. Resultados de la Comparación de las Pruebas de Compresión.....	161



## CONTENIDO

Lista de Figuras	i
Lista de Fotos	ii
Lista de Gráficos	iii
Lista de Tablas	iv
<b>Capítulo I. Introducción</b>	<b>7</b>
1.1 Antecedentes	7
1.1.1 Dinámica Habitacional y conceptos de Sostenibilidad:	7
1.1.2. Uso de Materiales Alternativos en la Construcción	12
1.2 Propuesta de Investigación	14
1.3 Línea de Investigación	17
1.4 Objetivos de Trabajo	18
1.4.1. Objetivo General	18
1.4.2. Objetivos Específicos	18
<b>Capítulo II. Uso del Bambú en la Construcción</b>	<b>20</b>
2.1 Introducción	20
2.2 Características de los materiales de construcción	20
2.3. EL BAMBÚ: Propiedades y Características	22
2.3.1 Guadua Angustifolia	29
2.3.2. Comparativa de propiedades físicas del Bambú con otros estudios realizados	39
2.3.4. Ventajas y desventajas del uso de la Guadua Angustifolia en la construcción (Hidalgo 1974)	40
2.4 Bambú como refuerzo en elementos estructurales	42
<b>Capítulo III. Sistema Estructural: Losas Alveolares</b>	<b>49</b>
3.1 Sistema Estructural:	49
3.1.1 Cargas de diseño de losas	53
3.2 Cálculo de las deformaciones	55
3.3 Deformación Instantánea	56
3.4 Deformación Diferida	58
3.5 Límites De Flecha. Criterio Del ACI-318-05	59
3.6 Diseño de Losas Compuestas	59
3.7 Esfuerzos de Adherencia	64
3.7.1 Limitaciones en el uso del bambú como refuerzo del concreto	65
<b>Capítulo IV. Caracterización Mecánica de la Guadua Angustifolia</b>	<b>68</b>
4.1 Introducción	68
4.2 Normativas para la Caracterización Mecánica del Bambú	68
4.2.1 Bamboo – Determination of physical and mechanical properties. ISO 22157-1:2004. Part I. Requeriments	69
4.2.2 Bamboo – Determination of physical and mechanical properties. ISO/TR 22157-2:2004. Part II. Laboratory Manual	70

4.3 Estándares para la Determinación de las Propiedades Mecánicas de la Guadua Angustifolia, Pruebas y Resultados.....	71
4.3.1 Determinación del Contenido de Humedad.....	71
4.3.2 Determinación de la Compresión Paralela a la Fibra .....	75
4.3.3 Pruebas a Flexión .....	84
4.3.4 Determinación de la Resistencia a Corte Paralelo a la Fibra .....	88
4.4 Resumen de los resultados obtenidos.....	98
4.5 Comparativa de los resultados .....	99
<b>Capítulo V. Diseño del Prototipo Experimental .....</b>	<b>103</b>
5.1 Introducción.....	103
5.2 Materiales de Construcción .....	103
5.2.1. El bambú .....	103
5.2.2 Concreto.....	105
5.3. Descripción de los modelos de prueba.....	107
<b>Capítulo VI. Construcción de Prototipos y Resultados de las pruebas experimentales. ....</b>	<b>116</b>
6.1 Introducción .....	116
6.2 Construcción de prototipos .....	116
6.3 Registro Fotográfico de la construcción de los prototipos.....	118
6.4 Realización del ensayo a Flexión de los prototipos .....	121
6.5 Resultados obtenidos de las pruebas experimentales para cada uno de los prototipos.....	122
6.5.1 Curvas carga - desplazamiento de los prototipos.....	122
6.5.2 Resumen de resultados .....	135
6.6 Reporte Fotográfico de las pruebas realizadas.....	138
6.7 Resultados de la Falla por adherencia.....	141
6.8 Predicción Teórica de los prototipos.....	141
6.9 Modelo de Corte en Losas compuestas.....	147
<b>Capítulo VII. Análisis de Costos.....</b>	<b>149</b>
7.1 Introducción .....	149
7.2 Integración de costos directos .....	149
7.3 Comparativa de costos .....	156
<b>Capítulo VIII. Conclusiones y Recomendaciones.....</b>	<b>158</b>
<b>Referencias Bibliográficas .....</b>	<b>165</b>
<b>Anexos</b>	

# INTRODUCCIÓN

## **1.1 Antecedentes**

### **1.1.1 Dinámica Habitacional y conceptos de Sostenibilidad:**

La principal tendencia demográfica a principios del Siglo XXI es y seguirá siendo el abandono del campo y la migración a las ciudades. Las Naciones Unidas mencionan que “prácticamente todo el crecimiento demográfico mundial previsto para el periodo 2000-2030 se concentrará en las ciudades”.

México manifiesta la misma tendencia demográfica de crecimiento de las ciudades en todo el territorio. En este entorno hacia una mayor urbanización, la sostenibilidad y la sustentabilidad desempeñan un papel fundamental para el desarrollo integral.

La definición más compartida de "desarrollo sostenible" es la del Informe Brundtland de 1987, según la cual el desarrollo es sostenible satisface las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer la posibilidad de que las generaciones futuras puedan satisfacer las propias. Esta se retomó y amplió de la Declaración de Río (Naciones Unidas, 1992). A partir de los años noventa se propusieron numerosas interpretaciones del desarrollo sostenible; la mayor parte de ellas se funda en algunas consideraciones del Informe Brundtland y del Programa 21 de Naciones Unidas, a saber:

- Es necesario promover estrategias hacia el desarrollo que preserven, y si es posible mejoren, la calidad del ambiente para las generaciones y futuras;
- Las condiciones de vida deben ser mejoradas exclusivamente dentro de los límites de las capacidades de los diversos ecosistemas;

- Debe evitarse o reducirse al mínimo cualquier transferencia del tipo social, espacial o temporal de las consecuencias y de los costos sobre el medio ambiente.

El consenso difundido en torno a estos objetivos denota que en el concepto de “desarrollo sostenible” han entrado a formar parte fundamental las tres dimensiones principales: ambiental, social y económica, y espacial, desde la escala local a la mundial.

Por otra parte, las Ciudades sustentables son aquellas que cuenten y ofrezcan servicios de calidad para toda su población, un medio ambiente sano, viviendas dignas y suficientes, seguridad, parques, espacios deportivos y de recreación, convivencia social intensa y fructífera, empleo digno y bien remunerado, atención sanitaria completa y eficiente, educación de calidad y acceso a la actividad cultural; y el aprovechamiento del suelo en un aspecto fundamental del planeamiento urbano, directamente vinculado al desarrollo sustentable, tanto en la adecuada distribución de viviendas, comercios e instalaciones industriales, como en el uso eficiente de las áreas verdes urbanas.

Las ciudades, en contraste a lo que debe ser una ciudad en la actualidad, son sistemas altamente ineficientes, devoradores de energía y materiales.

La búsqueda del confort humano y de la economía de energía – tanto en el plano de la generación como de utilización-, y la necesidad de industrializar la construcción, para evaluar los costos reales y minimizar riesgos, son aspectos que favorecen el desarrollo de materiales alternos en la industria de la construcción. Sin embargo, la concepción occidental sobre el desarrollo se basó originalmente en la idea de un crecimiento económico provocando el aumento de la pobreza, la agudización de las desigualdades y el continuo deterioro de los recursos naturales, así como un masivo consumo de energía y materiales lo que nos conduce a plantear nuevas estrategias de construcción, utilizando recursos localmente accesibles y de bajo impacto al medio ambiente, sin menoscabar la calidad y seguridad de las edificaciones en la ciudad y el campo.

El sector de la construcción ocupa la segunda posición en cuanto a importancia económica se refiere en México y sus perspectivas a corto y medio plazo son, según todos los datos, de fuerte crecimiento. Adicionalmente, el sector de la construcción, con todos los sub.-sectores en los que influye, es uno de los que genera mayor impacto ambiental. Existen datos que corroboran que la industria de la construcción consume entre el 20% y el 50% de los recursos naturales, contribuyen en gran manera al aumento de las emisiones y la contaminación, tanto durante el proceso constructivo como a lo largo de su vida útil una vez terminados. También resulta evidente el elevado impacto de su emplazamiento sobre el territorio, en torno al 80% de las personas reside en zonas urbanas, con influencia negativa en otros sectores como el del transporte y la energía. Otro tema fundamental es la importante generación de residuos, constructivos, de mantenimiento y de derribo de los edificios, con perspectivas de aumento y dificultades para su reutilización o reciclaje.

Es por lo anterior que el sector de la construcción es especialmente prometedor para nuevos materiales estructurales desde el punto de vista de las elevadas cantidades de materiales que utilizan y dado que los conceptos de seguridad y confiabilidad en este sector son fundamentales

En el marco del desarrollo habitacional, la construcción sostenible presenta varias etapas:

- La necesidad de satisfacer la demanda habitacional de una población creciente.
- El deterioro progresivo de los recursos naturales que constituyen el soporte físico del crecimiento urbano.
- El desarrollo y aplicación de tecnologías constructivas de bajos insumos e impacto ambiental negativo.
- El reconocimiento del valor técnico y económico de materiales locales que pueden sustituir materiales actuales en el proceso de construcción.

Se hace entonces, imprescindible adecuar los ritmos de explotación y de recuperación de los recursos actual, para evitar que se agoten. Los ritmos de recuperación son más rápidos y eficaces cuanto mejor se conserven las condiciones ecológicas que los producen.

Esto supone que el desarrollo económico capitalista tiene un límite, que es aquel que le impone la disponibilidad del factor tierra y las condiciones ecológicas que lo sustentan.

El desarrollo económico viene, pues, de la posibilidad de utilizar un recurso asegurando su regeneración, su equilibrio ecológico; creando de esta manera una tecnología que haga menos agresiva su transformación. Cuanto mayor sea la eficacia del proceso de transformación y menor el consumo de energía mayores serán los beneficios.

La solución de los problemas de desarrollo de los países del Tercer Mundo pasa por el desarrollo local, es decir, la creación de circuitos de producción y consumo en mercados de ámbito local, que permitan la creación de capitales autóctonos, bien distribuidos entre todas las clases sociales.

Es por esto que nos enfrentamos como profesionales a los retos que nos impone la problemática mundial de la necesidad de viviendas, el uso de materiales alternos y/o reciclados para la construcción buscando que consuman menos energía en su producción, así como la recuperación de los sistemas constructivos de antaño.

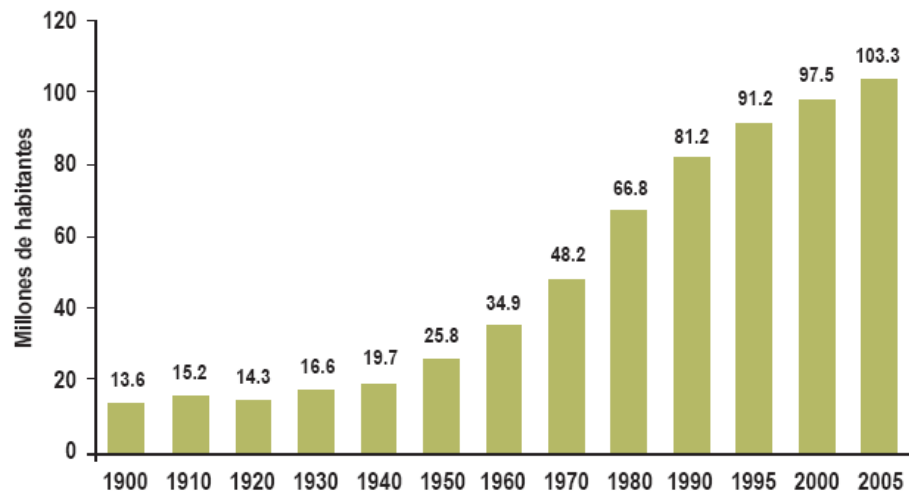
Ahora bien dentro de la problemática mundial de la necesidad de vivienda, para México existen tres factores principales que determinan en buena medida el volumen y tipo de demanda de vivienda en el país:

- i) la estructura de edades de la población,
- ii) el nivel y distribución del ingreso y
- iii) las tendencias de urbanización.

La demanda por vivienda responde a los cambios que ocurren en la estructura de la pirámide poblacional y en la distribución del ingreso. La oferta de productos financieros debe adecuarse a la demografía actual con nuevos productos como pueden ser los programas orientados a la renta de vivienda, el micro financiamiento para autoconstrucción, ampliación y remodelación y los esquemas con subsidio al frente.

La siguiente gráfica muestra el crecimiento poblacional en México, desde el año 1900 hasta el año 2005:

**Gráfica 1.1. Crecimiento Poblacional en México**



Fuente: SHF con información de INEGI.

Según el informe de la Situación Actual de la Vivienda en México 2006, la tasa de crecimiento media anual de la población fue de 1.0%, mientras que la de los hogares fue de 1.9%, lo que refleja una reducción significativa en el tamaño promedio de los hogares. De seguir con esta tendencia, el número de hogares en todo el país se duplicaría en menos de cuatro décadas (37 años) por lo que es de esperarse que la demanda por vivienda siga mostrando un crecimiento importante.

Desde una perspectiva internacional, el presente ritmo de crecimiento de la población de México del 1% es notablemente inferior al que se observa en las naciones consideradas como menos desarrolladas, que de acuerdo con las

Naciones Unidas es de 2.4% por año. Sin embargo, cuando se le compara con las regiones de mayor desarrollo cuya tasa de crecimiento es de 0.3%, se desprende que el ritmo de crecimiento de la población mexicana es tres veces superior. Esto permite apreciar el esfuerzo que debe realizarse para otorgar a los habitantes posibilidades mínimas de bienestar.

### **1.1.2. Uso de Materiales Alternativos en la Construcción**

Es por esto que muchos investigadores a nivel mundial en el marco del desarrollo de nuevas y eficientes tecnologías de vivienda, se han interesado en propuestas innovadoras como el uso del bambú, ya que es un material con notables características estructurales, estéticas y ecológicas, ya sea como elemento estructural o como refuerzos a sistemas estructurales convencionales.

El bambú tiene múltiples usos, en el medio rural el bambú puede sustituir a otros materiales más caros, como tubería para la conducción de agua, vallas para corrales, viveros, jaulas, cercos, muros de contención, pilas para almacenar agua, escaleras, etc. En el Zamorano, Colombia se ha usado en la construcción de postes sustentantes de redes protectoras para criaderos de peces, postes para alumbrado, combustible, postes para cercado fundidos con refuerzo de bambú, aros y muchos otros usos.

En la industria en otros países el bambú se ha utilizado en grandes volúmenes en infinidad de productos, como materia prima en la fabricación de papel, como alimento, en muebles, para hacer palillos, enchapes, artesanías, tallados con bambú que son verdaderas obras de arte.

En el ámbito de la construcción, pruebas experimentales realizadas en Brasil, Colombia, Costa Rica y México, demuestran el uso estructural que se le puede dar a esta especie de Bambú como casas tipo habitación, elaboradas con bambú, en perfiles y laminados, así como en superestructuras de puentes.



En México se han desarrollado prototipo de paneles elaborados con bambú, sometidos a carga lateral, para implementarse en viviendas de carácter social, lo cual nos proporciona un panorama más amplio del uso práctico que se le puede dar a este material. Básicamente el proyecto consistió en evaluar la tecnología de edificación de vivienda con paneles bambú, describiendo el proceso de construcción del panel y sometiénolos a cargas de flexión para determinar su resistencia y rigidez. De forma complementaria se realizaron pruebas básicas de caracterización mecánica del bambú *Guadua Angustifolia* (Compresión, Tensión, corte, flexión y porcentaje de humedad).

Los resultados demostraron que las uniones en este tipo de sistemas son una variable importante en el comportamiento estructural de los mismos, de la misma forma se hace necesario realizar consideraciones del tiempo de vida del material para garantizar un buen mantenimiento y reparación de la estructura de ser necesario. Sin embargo, para utilizarlo a largo plazo es necesario preservar el bambú, el mejor método es inyectándole productos químicos; dependiendo del producto se logra mayor durabilidad, estudios experimentales en Colombia y Brasil han utilizado el Bórax y ácido bórico, cuyos métodos de aplicación son los siguientes: por inyección a presión utilizando una máquina boucherie o por inmersión y embolsado, al utilizar el bambú abierto en esterillas o en reglas.

El bambú también se puede usar para aligerar losas, en la fabricación de casetones, por ejemplo en países de Suramérica es generalizado su uso, y en la parte inferior de la estructura, se repella para dar el acabado final del cielo falso.

En construcción de viviendas, el bambú se ha utilizado en varios países, en Colombia por ejemplo, se usa combinado con madera y tierra, para elaborar construcciones de bahareque o con la estructura de bambú forrado con la esterilla repellada, estos usos son frecuentes en la arquitectura espontánea de la población rural, cabe hacer mención del trabajo del Arq. Oscar Hidalgo, pionero en los estudios de esta planta en América. En Costa Rica el Proyecto Nacional de Bambú, recibió donaciones por un monto aproximado de catorce

millones de dólares, habiendo realizado un estudio científico y completo sobre las propiedades físicas y estructurales del bambú, sembró alrededor de 400 Has y ha construido varios centenares de casas sismorresistentes utilizando paneles prefabricados de madera y bambú. Y en Brasil se han elaborados pruebas experimentales utilizando secciones compuestas de concreto reforzadas con bambú y fibras vegetales.

Ahora bien, la tendencia de la investigación sobre el bambú nos indican que se trabajan en propuestas donde el bambú logre una acción conjunta con otros materiales de construcción convencionales, por el ejemplo el concreto, a fin de aprovechar las propiedades de resistencia de este material y lograr sistemas constructivos más competitivos y sostenibles.

### ***1.2 Propuesta de Investigación***

En el nuevo siglo que apenas comienza, los problemas ambientales y la calidad de vida en nuestras ciudades continúan deteriorándose severamente. En sociedades como las nuestras se debe pensar primero en resolver los urgentes y apremiantes problemas de hoy. Esa es indudablemente la prioridad pero buena parte de nuestros problemas actuales: la pobreza, el decaimiento de las ciudades, los barrios urbanos, son resultado de decisiones, acciones y, en buena medida, omisiones emprendidas generaciones atrás para resolver los problemas de aquel momento sin pensar demasiado en un mañana que ahora es nuestro.

Las modificaciones al medio ambiente natural deberían ser obligatoriamente gestionadas a partir de una estrategia de sostenibilidad, y esto significa que el desarrollo del medio ambiente construido, y sus modificaciones, deben ser planteados en términos de su pertinencia y viabilidad social, económica y ambiental con el fin de garantizar que las construcciones que se realicen hoy perduren para las generaciones futuras, de manera de compensar los daños irreversibles que puedan provocar las modificaciones al medio natural, no sólo por efecto de las nuevas construcciones, la urbanización precaria y por las

actividades extractivas y la tala, sino por la contaminación ambiental con residuos, desechos, escombros y emanaciones generados por las actividades constructivas. Innovaciones tecnológicas y sociales juegan un papel primordial en el logro de la construcción de un hábitat sostenible y en la búsqueda de respuestas a algunos de las siguientes interrogantes:

- ✓ ¿Cómo enfocar de una manera sostenible —o sustentable— nuestro desarrollo urbano? ¿Habrá que introducir cambios radicales en los enfoques de las variables del proyecto de urbanismo y de las edificaciones?
- ✓ ¿Cuáles son las bases ecológicas y éticas del diseño en la arquitectura y la ingeniería?
- ✓ ¿Cómo garantizar que las innovaciones en materiales y tecnologías tengan viabilidad social, económica, ambiental y ética?

Las respuestas varían de una región o país a otro, puesto que las diferencias en términos de desarrollo económico y calidad de vida son muy marcadas. Sin embargo, en esencia se trata de lograr que las modificaciones al medio ambiente natural se realicen dentro de un concepto amplio de optimización en el uso de los recursos y de ecoeficiencia que garantice al mismo tiempo calidad, economía y durabilidad.

Lo anterior refleja, en pocas palabras, la definición del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) de la construcción Sustentable como "una manera de la industria de la construcción de actuar hacia el logro del desarrollo Sustentable, tomando en cuenta aspectos medio ambientales, socioeconómicos y culturales. Específicamente, implica cuestiones tales como diseño y administración de edificaciones, construcción y rendimiento de materiales y uso de recursos – todas, dentro de la órbita más amplia del desarrollo y la gestión urbanos".

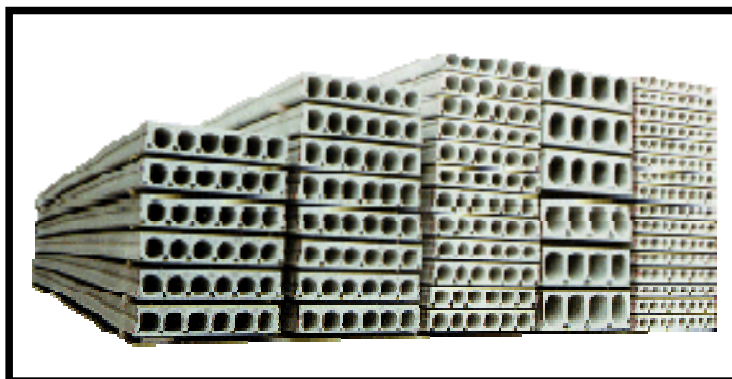
La construcción sostenible representa una manera radicalmente diferente de pensar: requiere de una forma de pensamiento que va mucho más allá de la disciplina de una ciencia exacta. Requiere de una combinación de experiencia en arquitectura, ingeniería y construcción adquirida al paso de los siglos, con la exploración innovadora de nuevos enfoques a fin de satisfacer las demandas de generaciones futuras. La construcción sostenible fusiona la experiencia con el afán de explorar nuevos horizontes. Depende de la experiencia práctica y de la investigación.

En un mundo que se hace más estandarizado y más consciente de responsabilidad que conlleva la práctica de una buena ingeniería, es cada vez más difícil introducir radicalmente nuevos materiales o reanimar los métodos tradicionales de construcción. Sin embargo, en nuestros países de tercer mundo tenemos otra cara que nos muestra como aumenta la pobreza, gastos en energía más altos y demandas por la conservación de recursos mundiales, el empleo de nuevas alternativas (por ejemplo el uso del bambú como elemento estructural) o de métodos tradicionales mejorados en la construcción para mejorar el sistema de vivienda y edificación se hace cada vez más relevante. Reglamentaciones de construcción a base de sostenibilidad tienen la facilidad para organizar la diversidad de métodos de construcción, satisfaciendo a las partes involucradas en el proceso de urbanización, de igual forma procurando edificaciones y viviendas con condiciones de seguridad para sus ocupantes.

México no puede estar ajeno a lo que otros países han obtenido con el bambú. Las diferentes experiencias plasmadas ya sea a través de escritos o bien de forma oral, y adaptadas a las condiciones naturales y sociales del país, han hecho y harán del recurso bambú, una fuente para contribuir a una sostenibilidad de la industria de la construcción, además de la seguridad de que contemos con un conocimiento más completo de los bambúes y su presencia en el ambiente.

Paralelamente al surgimiento de materiales alternativos en la construcción, el uso de sistemas prefabricados (*Ver Fig. 1*) le brinda a la ingeniería civil nuevas herramientas para la optimización de procesos y tiempos. Si aunamos ambos

criterios proporcionaremos productos que administrados eficientemente garanticen sostenibilidad y desarrollo de esta Industria, además de beneficios palpables para el cliente final.



**Figura 1.1. Losas prefabricadas tipo alveolar reforzadas con acero de refuerzo convencional.**

*Fuente: Catálogo Técnico de bpcgroup – Prestressed Hollow Core Slabs*

Finalmente esta investigación propone una nueva alternativa tecnológica para la producción de viviendas y/o edificaciones más económicas y más ecológicas que otros sistemas constructivos tradicionales. Se basa en un sistema prefabricado de losas alveolares, cuyo refuerzo interior será proporcionado por el bambú, en su especie *Guadua Angustifolia* en reemplazo del acero de refuerzo tradicional.

### **1.3 Línea de Investigación**

La importancia de esta propuesta sigue los lineamientos de la Misión 2015 del Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey que sostiene que: "La investigación que se realice debe contribuir al desarrollo sostenible de la comunidad con modelos y sistemas innovadores para mejorarla en lo educativo, social, económico y político". La investigación relacionada al área de Ingeniería Civil, se desarrolla en la División de Ingeniería y Arquitectura, en el Departamento de Ingeniería Civil a través del programa postgrado de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería con especialización en Administración de la Construcción con especialidad en Ingeniería Estructural del Instituto Tecnológico Superiores de Monterrey Campus Monterrey, en colaboración con

el Centro de Diseño y Construcción, donde existen diversos grupos de investigación, entre ellos la Cátedra de Vivienda el cual está asociado al desarrollo e innovación de programas y tecnologías de vivienda y consta de las siguientes líneas de Investigación:

- Materiales Alternos.
- Sistemas Constructivos Innovadores.
- Mitigación de Desastres Naturales.
- Mejoramiento de la Vivienda.

Esta propuesta incide en dos de estas líneas de investigación, los cuales son: Materiales Alternos y Sistemas Constructivos Innovadores.

#### **1.4 Objetivos de Trabajo**

##### **1.4.1. Objetivo General**

El objetivo fundamental del presente trabajo consiste en estudiar el comportamiento estructural de losas prefabricadas alveolares de concreto, reforzadas con secciones completas de bambú *Guadua Angustifolia* con superficie sin tratamiento, como refuerzo principal por flexión.

##### **1.4.2. Objetivos Específicos**

La intención del presente trabajo es la de realizar una evaluación técnica y económica de los resultados experimentales de las pruebas de losas alveolares prefabricadas reforzadas con bambú sometidas a pruebas de flexión y corte, según reglamentos vigentes.

Para lograr el alcance de esta investigación podemos enumerar los siguientes objetivos específicos:

1. Revisar la literatura existente sobre el comportamiento de losas alveolares prefabricadas y estudios de adherencia entre el bambú y el concreto.
2. Realizar un estudio de la pérdida de adherencia entre los diferentes prototipos de diseño tomando el bambú de refuerzo.
3. Establecer un procedimiento de diseño para este sistema de losa alveolar prefabricada reforzada con bambú.
4. Evaluación del comportamiento a flexión del sistema de losa alveolar reforzada con bambú.
5. Establecer la resistencia de este sistema constructivo, a fin de identificar las aplicaciones posibles de este sistema constructivo para diferentes condiciones de cargas.
6. Determinar el modo de falla y la carga de resistencia última de este sistema de losa, para establecer un cuadro comparativo entre sistemas constructivos actuales.
7. Determinar la factibilidad económica de este sistema estructural en el mercado de la construcción en México actual.

## Capítulo II.

# Uso del Bambú en la Construcción

### ***2.1 Introducción***

Son evidentes las ventajas en cuanto a desarrollo sostenible, que tienen materiales alternativos como el bambú en su especie *Guadua Angustifolia*, frente a materiales comunes como el acero de refuerzo convencional, fibras reforzadas con polímeros (FRP), concreto, cemento, ladrillo y los agregados en general. La reducción del uso de recursos naturales en los procesos de transformación productiva a través de tecnologías más eficientes creando políticas dentro de la industria de reciclaje, ahorro en el consumo de energía y agua, generación de empleo en volumen adecuado, tecnologías apropiadas y estructuras tributarias que promuevan las actividades económicas compatibles con la ecología, son algunos de los instrumentos para poner en práctica el desarrollo sostenible, la ecoeficiencia y la bioconstrucción .

### ***2.2 Características de los materiales de construcción.***

En el estudio o diseño de nuevos sistemas estructurales, interesan las propiedades particulares de los materiales. Estas propiedades críticas se pueden dividir en propiedades estructurales esenciales y propiedades generales. Algunas de las propiedades estructurales esenciales son:

- Resistencia: puede variar para los diferentes tipos de fuerzas, en diferentes direcciones, en diferentes edades o diferentes valores de temperatura o contenido de humedad.



- Resistencia a la deformación: grado de rigidez, elasticidad, ductilidad; variación con el tiempo, temperatura, etc.
- Dureza: resistencia al corte de la superficie, raspaduras, abrasión o desgaste.
- Resistencia a la fatiga: pérdida de la resistencia con el tiempo; fractura progresiva; cambio de forma con el tiempo.
- Uniformidad de estructura física: vetas y nudos en la madera, agrietamiento del concreto, planos cortantes en la roca, efectos de la cristalización en los metales.

Y dentro de las propiedades generales de los materiales se pueden mencionar:

- Forma: natural, remoldada o reconstituída.
- Peso: como contribuyente a las cargas gravitacionales de la estructura.
- Resistencia al fuego: combustibilidad, conductividad, punto de fusión y comportamiento general de altas temperaturas.
- Coeficiente de expansión térmica: relacionado con los cambios dimensionales debidos a las variaciones de temperatura.
- Durabilidad: resistencia al clima, pudrición, insectos y desgastes.
- Apariencia: natural o modificada.
- Disponibilidad y uso.

La elección de materiales debe hacerse a menudo con base en varias propiedades, tanto estructurales como generales. Para esta propuesta de investigación se evaluarán las características estructurales del bambú, contra el acero de refuerzo tradicional para proponer una nueva alternativa de prefabricación en sistemas estructurales de losas.

### **2.3. EL BAMBÚ: Propiedades y Características.**

El bambú ha sido llamado con justicia: “acero vegetal”, “madera del pobre”, “amigo del pueblo”, entre otros calificativos que evidencian su especialísimo perfil dentro de los materiales naturales disponibles para la humanidad. Ningún material de construcción se identifica más con los actuales ideales de ambientalismo y desarrollo sustentable que mueven a las nuevas generaciones.

En el área de construcción el bambú es un recurso abundante, con características estructurales y de servicios en vivienda y otros tipos de edificaciones. Con una apreciable resistencia a la tensión y a la compresión, comparables con los materiales de construcción tradicionales, con usos en fabricación de mobiliario, revestimientos, pisos, tabiques, instalaciones sanitarias, techos, estructuras, encofrados entre muchos otros.

Los bambúes se encuentran en forma silvestre en Asia, África, Australia y América, en áreas tropicales, subtropicales y en algunas zonas templadas como es el caso de Chile y Argentina.

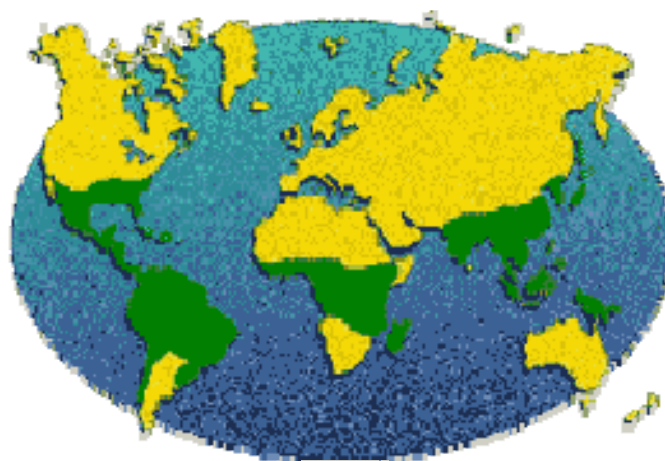


Figura 2.1. Distribución Natural del bambú ([www.inbar.cn](http://www.inbar.cn))

Estas especies corresponden al grupo más diverso de plantas que existe dentro de la familia de las gramíneas y a la más primitiva subfamilia, la cual se caracteriza por presentar un tallo leñoso o culmo, ramaje complejo, un sistema de rizomas generalmente robusto, es muy adaptable, de floración infrecuente con ciclos que fluctúan entre 15 y más de 100 años, y existen variedades tanto caducas como de hoja perenne.

Esta gramínea, destaca por ser el vegetal que registra una mayor velocidad de crecimiento, existiendo variedades capaces de brotar con diámetros que sobrepasan los 18 a 22 cm y a las ocho semanas de haber terminado su crecimiento en altura, sobrepasan los 20 m (Crouzet, 1998) En Chile se ha medido incrementos en altura de 10 cm diarios para Chusquea culeou durante su período de crecimiento.

Actualmente se estima que existen 107 géneros y más de 1300 especies de bambú en el mundo.

En América se reconocen 42 géneros y 547 especies, en China se estima existen 500 de éstas especies incluidas en 39 géneros. Solamente 140 especies son utilizadas en forma industrial o artesanal.

Son innumerables las ventajas que el bambú puede ofrecer en múltiples campos. Destacaremos los más importantes a continuación

- **Crecimiento Acelerado**

El bambú es la planta de crecimiento más rápido del planeta. El Bambú crece más del 30% que el árbol de desarrollo más rápido que existe.

Hay especies como el Guadua Angustifolia o el Dendrocalamus Giganteus que pueden crecer hasta un metro por día. Algunas personas aseguran poder ver el crecimiento con solo observar a simple vista

Su primer corte puede ser echo entre 3 y 5 años después de plantado. Las especies leñosas dilatan entre 10 y 20 años para que puedan ser aprovechadas.

Esto hace que el Bambú sea una inversión rentable a muy corto plazo.

- **Preserva y restaura el ambiente**

El bambú es considerado un elemento crítico en el balance entre oxígeno y dióxido de carbono en la atmosfera. El Bambú genera más oxígeno que las especies leñosas, y debido a su sistema radicular de rizomas sirve eficientemente para la retención y acumulación de agua en los suelos.

Con su crecimiento rápido, tiene la capacidad de reforestar más rápidamente áreas devastadas por deforestación y erosión de suelos. Verdaderamente actúa como un purificador admirable de la atmósfera y los suelos.

Hiroshima fue reforestada con bambú después de la devastación causada por la bomba atómica de 1945.

- **Material de Construcción**

Con el bambú se construyen puentes, casas, muebles, artesanías, y joyería. En China lo han usado hasta para construir bicicletas. Es un suplente viable y más barato que la madera.

Es un material con una fuerza de tensión increíble en relación a su peso. La fuerza tensión del bambú es de un 20% superior el del hierro y con un peso muchísimo menor.

- **Recurso Natural Renovable**

El bambú es un recurso natural renovable que puede ser cosechado durante todo el año. Al cortar las cañas de Bambú lo que se hace es solamente podarlo. De la misma cepa brotarán nuevas cañas todos los años que mantendrán el recurso siempre disponible. Un árbol se corta y muere, en cambio el bambú sigue brotando por hasta más de cien años en un mismo lugar.

- **Múltiples variedades para un sin número de usos**

Existen más de 1000 especies de bambú en el planeta. Unas aptas para la construcción, otras producen brotes comestibles muy apetecidos en la comida oriental, hay especies que son usadas en muebles, artesanía, y joyas, otras sirven como ornamentales que por su belleza y tamaño pueden ser usadas en exteriores o en macetas.

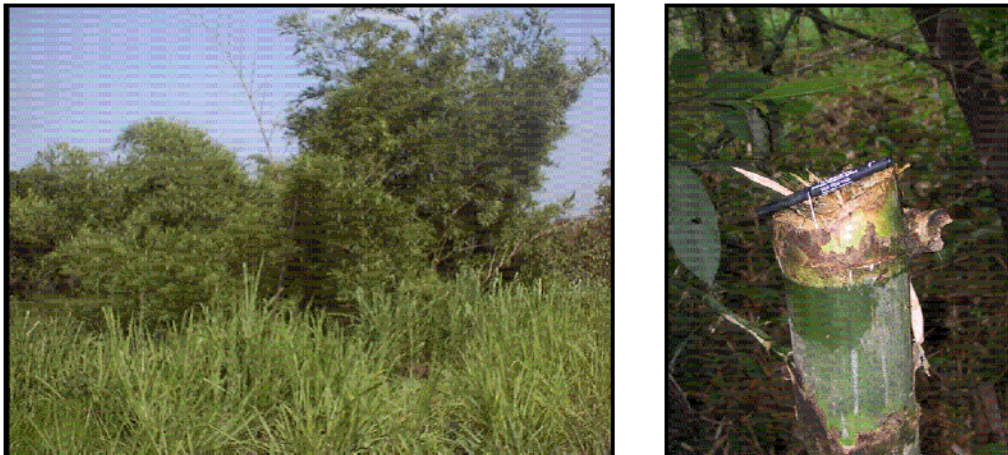
- **Pujante industria de desarrollo global**

El bambú puede tener un impacto grande en cualquier economía. Ya existen industrias que procesan Bambú como materia prima para la producción del papel, celulosa, y para producir alcohol. La madera prensada de bambú se usa para paredes y suelos. Toda esta industria alrededor del Bambú ya proporciona el sustento de más de 2 mil millones de personas en el mundo.

Usar el bambú para construir viviendas en México no es ninguna novedad, es una costumbre utilizada por numerosos pueblos, mucho antes de la conquista. Los totonacas en Veracruz, los huastecos en Hidalgo y Tamaulipas, los aztecas y teotihuacanos en el centro de México, y los Maya-Chontales en Tabasco, han construido casas y lo siguen haciendo aun en estos días. Muchas personas piensan que las familias de estos pueblos habitaban en los edificios de piedra (mal llamados pirámides) que forman parte de las zonas arqueológicas. Pero no, todos

estos pueblos vivieron en casas de Bambú que en algunos lugares son llamadas hoy en día como Palapas.

Fácil de cortar, fácil de transportar, trabajar y liviano, son solo algunas de las ventajas que las plantas de bambú ofrecen para ser utilizadas en construcción de los hogares de muchas familias. La principal desventaja: la pudrición por el paso de tiempo y el ataque de los insectos.



**Foto 2.1. A la izquierda apreciamos la especie Guadua Velutina en Huamanguillo, Tabasco, México, y a la derecha la especie Guadua Aculeata, Mizantla, Veracruz, México.**

Guadua aculeata es y ha sido usada en la región norte de Veracruz y Puebla para formar las paredes y travesaños de las casas. El culmo es cortado a la mitad longitudinalmente y golpeado en numerosas ocasiones hasta formar un tablero plano. Uniendo los diferentes culmos ya sea con alambre o bejuco, se obtendrá una pared que reforzada interiormente con culmos enteros podrá resistir los embates del medio ambiente.

Con numerosos culmos unidos de Guadua amplexifolia se obtienen también paredes fuertes y resistentes en Tabasco y Campeche. Las plantas de esta especie llamada - otate -, parece tener siempre culmos disponibles para ser utilizados por el hombre en la construcción de su vivienda.

En algunas regiones de Jalisco y Colima, aun se pueden notar pueblos enteros utilizando Bambú para construir sus hogares bajo el sistema de Bahareque, donde se mezcla el barro y el zacate a las varillas del – otate – (*Otatea acuminata*). Santa Maria Tatetla y Jalcomulco son dos pueblos veracruzanos donde aun se acostumbra la construcción con bambú, la misma especie de –otate – que en Jalisco, es usada con frecuencia y hemos podido observar casas con un acabado estructural impecable.



**Foto 2.2. Viviendas Construidas con bambú (*Guadua Velutina*) en Huamanguillo, Tabasco, México**

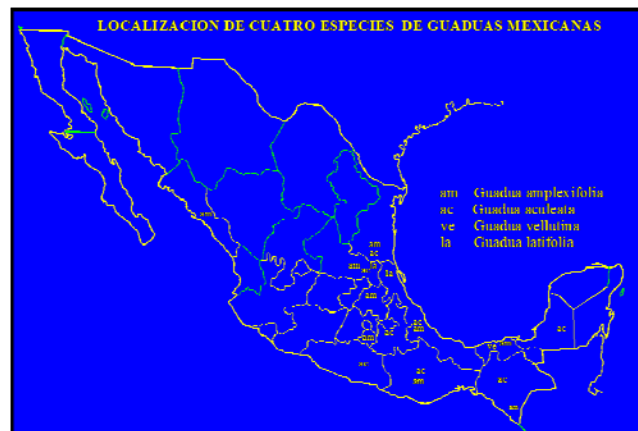
En cuanto a las recomendaciones, productos y técnicas constructivas, podemos mencionar que existe un vasto número de ellas surgidas de la teoría y la práctica, dentro de las cuales se pueden mencionar:

- ❖ La ubicación y la calidad del suelo gradual afecta la resistencia y características constructivas del bambú. No es lo mismo el bambú crecido en valles que en terrenos con pendientes. Tampoco lo es aquel cultivado con bajos nutrientes, en suelo seco, que el que se desarrolla en suelos agresivos.
- ❖ Un manejo inadecuado, mala mano de obra e inadecuado diseño de las estructuras de bambú pueden causar fisuración y/o astillamiento lo cual

debilita el material y lo hace más vulnerable a los ataques de insectos y hongos.

- ❖ La protección contra el fuego se obtiene mediante un tratamiento con ácido bórico, el cual también es un efectivo fungicida e insecticida. El fosfato de amonio, de igual forma, puede utilizarse como fungicida del bambú.

La siguiente figura muestra la distribución del bambú en México, en sus diferentes especies de Guadua: Guadua Amplexifolia, Guadua Aculeata, Guadua Vellutina y Guadua latifolia.



**Figura 2.2. Distribución del bambú en su especie Guadua Angustifolia en México.**

*Fuente: Caracterización tecnológica de las especies mexicanas de Guadua y sus aplicaciones en la construcción 2003.*

México se considera un país con “moderada diversidad” en bambúes (Soderstrom, et al., 1988) pues cuenta con ocho géneros y 35 especies de bambúes leñosos y tres géneros con cuatro especies de bambusoides herbáceos que habitan principalmente los estados del sureste. Las especies de Guaduas con las que cuenta son las siguientes: Guadua aculeata; Guadua amplexifolia J,S, Presl; Guadua longifolia (Fourn.) R, Pohl; Guadua paniculata Munro; Guadua velutina Londoño & L, Clark.

Sin embargo es notable destacar que de la mayoría de las especies nativas de México no se cuenta con información estandarizada sobre sus propiedades físicas



y mecánicas lo que hace un poco limitado su uso formal en la industria de la construcción.

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.

### **2.3.1 Guadua Angustifolia**

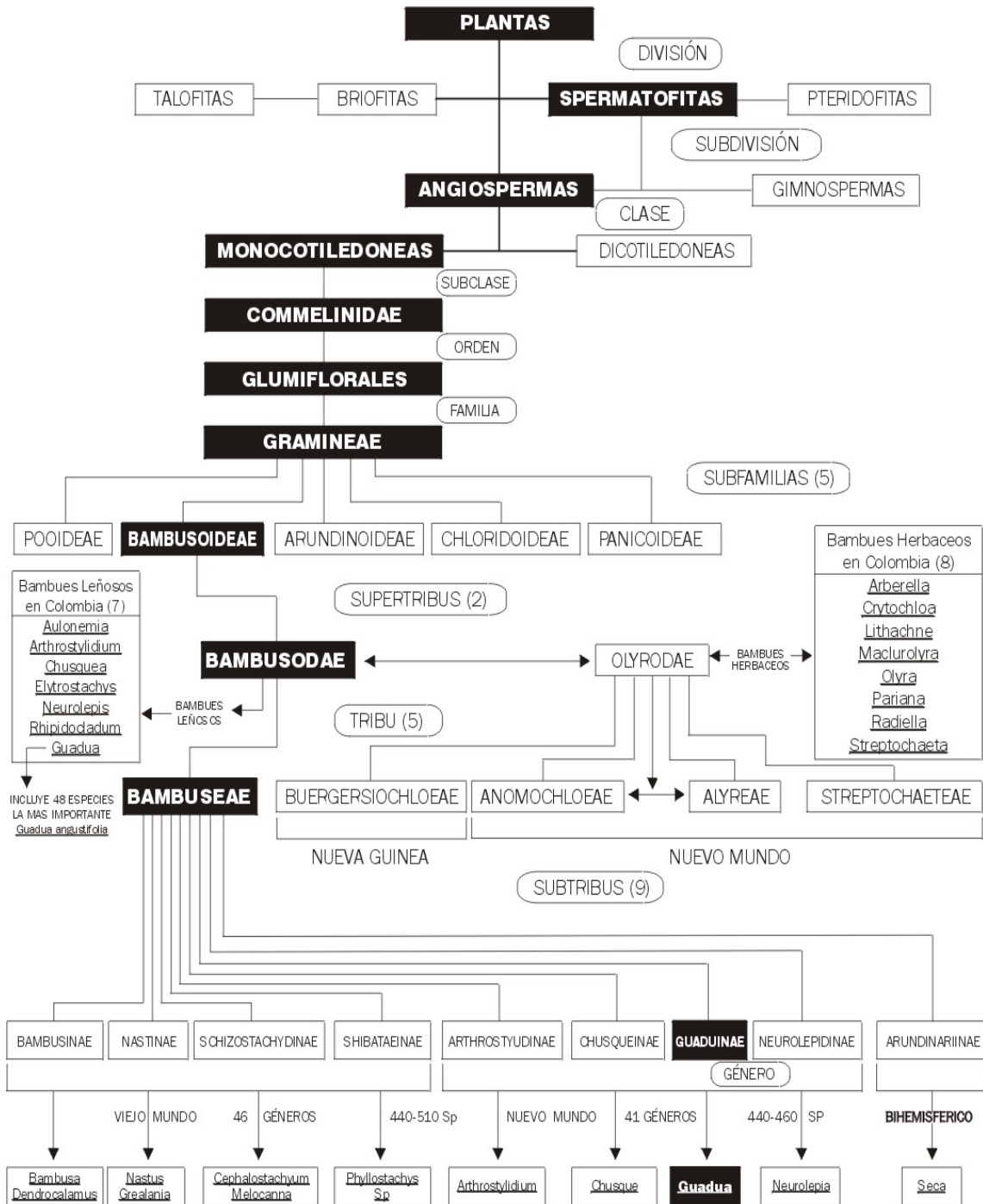
Taxonómicamente la guadua pertenece a la familia Poaceae, a la subfamilia Bambusoideae, y al género Guadua. Las especies de este género se pueden distinguir de los demás bambúes principalmente por los culmos largos y espinosos, por las bandas de pelos blancos en la región del nudo, y por las hojas caulinares en forma triangular. Sin embargo, su carácter más fuerte es la presencia de quillas aladas en la palea del flósculo de la espiguilla, la presencia de tres estigmas plumosos al final del estilo y de 6 estambres. Ver Figura 3

Guadua Angustifolia es una gramínea gigante que alcanza hasta 30 metros de altura y 22 cm. de diámetro, la cual es considerada el tercer bambú más grande del mundo, superada únicamente por dos especies asiáticas, Dendrocalamus giganteus y Dendrocalamus sinicus. Además, ha sido seleccionada como una de las 20 especies de bambúes prioritarias del mundo por sus prioridades físico-mecánicas y por la durabilidad de su madera, que la convierten en un excelente material de construcción.

Los múltiples usos de la guadua angustifolia se han extendido hasta nuestra época y a pesar de que es un excelente recurso renovable que puede contribuir substancialmente y brindar muchos beneficios económicos a las economías rurales en la mayoría de los países de América Latina, su utilización se ha limitado al manejo artesanal que las comunidades campesinas e indígenas le dan a este bambú. Solamente en países como Colombia, Ecuador y Brasil y más recientemente Costa Rica, la guadua ha tenido un desarrollo industrial, sobre todo en el campo de la construcción, en la fabricación de muebles y artesanías, y en la elaboración de papel (Brasil), desempeñando un rol más conspicuo en economías locales.

Esta especie fue identificada primero por los botánicos Humboldt y Bonpland como Bambusa guadua quienes la recolectaron en su viaje al Nuevo Mundo a comienzos del siglo XIX. Posteriormente, en 1822 el botánico alemán Kart Sigismund Kunth profundiza en el estudio del bambú y crea el género guadua, haciendo uso del vocablo indígena “guadua” con que las comunidades nativas de Colombia y Ecuador denominaban este bambú. Kunt rebautiza la especie con el nombre de Guadua Angustifolia, en donde el epíteto significa “hoja angosta”

### TAXONOMÍA DE LA GUADUA



FUENTE: XIMENA LONDOÑO I.A.

Figura 2.3. Taxonomía de la Guadua.

Es importante destacar que al ser un recurso natural, la guadua es condicionada por factores climáticos que afectan sus propiedades físico-mecánicas. Dentro de los factores climáticos que afectan el crecimiento de la Guadua podemos mencionar el clima, la Guadua no tolera las heladas ni los climas fríos; la pluviosidad que juega un papel importante en su crecimiento, si se encuentra en sitios de baja precipitación debe existir un nivel freático alto, pues la planta requiere de buena humedad; la altitud / temperatura, la Guadua crece desde el nivel del mar hasta los 2,600 m de altura. Su rango de altitud óptimo está entre los 600mts (clima cálido) y los 2,000mts (clima templado); la precipitación, los sitios secos (precipitaciones inferiores a 1,000mm/año) o muy húmedos (precipitaciones mayores a 5,000mm/año) presentan limitaciones para el desarrollo óptimo de la planta.

Por lo general, la guadua se desarrolla en lugares con rangos de pluviosidad que oscilan entre los 950mm y los 5,000mm anuales, pero los guaduales mejor desarrollados son los que se ubican en sitios en donde el rango está entre los 1,800 mm. y los 2,500 mm. anuales de lluvia.

A continuación se muestra un resumen de los factores climáticos que afectan a la Guadua durante su crecimiento:

**Tabla 2.1. Resumen de Factores Climáticos que afectan las propiedades físico-mecánicas de la Guadua.**

<b>Factor</b>	<b>Rango General</b>	<b>Rango Óptimo</b>
<b>Altitud (msnm)</b>	<b>0 – 2600</b>	<b>600 – 2000</b>
<b>Temperatura (°C)</b>	<b>14 – 26</b>	<b>20 – 26</b>
<b>Brillo Solar (horas – luz / año)</b>	<b>1400 – 2200</b>	<b>1800 - 2000</b>
<b>Humedad Relativa (%)</b>		<b>75 - 85</b>
<b>Precipitación (mm./año)</b>	<b>950 – 5000</b>	<b>1800 – 2500</b>
<b>Vientos (dirección e intensidad)</b>	<b>Brisas débiles o fuertes</b>	<b>Brisas débiles o moderadas</b>

Es importante mencionar que como material de construcción, el bambú debe estar certificado por normas estandarizadas, las cuales establecen los procesos de caracterización mecánica, que aseguren la calidad en las obras de construcción.

Sistema de tratamiento para preservación del bambú. Como el bambú es muy susceptible al ataque de los insectos y de los hongos, lo más conveniente es aplicarle algún tratamiento con preservadores para incrementar su vida útil bajo cualquier ambiente. Tamolang et al. (1980) han observado que los almidones del bambú contribuyen a su susceptibilidad a los insectos; se recomienda usar cañas de bambú maduro (más de tres años de edad).

Bajo condiciones normales, la vida útil del bambú es de 1 a 3 años en contacto con el suelo; en interiores se incrementa su vida útil hasta 4-7 años y en zonas rurales de la India se ha encontrado que para el bambú usado en cocinas expuesto al humo y otras sustancias la vida útil llega a ser de 10 a 15 años. Finalmente en condiciones marinas sólo llega a tener una vida de 6 meses.

Para el tratamiento preservador del bambú Grover (1957) y Liese (1980) recomiendan un método rápido y eficiente, el Método Modificado de Boucherie; a grandes rasgos este método consiste en substituir la savia de la caña con una solución preservadora; esto obliga a aplicar el tratamiento a las cañas recién cortadas antes de que pierdan el agua que contienen.

Los mayores problemas de ataque de insectos y hongos se presentan durante el período de secado, que es necesario realizar antes de emplear el material. Es preferible no almacenar el bambú en contacto con el suelo, ni a la intemperie, sino bajo techo y bien ventilado, en posición vertical. El tiempo de secado varía según el contenido de humedad en el culmo, el grosor de la pared, el grado de madurez y las condiciones de secado; en general es de cuatro a ocho semanas (Stultz 1981). Los defectos que se presentan en los bambúes en el secado, son agrietamientos en la superficie, rajaduras en los extremos, colapso o

aplastamiento, y deformaciones (Hidalgo 1974), que hacen a los culmos inservibles. Los bambúes también se pueden secar en estufa, como la madera aserrada; es más costoso, y sólo se justifica a gran escala (Hidalgo 1974).

Los métodos de preservación que se proponen a continuación, se utilizan para guadua que va a ser empleada en interiores, es decir, que no estará expuesta a la intemperie. Se debe tener en cuenta además, que la guadua esté en el grado de madurez óptima y que se encuentre seca, con un contenido de humedad por debajo del 12%, buscando que el material tenga buenas condiciones de resistencia físico-mecánica.

La mezcla empleada para la preservación, es una solución salina denominada "Pentaborato" cuyos componentes son:

- 1 Kilo de Acido Bórico
- 1 Kilo de Bórax
- 50 Litros de Agua

Al iniciar el proceso de preservación, se debe hacer la ruptura de los tabiques o septus transversales de la guadua, para lograr la mayor penetración del inmunizante, Esta labor se realiza empleando una varilla de hierro de ½ pulgada, de forma puntiaguda en uno de sus extremos que permita romper fácilmente dichos tabiques, de tal manera que se cause el mínimo daño a la guadua.

Una vez realizada la mezcla con una buena dilución, se procede a hacer la inmersión de la guadua en los tanques por un lapso de 5,8 horas. Posteriormente se deja escurrir en forma vertical. Por economía preserve la guadua solo en las dimensiones que utilizará posteriormente.

Para evitar pérdidas de resistencia y facilitar la penetración de los preservantes, se recomienda otro procedimiento que consiste en tratar las guaduas secas, efectuando dos perforaciones en cada entrenudo, cada una cerca al tabique, con

una broca de 1/8". Luego se procede a sumergir las guaduas en la solución escogida.

Existen en el mercado muchos otros productos químicos, algunos de ellos biodegradables, que se han utilizado con óptimos resultados, cuya función específica es preservar y proteger las maderas y la guadua contra insectos: comején, carcoma y otros xilófagos.

El tratamiento con estos productos se realiza perforando la guadua cerca de los tabiques. Luego se inyecta por los orificios de 1/8" dosis de 2,5 cc hasta 10 cc, según el diámetro de la guadua y la longitud de sus entrenudos. Cada guadua se debe rodar en posición horizontal de tal manera que el producto cubra completamente la pared interna. Finalizada la aplicación se tapan los orificios con cera de abejas para evitar la entrada de otros líquidos disolventes.

Si el corte de los tallos se efectúa al amanecer y en luna menguante se obtienen con menor contenido de humedad y menores concentraciones de carbohidratos y por lo tanto más resistentes a los ataques de los hongos y agentes xilófagos.

La durabilidad natural del bambú es de uno a tres años, empleado en la construcción en contacto con el suelo, y de cuatro a siete años, si se utiliza en las partes interiores (Lantican et al. 1987). La vida útil del bambú aumenta con los tratamientos de preservación. Así, según (Tewari 1981) el bambú tratado puede durar como mínimo 15 años (hasta 20), aún en condiciones extremas, o hasta 30-50 años sin estar en contacto con la humedad (Carmioli 1998).

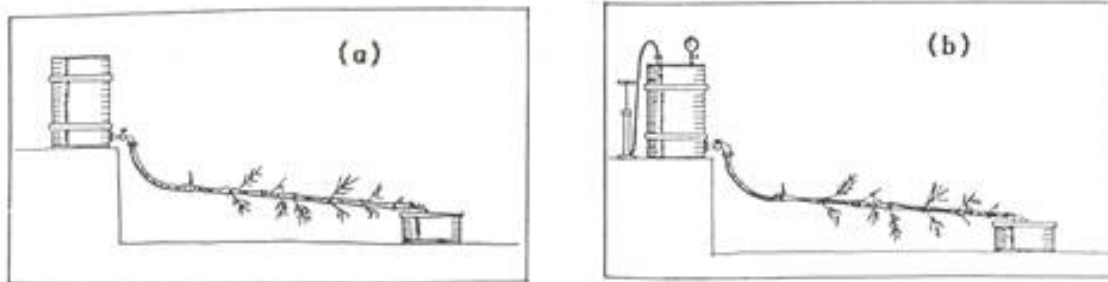
Los bambúes varían de especie a especie en la susceptibilidad de los culmos a insectos xilófagos y hongos. Existe además cierta correlación entre el ataque y el contenido de almidón y de humedad (McClure 1956). En consecuencia, la durabilidad depende de la especie de bambú, del tiempo de cosecha y del turno técnico empleado, es decir, la edad de corta.

En muchas ocasiones se utiliza el bambú sin tratamiento de preservación por desconocimiento de las posibilidades y ventajas y también por la ausencia de mercado para bambú preservado (Liese 1985). Es necesario por ende, después de haber seleccionado las especies de interés comercial preferentemente con buena resistencia al ataque de insectos y patógenos, determinar los preservantes y la técnica de tratamiento según las posibilidades existentes. Los métodos más comunes son:

1. Ahumado o calentamiento en hornos: Los culmos son almacenados encima de chimeneas, el humo ennegrece los culmos y por el calor se extrae el almidón y otras sustancias. En Japón se colocan los culmos en cámaras a 120 –150 °C por 20 minutos, porque se considera efectivo para la protección contra insectos xilófagos (Liese 1985).
2. Inmersión en agua corriente: Los culmos son echados a ríos poco turbulentos por varias semanas, y lastrados con piedras para sumergirlos. Por medio de este proceso el almidón y los azúcares son disueltos, y se mejora la absorción de preservantes por difusión y presión (Liese 1985).
3. Inmersión en tanques: Es un método económico y simple en el cual se utiliza un preservante soluble en agua. El preservante penetra en el lapso de varios días, por los extremos de los culmos y en menor proporción por los nudos (Liese 1985).
4. Metabolismo y transpiración después del corte: Se corta el bambú, se deja con ramas y follaje en forma vertical y la savia (almidón y otros componentes) es liberada del extremo cortado. A continuación, se coloca en la misma posición dentro de un recipiente con preservante por dos a cinco días, que es absorbido con ayuda de la transpiración de las hojas (Hidalgo 1974, Stultz 1981).



5. Método "Boucherie": Con este método (Figura 6) es preferible utilizar culmos recién cosechados con ramas y follaje. Se conecta la base cortada del bambú con una llave, que sale de un recipiente. Con preservante ubicado a una altura superior, y se coloca un recipiente al final del culmo para coleccionar el preservante. La sustancia, que penetra por efecto de la gravedad y también por la transpiración de las hojas, debe dejarse difundir por espacio de dos a cinco días (a). El método de "Boucherie" mejorado es con una bomba de aire (compresor) conectada al recipiente con preservante, con el cual se reduce el tiempo a unas tres a ocho horas (b) (Hidalgo 1974 Stultz 1981, Liese 1985)



**Figura 2.4 Método de "Boucherie"(a) simple, (b) con bomba de aire (Stultz 1981)**

En Costa Rica el Proyecto Nacional Bambú ha desarrollado una modificación al método de preservación de Boucheri, que consiste en un desplazamiento de savia. Por un lado del tallo se le inyecta el preservante y por el otro sale la savia (Foto 3).



**Foto 2.3.** Preservación de *Guadua angustifolia* mediante el método de Boucheri modificado. Estación Experimental Los Diamantes, Guápiles, Costa Rica.

Uno de los mejores tratamientos es el usado a base de presión, pero se necesitan instalaciones especiales. Se utilizan preservantes solubles en agua o también creosota, aplicados a los bambúes secados, primero efectuando un vacío de 10 – 500 mbar y luego una presión de 0,5 – 1,5N/m<sup>2</sup>.

En Taiwán se tratan así a los bambúes utilizados para puntales de bananos (Liese1985). Las soluciones de preservantes más empleadas son (Hidalgo 1974, Stultz 1981, Liese 1985):

- Pentóxido de arsénico-sulfato de cobre- dicromato de sodio. Es efectivo, pero no es recomendable por su alta toxicidad y su efecto residual;
- Sulfato de cobre-dicromato de sodio- ácido acético;
- Sulfato de cobre-cromato de zinc- dicromato de sodio;
- Acido bórico-sulfato de cobre- dicromato de sodio
- Cloruro de zinc-dicromato de sodio;
- Borax-ácido bórico-dicromato de sodio;
- Borax-ácido bórico; y otros.

Después del tratamiento, los bambúes se deben secar al aire por espacio de varios días, hasta que el contenido de humedad descienda a 10-15% (Stultz 1981). Otros métodos de menor importancia son el calentamiento sobre llama, la ebullición en agua. Utilizando preservantes, la aplicación de borax: ácido bórico (1:1) con brocha o atomizador. Además, se pueden aplicar preservantes contra el fuego (Hidalgo 1974, Liese 1985).

**2.3.2. Comparativa de propiedades físicas del Bambú con otros estudios realizados.**

En el Instituto Tecnológico de Estudios Superiores (ITESM), Campus Monterrey se han llevado a cabo pruebas para determinar algunos parámetros de resistencia de la Guadua Angustifolia. En las siguientes tablas (2 y 3) podemos observar los diferentes valores de resistencia obtenidos por el Laboratorio de Materiales del ITESM, comparado con estudios realizados en otras universidades, así como de los parámetros de resistencias más relevantes del bambú comparados con otros materiales de construcción.

Comparativa de las propiedades del bambú entre diversas investigaciones.

Lugar de Estudio	Contenido de Humedad (%)	Resistencia a la Compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo Cortante (Kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de Elasticidad a Compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de Elasticidad a Flexión (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo en tensión (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo axial por flexión (kg/cm <sup>2</sup> )
Instituto Tecnológico Eindhoven, Países Bajos [27]	-----	591	82	-----	152,040	1,095 – 1,422	986
Universidad Autónoma de Nuevo León [28]	10	546	15	-----	-----	-----	-----
Universidad Nacional de Colombia [29]	-----	661-505	-----	-----	-----	-----	-----
ITESM Monterrey, México, 2003	13	485	80	-----	150,000	-----	680
ITESM Monterrey, México, 2005	8	473	89	293,100	141,450	1,081 – 1,457	642

Fuente: A. Salan (2006)

Propiedades Mecánicas de algunos materiales de construcción.

Material	Esfuerzo último a Compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo Cortante (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo a tensión (kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de Elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )
2520Madera (Pino)[24]	407	77	-----	100,000
Concreto	250	-----	32	238,752
Acero Estructural ASTM-A36	2,520	1,512	2,520	2,039,000
Guadua Angustifolia	473	89	1,081 - 1,457	141,450

Fuente: A. Salan (2006)

### **2.3.4. Ventajas y desventajas del uso de la Guadua Angustifolia en la construcción (Hidalgo 1974)**

Las ventajas son las siguientes:

1. El bambú guadua está dotado de extraordinarias características físicas que permiten su empleo en todo tipo de miembros estructurales.
2. Su forma circular y su sección hueca lo hacen un material liviano, fácil de transportar y de almacenar, lo que permite la construcción rápida de estructuras temporales o permanentes.
3. En cada uno de los nudos del bambú hay un tabique o pared transversal que además de hacerlo más rígido y elástico evita su ruptura al curvarse; por esta característica es un material apropiado para construcciones anti-sísmicas.
4. La constitución de las fibras de las paredes del bambú permite que pueda ser cortado transversal o longitudinalmente en piezas de cualquier longitud, empleando herramientas manuales sencillas como el machete.
5. La superficie natural del bambú es lisa, limpia, de color atractivo y no requiere ser pintada, raspada o pulida.
6. Los bambúes no tienen corteza o partes que puedan considerarse como desperdicio
7. Además de usarse como elemento estructural el bambú puede usarse para otras funciones en la construcción. Tales como tuberías para el transporte de agua y en pequeñas secciones para drenaje.
8. El bambú puede emplearse en combinación con todo tipo de materiales de construcción como elementos de refuerzo.
9. Del bambú pueden obtenerse diversos materiales para enchapes tales como esteras, paneles contrachapados, etc.
10. El bambú continúa siendo el material de construcción de más bajo precio.

Las desventajas:

1. El bambú en contacto permanente con la humedad del suelo presenta pudrición y aumenta el ataque de termitas y otros insectos; por ello no deben utilizarse como cimiento por enterramiento a menos que se trate previamente.
2. El bambú una vez cortado es atacado por insectos como *Dinoderus minutus* que construye grandes galerías en su pared debilitándolo. Por ello, una vez cortado debe someterse inmediatamente a tratamientos de curado y secado.
3. El bambú es un material altamente combustible cuando está seco; por ello debe recubrirse con una sustancia o material a prueba de fuego.
4. El bambú cuando envejece pierde su resistencia si no se trata apropiadamente.
5. El bambú no tiene diámetro igual en toda su longitud, tampoco es constante el espesor de la pared por lo que algunas veces presentan dificultades en la construcción.
6. El bambú al secarse se contrae y se reduce su diámetro; esto tiene implicaciones en la construcción.
7. Las uniones de miembros estructurales no pueden hacerse a base de empalmes, como en la madera, lo que implica dificultades como material de construcción.
8. El bambú por su tendencia a rajarse no debe clavarse con puntillas o clavos que generalmente se emplean en la madera.

Muchas de las desventajas anotadas anteriormente pueden ser superadas con la aplicación de preservantes apropiados, con un diseño estructural apropiado y siguiendo las normas apropiadas para la preparación y combinación con otros materiales de construcción.

La investigación silvicultural de la Guadua en Colombia viene desarrollándose aproximadamente desde hace 15 años y el producto logrado es uno de los

paquetes tecnológicos más completos que existen, tal es así que se ha llevado a Brasil, Ecuador, México, República Dominicana y Costa Rica para ser aplicado, según lo informa la Corporación Regional del Valle de Colombia (2004).

Pero la verdad es que localmente existe sobre el bambú un estigma que la relaciona con la miseria y la pobreza, las razones, muchas, entre ellas, esa enorme tradición de uso que ha tenido en los elementos y ambiente propios de clases sociales de bajos ingresos (estructuras para vivienda, muebles, postes, esterillas) porque la especie se manipula y encuentra fácilmente y porque la inversión para su transformación, en los usos citados, es muy poca.

#### ***2.4 Bambú como refuerzo en elementos estructurales***

Para garantizar que el bambú trabaje eficientemente como material de refuerzo, es necesario verificar la adherencia del mismo con el material que reforzará. Es por ello que las investigaciones que se desarrollan sobre el tema buscan garantizar que la adherencia se de para que los resultados obtenidos en las pruebas de resistencia tenga validez.

Entre los factores que afectan la adherencia entre el refuerzo y el concreto son las propiedades de adherencia de la matriz cementante, las fuerzas de compresión que aparecen en la superficie de la barra de refuerzo debido al encogimiento del concreto y la resistencia a corte del concreto debido a la forma de la superficie y la rugosidad de la barra o elemento de refuerzo.

Otro factor importante que debemos considerar al utilizar el bambú como refuerzo es el proceso de preservación o curado del mismo. Entre los factores que afectan la preservación son las propiedades de adherencia de la sustancia aplicada al bambú y al concreto, las propiedades de resistencia al agua, y la topografía de la interfaz del bambú y el concreto. Un tratamiento efectivo es la aplicación de una capa fina de epóxico a la superficie del bambú seguido de una capa de arena fina.

En Brasil se llevaron a cabo estudios donde se utilizaba el bambú como refuerzo estructural para columnas, vigas y losas aligeradas los cuales arrojaron como resultados experimentales que los especímenes de prueba fueron analizados usando métodos analíticos convencional demostrando que no son suficientes para estos estudiar estos tipos de elementos estructurales (losas compuestas con diafragmas de bambú). Por lo tanto, para el análisis de las losas, del lado de los métodos semi-analíticos, la teoría de capas y el método de Elemento Finito son instrumentos que pueden ser utilizados para realizar un estudio paramétrico considerando variables diferentes que influyan en el comportamiento de las losas compuestas.

Uno de los factores importantes, que tiene una gran influencia sobre la resistencia última de la losa, es la resistencia a corte del diafragma de bambú. Para las losas con la mitad del diafragma de bambú, se encontraron resultados de pruebas a cortante del orden de 10.89MPa con una desviación estándar de 2.56MPa.

Aunque el diafragma de bambú crea una interacción compuesta entre el bambú y el concreto, su resistencia a cortante no es suficiente para prevenir su falla a corte. La mayor parte de las losas ensayadas fallaron por adherencia, luego un segundo grupo de ella falló por presencia de fallas en el diafragma y finalmente un grupo menor a los dos anteriores presentaron falla por compresión del concreto.

En este aspecto, es importante mencionar que desde 1979 se están realizando en Brasil, pruebas experimentales con materiales no convencionales y nuevas alternativas tecnológicas. Nuevos componentes de edificación fueron desarrollados usando fibras vegetales como refuerzo de morteros de cemento y el bambú como refuerzos en vigas, columnas, losas y formas permanentes de cimbra para losas de concreto y columnas. La Asociación Brasileña de Ciencia de Tecnologías de los Materiales No Convencionales, **ABMTENC**, fue fundada para fomentar el desarrollo de estos estudios y la cooperación entre ingenieros,

arquitectos, diseñadores y todos aquellos empleados públicos que estén relacionados con el tema de la vivienda en general.

Los resultados de las investigaciones demuestran que el bambú puede sustituir el acero satisfactoriamente. Los elementos estructurales desarrollados y estudiados podrían ser usados en muchas construcciones de vivienda.

En Colombia se han fabricados viviendas con sistemas de losas reforzadas con bambú adicional al acero de refuerzo longitudinal. Algunos de estos sistemas se presentan a continuación:

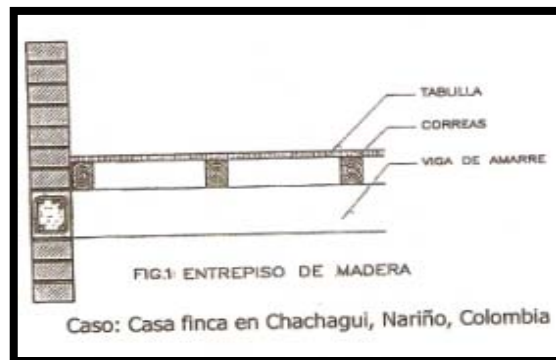


Figura 2.5. Sistema de Entrepiso de Madera



Figura 2.6. Sistema de entrepiso de esterilla con guadua



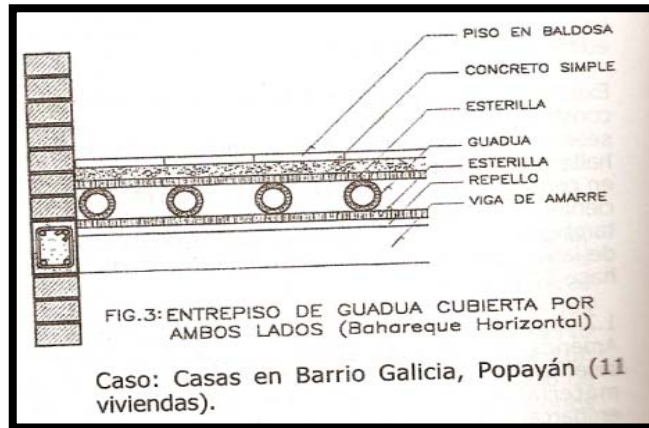


Figura 2.7. Entrepiso de guadua cubierto por ambos lados.



Figura 2.8. Entrepiso de guadua con tablilla para acabado de piso y de cielo

raso

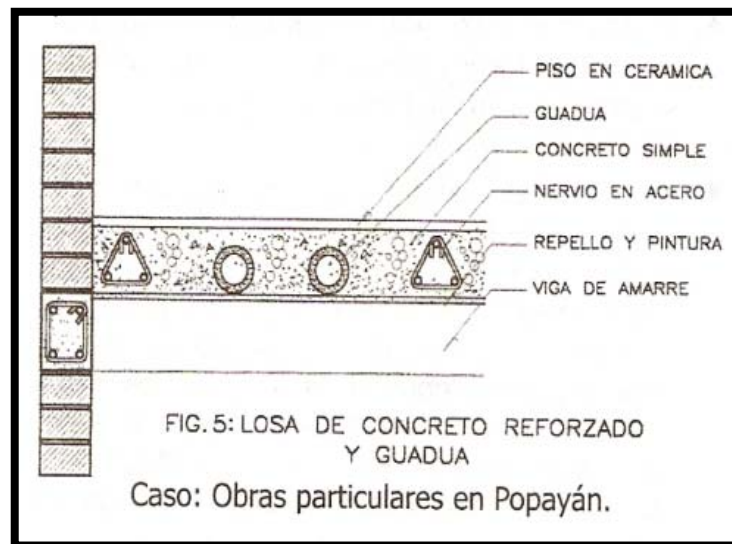
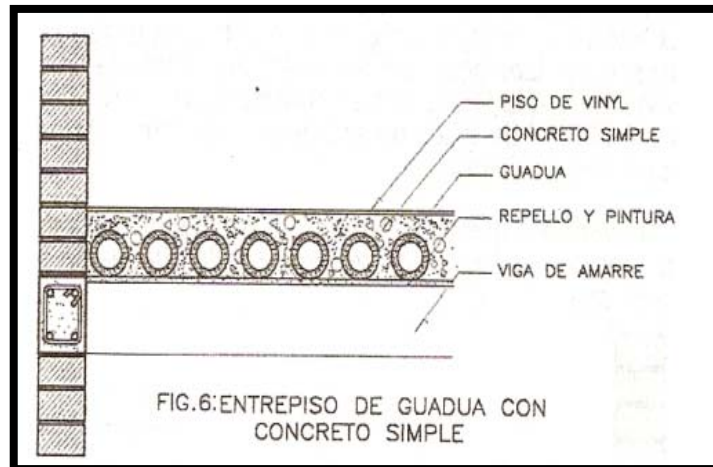


Figura 2.9. Losa de concreto reforzado con guadua.



**Figura 2.10.Sistema de Entrepiso de guadua con concreto simple.**

La figura 10 muestra un sistema constructivo propuesto en Colombia, donde no sólo se utiliza como aligerante el bambú sino que además se utiliza como refuerzo estructural en la losa de concreto.

Esta propuesta consiste en armar una losa con guadua y concreto sin ningún refuerzo de acero. En este sistema no se considera el concepto de una losa convencional de concreto reforzado donde los dos materiales concreto y acero, trabajan en total dependencia el uno del otro cumpliendo los dos, funciones estructurales. En la losa propuesta la resistencia la ejerce la guadua, el concreto trabaja solamente como rigidizante del entrepiso para que posteriormente reciba un piso para acabados: cerámica, baldosa, vinilo, parquet, mármol, etc. Es importante aclarar que esta losa tampoco tiene elementos para alivianarla como casetones aligerantes, bloques de cemento o elementos prefabricados.

En este entrepiso la guadua además de ser el material que aporta la resistencia, ejerce otro papel puesto que al poseer una forma hueca en su interior, proporciona aligeramiento de la losa. Estas dos condiciones ningún otro material natural o artificial puede realizar al mismo tiempo.

Los investigadores que llevaron a cabo esta propuesta de losa reforzada con bambú sistematizaron su proceso de construcción en los siguientes pasos:

1. Se realiza un cimbrado con tablón.
2. Se sitúa la guadua sobre las vigas de amarre con separación de 4 cm. entre ellas.
3. Se sujetan las guaduas con latilla de esterilla para evitar el rodamiento.
4. Ejecución de instalaciones eléctricas, de teléfonos, sanitarias y de agua.
5. Se vierte concreto de mortero convencional (cemento, arena) sobre las guaduas, de aproximadamente 4 cm. de espesor.
6. Se coloca como terminado de piso baldosa, cerámica, u otro.
7. Se repella y se procede a dar acabado en la parte inferior de la losa.

Los resultados obtenidos de este sistema estructural propuesto mostraron que en los análisis de 2, 3 y 5 años de colada las losas se observaron cambios en cuanto a su comportamiento, los cuales fueron:

- ✓ En las primeras muestras el PH aumentó y en la última muestra el PH se neutralizó. Esto hace a la guadua menos vulnerable al ataque de insectos.
- ✓ Los resultados de los valores del índice de flexibilidad (F), muestran que al estar en contacto con el cemento, la resistencia mecánica de las fibras ha mejorado, puesto que resta flexibilidad principalmente a las paredes internas.
- ✓ Parte de la acción cementante de la lignina en las fibras de la guadua, ha sido reemplazada por el cemento dándole una mayor resistencia a la fibra.
- ✓ No hubo variaciones en cuanto al contenido de almidón natural de la guadua.

Entre las ventajas de este tipo de sistema estructural están que disminuyen el volumen de concreto a utilizar, es una losa más liviana, agiliza el proceso de

construcción y disminución del costo en un 45% en relación a la losa de concreto reforzado.

El uso del bambú en la construcción debe efectuarse con respaldo técnico, que se obtuviese de los análisis y aplicaciones de sistemas constructivos tradicionales y de los resultados de laboratorios certificados respecto a la influencia de otros materiales sobre el bambú, en los casos aplicados y a su comportamiento posterior. Los resultados obtenidos deben ofrecer seguridad, durabilidad, resistencia y economía en las innovaciones técnicas propuestas.

Muchas investigaciones son realizadas actualmente para establecer la durabilidad del bambú como refuerzo estructural, además se busca mejorar la fuerza de adherencia entre bambú y el mortero estructural. Existe una necesidad para establecer la resistencia característica de bambú para propósitos de diseño basados en un análisis estadístico riguroso.

## Capítulo III

### Sistema Estructural: Losas Alveolares.

#### **3.1 Sistema Estructural:**

Se define como sistema estructural a los cuerpos capaces de resistir cargas sin que exista una deformación excesiva de una de las partes con respecto a otra. Por ello la función de una estructura consiste en transmitir las fuerzas de un punto a otro en el espacio, resistiendo su aplicación sin perder la estabilidad (Marshall y Nelson, 1995).

De la misma forma, el uso que se le dará a la edificación establece ciertas exigencias relativas a funcionalidad, seguridad, urbanismo y economía. En cuanto a las exigencias de funcionabilidad, son aquellas que dependen de la función que tiene lo edificado; las exigencias de seguridad y confort son aquellas que determinan el tipo y la calidad de los materiales a emplear en la construcción; las exigencias urbanísticas integran la edificación a un medio ambiente y las económicas definen los costos de la obra a construir.

Las losas son elementos estructurales horizontales cuyas dimensiones en planta son relativamente grandes en comparación con su altura donde las acciones principales (cargas) sobre ellas son perpendiculares a su plano, se emplean para entrepisos y techos. (Cuevas y Robles, 1997; Méndez, 1991). Los entrepisos, aparte de su función estructural cumplen con otras funciones tales como: control ambiental, seguridad e instalaciones, pavimentos o pisos. Por lo tanto están formadas por: la estructura, la capa aislante, el cielo falso o cielo raso.

La principal función estructural de las losas es el sostén para las personas, elementos, maquinarias que puedan desarrollar de forma segura todas las actividades y a veces a contribuir a la estabilidad de los edificios.

El mejor criterio de selección de una losa en particular se debe obtener considerando las mejores condiciones de seguridad, estabilidad, deflexiones mínimas y economía. (Ávalos, 1998).

Algunas clasificaciones generales de los tipos de losas son:

- Losas macizas
- Losas planas
  - Reticular
  - Flat-plate
  - Flat-Slab
- Losas nervadas
- Losas prefabricadas
  - Losa TT
  - Vigas T
  - Vigüeta y bovedilla
  - Spancrete
  - Siporex (Mendez, 1991)

En los proyectos siempre queremos optimizar los procesos constructivos y los materiales, esto se refleja en los costos totales de la obra. Un factor muy importante es el tiempo, los inversionistas necesitan su producto y los constructores entregar las tareas asignadas. Las actividades en la construcción requieren mucho de la mano del obrero y como no controlamos al cien por ciento su rendimiento, siempre se buscan alternativas industriales que permitan agilizar el ritmo de construcción, es por esto que se utilizan muchos elementos estructurales prefabricados, tales como vigas, columnas, losas, escaleras, muros, etc. Esta propuesta analizará los sistemas de losas prefabricadas tipo alveolar o Hollow Core.

Hollow core, que se traduce núcleo hueco, son losas prefabricadas que se han utilizado desde la segunda guerra mundial. En Europa es muy usada y ya está entrando con fuerza al mercado americano. Las ventajas son muchas, entre ellas, tiempo de instalación ya que se pueden colocar 500 m<sup>2</sup> por día, la terminación en una de sus caras lo que reduce el repello a colocar, se pueden lograr grandes tamaños, hasta 18 metros, se pueden hacer en espesores de 15 cm., de 20 cm., de 30 cm. y 32 cm. No necesitan puntales y se pueden utilizar como muros.

El sistema de losas huecas es resistente, fácil de manejar, de bajo peralte y flexible para soportar instalaciones colgantes. Día a día adquiere mayor demanda entre los constructores de México. Es el sistema de cubierta o entrepiso más popular en los países desarrollados. Su fácil transporte, almacenamiento y montaje, la reducción de tiempos y costos de edificación, y su capacidad de aislamiento térmico son factores determinantes para el incremento en la demanda del producto. Estas losas son usadas en todo tipo de edificaciones de concreto prefabricado o en combinación con estructuras metálicas.

Algunas aplicaciones de los entrepisos y azoteas de estas losas son: muros de contención en rampas para puentes vehiculares, fachadas, muros perimetrales para naves industriales y graderíos, entre otras. Tiene distintos acabados en una de sus caras para usarla en cualquiera de las aplicaciones mencionadas. El elemento ha probado su eficacia en construcciones ubicadas en zonas sísmicas de México.

Existen dos tipos de máquinas para la fabricación de las losas alveolares de concreto pretensado: Una es la formadora o Slip Former que produce una losa alveolar de forma poco eficiente ya que es una máquina que sólo vibra el concreto y lo forma con un molde de placas deslizantes. La máquina está montada sobre rieles de acero en una mesa de ancho variable entre 1.20 m y 2.40 m. La longitud varía entre una fábrica y otra, obedeciendo a las recomendaciones del fabricante de la máquina o al terreno disponible.

Sin embargo, la mejor alternativa para la producción de este tipo de losa es la extrusora. El ancho de losa hueca producida por esta máquina está limitado a 1.20 m; en cambio, produce losas de menor peso por unidad de área, ya que además de extruir el concreto, lo vibra dando un concreto más uniforme y resistente al momento de la extrusión, lo cual se transforma en la capacidad de crear una sección con menor número de nervios verticales y por lo tanto una losa con menor volumen de concreto por metro cuadrado.

La máquina extrusora de losas huecas adquiere su nombre debido a un tornillo sinfín cónico situado debajo de la tolva de concreto de la máquina cuya función es recibir el concreto en su parte de menor diámetro y transportarlo con su espiral hacia su parte de mayor diámetro, comprimiendo el concreto contra las paredes del molde que lo rodea. Inmediatamente el concreto pasa por un vibrador cilíndrico adosado al tornillo y luego por una pieza fija que le da la forma al concreto extruido. El tornillo sinfín, al extruir el concreto, impulsa la máquina hacia el frente, convirtiéndose éste en un “propulsor” de la extrusora.

Ambas máquinas requieren de cables o alambres de preesfuerzo en la parte inferior y de una cortadora transversal.

Algunas ventajas de estos elementos prefabricados son:

- La construcción se convertiría en una actividad continua, al menos en la planta de producción, en la que durante todo el año se fabricarían los componentes de las futuras edificaciones.
- Ahorro de materiales utilizados en obra, con los elementos prefabricados en edificios o con las viviendas modulares, es posible la construcción o montaje en seco, es decir, se puede prescindir del mortero.



- Reducción de los residuos de la construcción, al llegar los componentes prefabricados a obra, se reduciría la cantidad de residuos generados en el terreno donde se realiza la construcción (embalajes, rotura de piezas, etc.).

Es por lo anterior que, ante una carga normal de vivienda u oficinas, las losas macizas son eficientes para luces pequeñas, las aligeradas en una dirección son económicas en luces intermedias, 3 a 6 m, y las aligeradas en dos direcciones resultan ser más económicas para luces grandes.

Tipos de aligerantes para losas:

1. **Ladrillo**: puede ser combinando tipos de ladrillos según sus dimensiones. (El ladrillo sencillo de 10x20x40 pesa 70N y el ladrillo de 20x15x40 pesa 100N).
2. **Fibra de Vidrio**: Este aligerante no permanece en la losa una vez construida y por eso es recuperable y reutilizable.
3. **Madera**: Se utiliza en casetones, cajones de madera que pueden quedar embebidos en la losa o pueden ser recuperables para reutilizar o no.
4. **Bloque de concreto**.
5. **Formaleta metálica removible**.

### 3.1.1 Cargas de diseño de losas.

Para el diseño se puede decir que las cargas actúan en forma uniformemente distribuida sobre la totalidad del panel, como una carga típica por m<sup>2</sup> de losa, la cual se utiliza para todos los paneles y en todos los pisos que contengan sección de losa típica.

Si se presentaran cargas concentradas grandes éstas requieren apoyos adicionales y deben ser consideradas por aparte de la carga distribuida. Para losas y cargas normales, las pequeñas cargas concentradas que se presenten, se

distribuyen automáticamente en toda la losa por medio del refuerzo en caso de losas en una dirección y por el efecto de trabajo en dos direcciones en losas bidireccionales.

Losa maciza: el peso propio se determina multiplicando el espesor por el peso específico del concreto.

Losa aligerada: se encuentra el peso por  $m^2$  de todos los elementos constitutivos.

Recordemos que la curva elástica es función de los momentos y los momentos a su vez son función de la carga, podemos concluir que la curvatura de una losa plantea la forma en que la carga se transmite a los apoyos, ya sea trabajando en una o dos direcciones.

Si los apoyos de la losa constituyen muros o vigas en dos lados opuestos, la curva elástica será en el sentido perpendicular a estos apoyos y por ende la carga viaja en este sentido.

Si se divide la losa en franjas de un metro de ancho en la misma dirección de los apoyos podemos verificar que la curva elástica de todas las franjas es igual, por lo tanto los momentos internos son iguales en todo el ancho de la losa e iguales al momento de diseño de esa franja de un metro de ancho. Este hecho permite simplificar el análisis y diseño ya que se puede diseñar una viga equivalente a una porción de losa de ancho igual a un metro y copiando este diseño en todo el ancho de la losa.

La franja de diseño trabaja como una viga independiente con una carga  $w$  igual a  $1m \cdot W$ , una altura  $h$  igual al espesor de la losa y un ancho igual a 1m.

En el caso de tener losas aligeradas también se puede considerar una franja de un metro de ancho y después se hace la proporción de cuantos nervios caben en ese

ancho, o considerar desde el principio el ancho equivalente que le toca a cada nervio.

Cuando se diseña un elemento se debe pensar en cuando deja de ser útil ese elemento. Se puede decir que deja de ser útil cuando falle por resistencia, o cuando se deforme demasiado, tanto que afecte psicológicamente a los usuarios y no les de la sensación de seguridad.

Cuando la falla es por deflexiones excesivas se dice que falló para condiciones de servicio, aunque no presenta una rotura visual ya no se puede usar y cuando la falla es por fractura real del elemento se dice que es para condiciones de resistencia.

Sin embargo la falla se puede presentar por flexión y por cortante. Se menciona una falla por flexión cuando los momentos se presentan en el sentido perpendicular a los apoyos por lo tanto el refuerzo principal va en ese sentido.

### ***3.2 Cálculo de las deformaciones***

La predicción de las deformaciones en elementos de concreto armado es difícil. Secciones con armadura no simétrica conducen a deformaciones por contracción del concreto que se deben sumar a las deformaciones debidas a cargas verticales. Además la fluencia lenta del concreto lleva a un aumento de las deformaciones para cargas permanentes de servicio. Las deformaciones debidas a contracción y fluencia a su vez son funciones de la temperatura, humedad, condiciones de curado, edad del concreto, etc. La disminución de la rigidez de flexión debido a la fisuración del concreto tiene también su efecto apreciable.

El control de deformaciones ante cargas gravitatorias para elementos de concreto armado está asociado con las cargas de servicio. Cuando deban considerarse también deformaciones que aparecen por el transcurso del tiempo, solamente la

carga permanente y aquella porción de carga accidental que actúa en forma permanente deben afectarse a deformaciones diferidas. El tipo de ocupación o uso determinará qué porción de la carga accidental debe considerarse. Por ejemplo, en el caso de edificios de departamentos tal vez sólo el 20% o 25 % de la carga accidental deba tomarse como carga sostenida. En un edificio destinado a depósito, tal vez el 80% o 100 % de carga accidental deba considerarse como participante en contribuir a deformaciones diferidas.

### **3.3 Deformación Instantánea.**

Para el cálculo de la deformación inmediata bajo cargas de servicio se puede utilizar la teoría elástica. El problema radica en que se debe hacer una estimación adecuada de los factores que intervienen en la rigidez a flexión, es decir del factor:

$$(EI) = M / \varphi \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

E = módulo de Elasticidad Longitudinal.

I = momento de Inercia.

M = Momento flector

$\varphi$  = Curvatura de la sección.

Para el módulo de Elasticidad del concreto se puede adoptar esta expresión:

$$E_c = 15100 * \sqrt{f'_c} \quad \text{Ecuación 2}$$

$E_c$  = módulo del concreto dado en Kg/cm<sup>2</sup>

$f'_c$  = resistencia a compresión del concreto en Kg/cm<sup>2</sup>

Para el momento de Inercia Efectivo,  $I_e$ , de la sección fisurada se recomienda esta expresión:

$$I_e = (M_{cr}/M_a)^3 * I_g + [1 - (M_{cr}/M_a)^3] * I_{cr} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$M_{cr} = f_r * I_g / y_t \quad \text{Ecuación 4}$$

Y para concreto de peso normal:

$$f_r = 2 * \sqrt{f'_c} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

$M_{cr}$  = Momento de agrietamiento

$M_a$  = Máximo momento en el miembro para el estado de cargas para el cual se calculan las deformaciones

$I_g$  = Momento de Inercia de la sección no fisurada.

$I_{cr}$  = Momento de Inercia de la sección fisurada.

El valor del momento de inercia para sección fisurada se puede encontrar a partir de estas expresiones:

$$(EI)_{cr} = M_y / \phi_y \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

$(EI)_{cr}$  = módulo de rigidez a flexión de la sección agrietada.

$M_y$  = Momento de Fluencia de la sección de concreto armado

$\phi_y$  = Curvatura de Fluencia

De donde entonces:

$$I_{cr} = M_y / E_c \phi_y \quad \text{Ecuación 7}$$

O bien:

$$I_{cr} = M_a k_d / f_c \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

$k_d$  = profundidad del eje neutro

$f_c$  = esfuerzo de compresión en la fibra extrema para el valor de  $M_a$ .

### **3.4 Deformación Diferida.**

La deformación de elementos de concreto armado se incrementa con el tiempo. Las deformaciones adicionales a la instantánea son causadas por la contracción y flexión del concreto. La deformación diferida debe tenerse en cuenta pues en ciertas circunstancias puede alcanzar valores de 2 a 3 veces el que corresponde a deformación instantánea.

La contracción del concreto en secciones no armadas simétricamente causa una distribución no uniforme de deformaciones en la sección la cual resulta en una curvatura de contracción. La curvatura es mayor en elementos de concreto con armadura simple, debido a que la contracción del concreto no es impedida en la zona de compresión. En miembros a flexión la armadura mayor está en la zona de tracción.

Por lo tanto la curvatura de contracción tendrá el mismo signo que las curvaturas provocadas por cargas transversales (gravitatorias, por ejemplo). Además, esas tensiones de tracción inducidas por contracción más las inducidas por cargas incrementa la fisuración del concreto en tracción. La deformación lenta del concreto resulta además en un acortamiento de la parte comprimida, por lo tanto causa una curvatura adicional.

Es evidente que las deformaciones adicionales debidas a contracción y fluencia se pueden reducir en forma substancial con la presencia de armadura de compresión. En el caso de igual armadura superior e inferior, la curvatura por contracción sería nula. La armadura de compresión también reduce la deformación de fluencia debido a que mientras las deformaciones de compresión aumentan con el tiempo, parte de las tensiones de compresión inducidas son gradualmente transferidas al acero. Además del contenido y distribución de acero, las deformaciones del concreto con el tiempo dependen de condiciones de humedad, temperaturas, curado, edad del concreto, relación tensión a resistencia, y otros factores más.

### 3.5 Límites De Flecha. Criterio Del ACI-318-05.

<i>tipo de elemento</i>	<i>deformación considerada</i>	<i>límite admitido</i>
Sistema de entrepiso o azotea que soporte o esté ligado a elementos no estructurales susceptibles de sufrir daños por grandes deformaciones.	Deformación instantánea más deformación diferida.	l / 480
Sistema de entrepiso o azotea que soporte o esté ligado a elementos no estructurales susceptibles de sufrir daños por grandes deformaciones.	Deformación instantánea más deformación diferida.	l / 240

### 3.6 Diseño de Losas Compuestas

El criterio de diseño de losas compuestas ha sido formulado utilizando conceptos similares al diseño por resistencia utilizado en concreto reforzado como los sugeridos por el Comité ACI 318-05. Sin embargo se presentan algunas diferencias que se listan a continuación.

El procedimiento de ensayo desarrollado por la Universidad del Estado de Iowa a numerosas probetas, indican que el modo de falla por adherencia a corte es uno de los más comunes en las losas tipo metal deck (Porter 1976).

El modo de falla por adherencia a corte es caracterizado por la formación de una grieta a tensión diagonal en el concreto o en un punto muy cerca de los puntos de aplicación de las cargas, seguido por una pérdida de adherencia entre el concreto y la lámina de acero. Estos resultados del deslizamiento entre el concreto y la lámina colaborante son observables al final del claro de la losa. Este deslizamiento o corrimiento causa una pérdida de la acción compuesta de ambos materiales sobre el claro de la viga que se esté analizando, generalmente tomado como claro o longitud de corte ( $L'$ ). Físicamente, el claro por corte es la región entre las reacciones y la carga concentrada. Ver figura 1.

El corrimiento usualmente ocurre al tiempo que se esta aplicando la carga de falla, denominada como  $V_e$ , y es seguido por una reducción significativa en la carga aplicada (si se utiliza un sistema hidráulico de aplicación de cargas). La figura 2 indica la falla por adherencia a corte mostrando el agrietamiento y el deslizamiento al final del claro asociado al mismo. Este deslizamiento que ocurre que en unos de los extremos de los especímenes de prueba es acompañado por un incremento notable en las deflexiones y la presencia del “creep”.

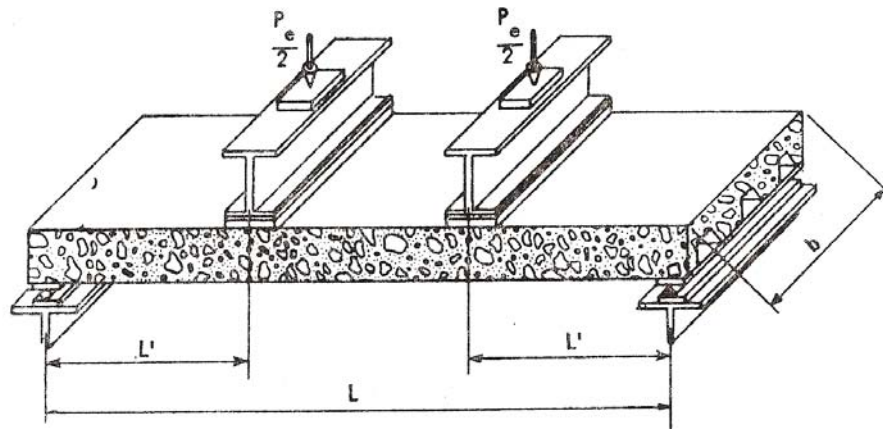
El propósito de la prueba desarrollada por la Universidad de Iowa, es brindar los parámetros de diseño necesario para la formulación de las ecuaciones de diseño por resistencia última. En particular se necesita una serie de pruebas para establecer mediante criterios de análisis de regresión lineal los parámetros pertinentes que afectan la capacidad por adherencia a corte. En caso de presentarse una falla por flexión, las pruebas deben ser desarrolladas para verificar, si es posible el análisis.

La figura 1 muestra el arreglo típico del ensayo de losas en una dirección. Y las variables que afectan el comportamiento del mismo son:

- Tipo de elaboración de la lámina colaborante (metal deck).
- Largo de corte ( $L'$ )



- Propiedades del Concreto: Edad, resistencia a compresión ( $f'c$ ), diseño de la mezcla, tipo de concreto (ligero, normal), tipo y tamaño máximo de agregado.
- Propiedades de la lámina, incluyendo la sección transversal  $A_s$ , espesor, peralte, momento de inercia, esfuerzo de fluencia y módulo de elasticidad.
- Carga Muerta
- Carga última aplicada, y el cortante último asociado ( $V_e$ ).
- Tipo de Falla
- Dimensiones del espécimen, incluyendo el ancho ( $b$ ), Longitud ( $L$ )
- Espaciamiento de los mecanismos de transferencia por corte
- Deflexión y comportamiento al corrimiento o deslizamiento de la lámina en el concreto.



**Figura 3.1. Arreglo típico para el ensayo de losas en una sola dirección.**  
 Para cada espécimen cuyo modo de falla fue el de corte se procede a graficar los siguientes parámetros. En la ordenada se grafica:

$$\frac{V_e s}{bd\sqrt{f'c}}$$

Y en la abscisa:

$$\frac{\rho d}{L' \sqrt{f'c}}$$

Con el análisis de regresión lineal se determina la pendiente “m” y donde esta línea corta el eje vertical, se obtiene el valor de “k”, de manera que se pueda formular la ecuación que señala la capacidad esperada a corte:

$$\frac{V_u s}{bd \sqrt{f'c}} = \frac{m \rho d}{L' \sqrt{f'c}} + k \tag{Ecuación 9}$$

De la expresión anterior, la capacidad última a corte es definida como Vu; ρ es la cuantía del refuerzo (As / b d); d es la distancia de la fibra a compresión al centroide de la sección transversal de la losa y los demás parámetros fueron descritos anteriormente.

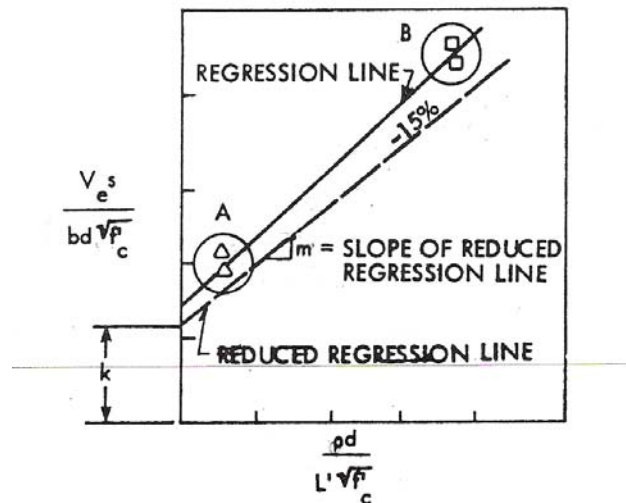


Figura 3.2. Relaciones de falla de adherencia por corte para anchos de refuerzo constantes

El desarrollo de la ecuación 9 está basado en los resultados de 151 pruebas efectuadas en la industria y 304 pruebas dirigidas por la Universidad del Estado de Iowa. Esta ecuación es similar a la ecuación 11-5 del Reglamento para Concreto estructural (ACI 318S-05) del Instituto Americano del Concreto (ACI).

En la figura 3.2 se indica una segunda línea de regresión reducida. Esta línea se obtiene reduciendo la pendiente e interceptando la línea de regresión inicial en un 15%. El propósito de esta reducción es para tomar en cuenta la cantidad de pruebas insuficientes y las variaciones que ocurren en los resultados debido a los cambios en el perfil de acero, los espaciamientos de los dispositivos de corta y en el tamaño de los especímenes. Para el diseño, la “m” y la “k” en la ecuación puede ser obtenida de la línea de regresión reducida.

El término “s” en la ecuación 9 toma en cuenta el espaciamiento de los dispositivos de transferencia y es tomado como la unidad (1) para los casos en que el dispositivo de transferencia está colocado a un espaciamiento constante para todas las secciones del mismo tipo de perfil donde la acción compuesta está provista entre el perfil y la superficie de contacto.

Cabe destacar que la ecuación 9 no se ha verificado para losas donde el espaciamiento de los dispositivos de corte varía a lo largo de la longitud de la losa.

Finalmente ya calculando los parámetros de diseño, “m” y “k” se obtiene la expresión para el cálculo de  $V_u$ :

$$V_u = \frac{bd}{s} \left( \frac{m\rho d}{L'} + k\sqrt{f'c} \right) \quad \text{Ecuación 10}$$

De esta manera obtenemos una expresión para estimar el cortante último de losas compuestas utilizando las propiedades de la sección transversal y los parámetros de aproximación.

### **3.7 Esfuerzos de Adherencia**

La adherencia entre el concreto estructural y el refuerzo es el fenómeno básico sobre el que descansa el funcionamiento del concreto armado como material estructural. Si no existiese adherencia, el refuerzo ya sea en barras o en tiras serían incapaces de tomar el menor esfuerzo de tracción, ya que los mismos se deslizarían sin encontrar resistencia en toda su longitud y no acompañaría al concreto en sus deformaciones, con lo que, al figurarse éste, sobrevendría bruscamente la rotura. Por el contrario gracias a la adherencia son capaces las armaduras de trabajar, inicialmente, a la vez que el concreto; después, cuando éste se fisura, lo hace de forma más o menos regularmente distribuida a lo largo de la pieza, en virtud de la adherencia; y la adherencia permite que en casos como el acero tome los esfuerzos de tracción, manteniendo la unión entre los dos materiales en las zonas entre fisuras.

La adherencia cumple fundamentalmente dos objetivos: asegurar el anclaje de las barras y transmitir las tensiones tangentes periféricas que aparecen en la armadura principal como consecuencia de las variaciones de su tensión longitudinal. El fenómeno de adherencia está originado por dos tipos de causas, unas de naturaleza física (o físico-química) y otras de naturaleza mecánica.

Las primeras provocan la adhesión del refuerzo con el concreto, a través de fuerzas capilares y moleculares desarrolladas en la interfaz; es como si el refuerzo absorbiese pasta cementante, ayudado por el efecto de la retracción.

Las segundas, muchos más importantes, están constituidas por la resistencia al deslizamiento debida a la penetración de pasta de cemento en las irregularidades de la superficie de las barras. Esta causa de origen mecánico, que puede denominarse “rozamiento”, es la que produce la mayor parte de la adherencia en las barras lisas (hoy día prácticamente en desuso) y varía apreciablemente con el estado de su superficie. En el caso de tener barras corrugadas, a este rozamiento

se añade el efecto de acuñamiento del concreto entre los resaltos, de primordial importancia.

En resumen, el mecanismo de la adherencia puede asignarse a tres causas: adhesión, rozamiento (tensiones tangentes en el concreto) y el acuñamiento (de las barras corrugadas). De estas tres causas, la adhesión queda anulada cuando el deslizamiento de la barra alcanza una cierta magnitud. Por su parte el rozamiento comienza a actuar cuando la tensión alcanza un cierto valor y a él se añade el acuñamiento, no siendo posible separar ambos efectos.

### **3.7.1 Limitaciones en el uso del bambú como refuerzo del concreto.**

Como refuerzo para el concreto, su utilización tropieza con la poca adherencia que el bambú desarrolla en la matriz. La variación volumétrica del material responsable por la aparición de fisuras longitudinales en el concreto reforzado con bambú provoca la disminución de su carga y empeora la adherencia entre el concreto y el bambú; tales fisuras aumentan cuando el porcentaje de bambú en la matriz de concreto es mayor del 4%. Varias medidas se han tomado con el fin de superar esta dificultad natural del bambú, pero algunas han alcanzado mejores resultados que otras; no obstante, subsisten desventajas asociadas principalmente al hecho de que el bambú sufre alteraciones volumétricas al secarse o al humedecerse (González, 2000).

#### **3.7.1.1 La adherencia entre el bambú y el concreto**

Al ser incorporado a una pieza de concreto, funcionando como armadura de tracción, el bambú puede sufrir variaciones volumétricas durante el proceso de fraguado del concreto; en un primer momento, el bambú tiende a hincharse debido al humedecimiento provocado por el contacto con el concreto fresco; y posteriormente se invierte esa tendencia. El concreto, aún fraguando, pero ya endurecido, pasa a absorber el agua del bambú y éste tiende a secarse marchitándose. Varios trabajos han sido orientados con la intención de superar este problema. Gran parte de ellos han tenido como enfoque principal la disminución de las alteraciones volumétricas del bambú a través de un bloqueo del

paso del agua por este material, y se sugiere también el uso de tratamientos químicos sobre el bambú para hacerlo impermeable (Argollo et al, 1992).

### **3.7.1.2 Falta de adherencia en el concreto**

De las formas como hasta ahora se ha utilizado el bambú como refuerzo, la más recomendada ha sido el empleo de tablillas, debido a que éstas desarrollan mayor adherencia en el concreto que las cañas o bambúes completos, que tienen una superficie lisa y cerosa; sin embargo, en cualquiera de las formas en que sea empleado como refuerzo, al estar embebido en el concreto absorbe el agua de la mezcla, aumentando de volumen y posteriormente al secarse se contrae perdiendo la adherencia con el concreto (González, 2000).

En experimentos realizados por Hidalgo (1978), con secciones del tallo y con tablillas de guadua (*Bambusa guadua*) que se han dejado sumergidas en agua por espacio de ocho días, se ha observado que el diámetro de las secciones aumentan en un 2.5% en las primeras 24 horas y en un 5% al cabo de los ocho días. En las tablillas, el espesor de su pared aumenta en un 8% en 24 horas, y un 15% en los ocho días. Estos cambios de volumen se presentan en forma similar en todos los bambúes, siendo menos cuando mayor es su edad.

La mayor parte de los investigadores centraron sus experimentos en buscar una solución a este problema, coincidiendo, como es de lógica, que el bambú debe recubrirse con una sustancia impermeable con el fin de evitar que éste absorba el agua de la mezcla de concreto (HIDALGO, 1978; GONZALEZ, 2000).

### **3.7.1.3 Tratamientos para aumentar la adherencia**

Algunos tratamientos que se recomiendan, tanto para impermeabilizar el refuerzo como para aumentar su adherencia, son los siguientes (citados por Hidalgo, 1978):

- Glenn, 1944, recomendó recubrir las tablillas de refuerzo con una capa muy delgada de emulsión asfáltica como impermeabilizante; este tratamiento tiene el peligro de que el usuario aplique una mayor cantidad de emulsión,

obteniéndose un efecto contrario por lubricación de refuerzo, perdiendo éste totalmente su adherencia. También se ha sugerido el uso de pinturas y barnices, que además de costosos corren el mismo peligro en su aplicación.

- Kowalski, 1974, recomendó usar como refuerzo principal medios tallos, es decir, dividiéndolos longitudinalmente en dos partes, los cuales deben secarse previamente hasta un contenido de humedad del 20%, después, sus extremos, en una longitud de 25 cm se impregnan con un adhesivo, ya sea una resina poliésterica o epóxica, sobre la cual se rocía arena fina o polvo fino de sílice para lograr mayor adherencia. Posteriormente, la parte restante se sumerge por espacio de cuatro días en una mezcla 1:1 de aceite de linaza y trementina, teniendo el cuidado de no sumergir los extremos ya tratados.
- Palma, 1976, recomendó un tratamiento por inmersión del refuerzo de bambú en una solución al 2% de cloruro de zinc, o el recubrimiento del mismo con un adhesivo de neopreno sobre el cual se rocía arena gruesa con el fin de lograr mayor adherencia; este tipo de adhesivo no se consigue fácilmente en el mercado y su costo es muy elevado.
- Fang, 1976, recomendó un tratamiento de azufre y arena para recubrir cañas de bambú que se utilicen como refuerzo; el proceso seguido en sus experimentos es el siguiente: se perforan parcialmente los tabiques de los nudos, luego se remueve la cutícula o parte brillante del bambú con un chorro de arena a presión, después de lo cual se envuelve con alambre en azufre derretido a una temperatura de 50 °C.

La desventaja que presentan estos tratamientos son los altos costos y la complejidad de los procesos, lo que hace que no sean tan eficientes en su implementación.

## Capítulo IV.

### Caracterización Mecánica de la Guadua Angustifolia.

#### ***4.1 Introducción***

Antes de proceder con la modelación y construcción de los modelos de losas experimentales se procedió a evaluar las propiedades físicas y mecánicas de la Guadua Angustifolia, esto debido a que éstas se ven influenciadas por la calidad de sitio y el método de preservación de los mismos.

En el presente capítulo se presenta las pruebas de caracterización mecánicas que se realizaron durante la investigación en los laboratorios del Centro de Diseño y Construcción del ITESM, así como también los resultados de estas pruebas. Las pruebas realizadas fueron: contenido de humedad, resistencia a compresión, resistencia a tensión, resistencia a corte y flexión para determinar el módulo de elasticidad.

Luego se procedió a establecer una comparativa de resultados de los datos obtenidos en nuestras pruebas con los resultados obtenidos de otros laboratorios a nivel mundial, donde también se ha caracterizado el bambú en su especie: Guadua Angustifolia, de igual forma comparamos los datos con los resultados obtenidos en los Laboratorios del Centro de Diseño y Construcción del ITESM de estudios anteriores sobre esta misma especie.

#### ***4.2 Normativas para la Caracterización Mecánica del Bambú***

En muchos países donde se trabaja con la especie de bambú, Guadua Angustifolia se hacen intentos de recabar información de sus propiedades mecánicas, cada laboratorio se ha dedicado a desarrollar formas y métodos muy diferentes, dependiendo de las facilidades con que se cuenten para hacer dichas pruebas conforme a los estándares y normativas internacionales, sin embargo la mayoría de estos estudios no se han publicado a la comunidad investigadora de una manera adecuada.



Las normativas en cuanto a la caracterización de la Guadua Angustifolia tomaron un carácter más formal a partir del año 2004 cuando la Organización Internacional para la Estandarización o ISO (en inglés, International Organization for Standardization), aprobaron las Normas ISO 22157-1 e ISO/TR 22157-2.

Sin embargo, es importante mencionar que el Manual de Laboratorio elaborado por Jules Janssen, sigue siendo guía válida para la realización de las pruebas físicas y mecánicas del bambú ya que las normas ISO citan este manual en sus referencias.

#### **4.2.1 Bamboo – Determination of physical and mechanical properties. ISO 22157-1:2004. Part I. Requirements**

Este documento fue originalmente preparado y presentado por el INBAR, por sus siglas en inglés (International Network for Bamboo and Rattan), la cual es un organismo internacional con sede en Pekín. El objetivo es darle al bambú el nivel de una asociación internacional reconocida y aceptada en la construcción e ingeniería de materiales. INBAR lo que se propone es estar a favor del bienestar de los grupos de ingresos más bajos en los países en desarrollo, y a favor de un mejor medio ambiente en países donde se cultiva el bambú.

La discusión sobre la necesidad de una normal internacional en el bambú empezó alrededor del año 1988, pero no fue hasta el año 1997 cuando INBAR se convirtió en una agencia internacional que se obtuvieron los fondos necesarios para iniciar las investigaciones. Durante 1999, los resultados de diferentes reuniones a nivel mundial con representantes de países productores de bambú, fueron incorporados en documentos “borrador” y luego por aprobación de un comité técnico que trajo como resultado una mejora considerable de los textos y un acuerdo general para presentar los proyectos “borrador” a la norma ISO para el procedimiento formal.

Es debido a lo anterior que la norma ISO 22157 es la primera norma internacional sobre el bambú, y no cancela o reemplaza otros documentos

anteriores referentes al tema, ni los proyectos “borrador” preparados y distribuidos para la discusión interna de INBAR durante 1998 y 1999.

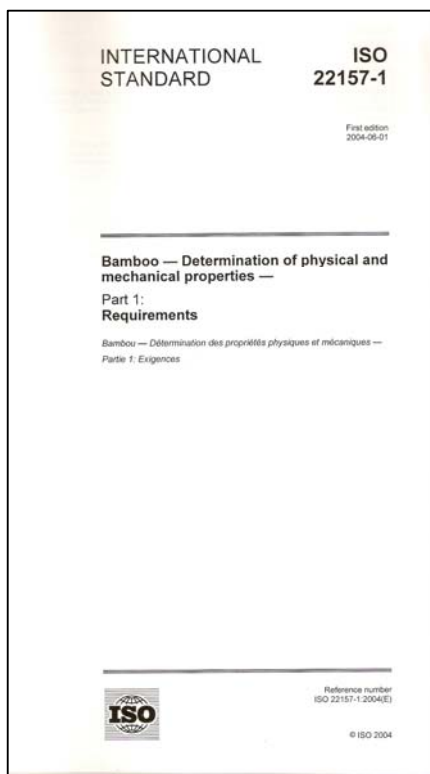


Figura 4.1. Portada de la Norma ISO 22157-1

#### 4.2.2 Bamboo – Determination of physical and mechanical properties. ISO/TR 22157-2:2004. Part II. Laboratory Manual.

En muchos laboratorios de los países que cultivan bambú, el personal de laboratorio es el encargado de realizar los ensayos sobre las propiedades del bambú. Si uno visita uno de estos laboratorios puede notarse la diligencia y ganas del personal para realizar su trabajo, sin embargo, en muchos casos las circunstancias bajo las cuales se realizan no son del todo fáciles. Por ejemplo, se pueden encontrar buenos métodos de trabajo e instrumentos, pero esa información permanece en el interior del laboratorio de origen, debido a la falta de intercambio de dichos conocimientos con otros laboratorios.

Uno de los propósitos de este informe técnico es hacer público los métodos para la realización de las pruebas mecánicas y físicas del bambú y dar un

punto de vista práctico de "cómo hacerlo", es decir, una explicación sobre cómo llevar a cabo las pruebas de acuerdo a la norma ISO 22157-1.

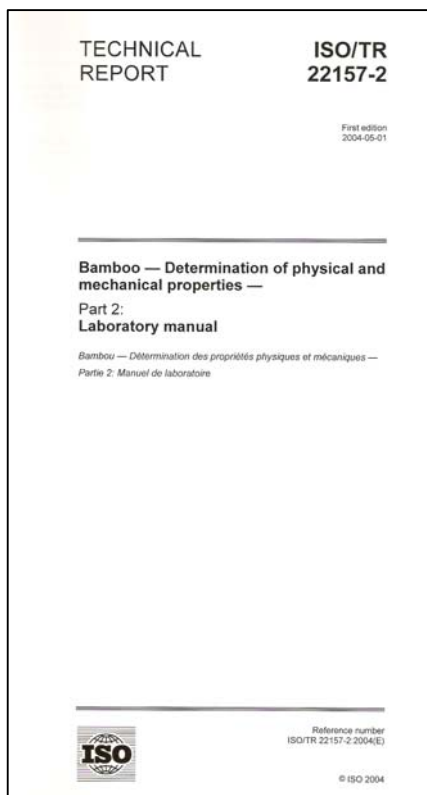


Figura 4.2. Portada de la Norma ISO 22157-2

### ***4.3 Estándares para la Determinación de las Propiedades Mecánicas de la Guadua Angustifolia, Pruebas y Resultados.***

Las pruebas que se realizaron fueron: la determinación del contenido de humedad, resistencia a la compresión paralela a la fibra, pruebas de flexión, resistencia al corte paralelo a la fibra y resistencia a la tensión paralela a la fibra. La normativa que se siguió fue la dada por las normas ISO 22157-1 e ISO 22157-2.

#### **4.3.1 Determinación del Contenido de Humedad**

El objetivo de la prueba es la determinación de la pérdida de peso como un porcentaje después del secado a peso constante de un elemento de prueba. El espécimen de prueba se debe de obtener inmediatamente después de cada prueba mecánica que se realice. Se recomienda que la forma de las probetas

sea de un prisma rectangular, aproximadamente de 2.5 cm. de ancho, 2.5 cm. de alto y espesor de pared nominal; deberán tomarse cerca del lugar de falla y puestas bajo condiciones que permitan asegurar que el contenido de humedad no se vea alterado, por ejemplo: empleando matraces de vidrio, aunque éstos son necesarios sólo en caso de que las piezas no sean puestas en la balanza inmediatamente o si se dejan fuera del horno por algún tiempo.

Luego de tener la probeta, esta se debe colocar en un horno a temperatura de  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  durante 24 horas. Las probetas deben pesarse inmediatamente después de sacarlas del horno.

El contenido de humedad de cada pieza deberá calcularse de acuerdo a:

$$MC = \frac{m - m_o}{m_o} \times 100 \quad \text{Ecuación 11}$$

En la cual:

**MC** es el contenido de humedad de la pieza (en porcentaje)

**m** es el peso de la probeta de prueba antes del secado (peso húmedo), en gramos

**m<sub>o</sub>** el mismo peso de la probeta después del secado (peso seco), en gramos.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación expresados en porcentaje de humedad. Cabe destacar que al realizar una primera prueba se detectó un contenido de humedad elevado respecto al promedio general y se procedió a una segunda evaluación del mismo.



Foto 4.1. Pesaje de las muestras, una vez realizado el ensayo a compresión. (Peso Húmedo)



Foto 4.2. Colocación de las muestras en el horno durante 24 horas, a 103 °C

**Tabla 4.2. Resultados del Contenido de Humedad (%)***Prueba 1**Día: 6 de Octubre de 2008**Hora: 2:30 p.m.**Humedad Ambiental: 65%<sup>1</sup>*

Tipo	Probeta	Peso Inicial (gr.)	Peso Seco (gr.)	Contenido de Humedad (MC %)
A	COM 1	143.10	109.70	30.45
A	COM 2	161.60	115.80	39.55
A	COM 3	140.80	107.10	31.47
A	COM 4	148.20	111.50	32.91
B	COM 5	122.50	92.80	32.00
B	COM 6	127.20	95.60	33.05
B	COM 7	114.20	89.40	27.74
B	COM 8	119.00	91.80	29.63
C	COM 9	64.20	56.40	13.83
C	COM 10	65.50	57.50	13.91
C	COM 11	69.10	60.70	13.84
C	COM 12	73.10	64.30	13.69
Contenido de Humedad Promedio (%)				26.0

*Prueba 2**Día: 11 de Noviembre de 2008**Hora: 2:30 p.m.**Humedad Ambiental: 33%<sup>2</sup>*

Tipo	Probeta	Peso Inicial (gr.)	Peso Seco (gr.)	Contenido de Humedad (MC %)
A	COM 1	69.50	62.80	10.67
A	COM 2	78.10	70.10	11.41
A	COM 3	69.10	60.70	13.84

<sup>1</sup> Reporte Meteorológico [www.weatherchannel.com](http://www.weatherchannel.com), para la fecha señalada.

<sup>2</sup> Referencia Reporte Meteorológico [www.weatherchannel.com](http://www.weatherchannel.com), para la fecha señalada.

A	COM 4	66.10	59.50	11.09
B	COM 5	71.00	64.00	10.94
B	COM 6	99.80	89.50	11.51
B	COM 7	102.60	92.30	11.16
B	COM 8	86.40	77.40	11.63
C	COM 9	100.00	90.90	10.01
C	COM 10	106.80	96.10	11.13
C	COM 11	111.50	100.50	10.95
C	COM 12	120.00	107.30	11.84
			Contenido de Humedad Promedio (%)	11.3

De lo anterior podemos observar una notable variación en los resultados obtenidos del contenido de humedad, a pesar que las muestras fueron tomadas del mismo lote pero en fechas diferentes. Esta diferencia en el porcentaje de humedad de ambas pruebas puede deberse a las condiciones ambientales presentes al momento de realizar la prueba, ya que el lote de bambú estuvo expuesto a mucha humedad debido a las lluvias que se presentaron en los días cercanos a la prueba.

Según podemos notar más adelante, esta humedad presente en la primera prueba afectó las propiedades de resistencia del bambú en compresión al presentar menos resistencia que las muestras ensayadas el día de prueba 2.

#### 4.3.2 Determinación de la Compresión Paralela a la Fibra

El objetivo de la prueba de compresión es la determinación del esfuerzo último de compresión de los especímenes provenientes de troncos de bambú; así como también la obtención de la gráfica esfuerzo-deformación unitaria de las probetas. Los especímenes de prueba deben de tener altura de entre 1 y 2 veces el diámetro del tronco para evitar efectos secundarios como el pandeo y deben de ser sacados de los entrenudos. La figura 3 presenta un esquema de la máquina de compresión utilizada para la prueba.

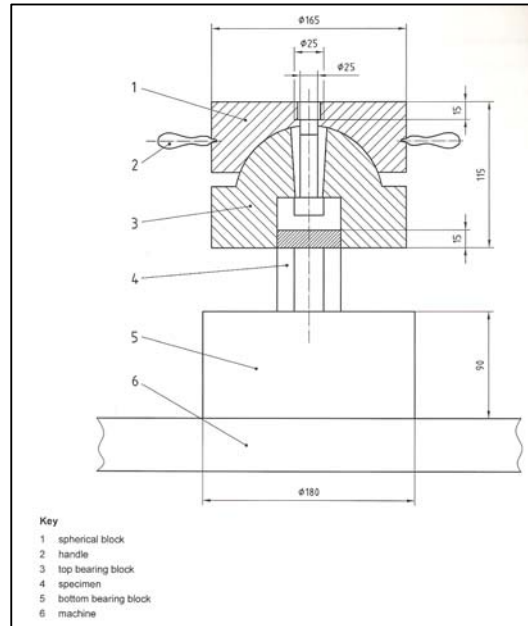


Figura 4.3. Esquema para ensayo a compresión

Los ensayos a compresión se llevaron a cabo en los laboratorios del ITESM y se realizaron en una máquina universal de pruebas en la que se controla la prueba, a una velocidad constante de carga a **0.01 mm/seg**. La máquina de prueba proporciona el movimiento o ajuste necesario de su cabezal superior antes de comenzar la aplicación de la carga para uniformizar el área de contacto.

Los especímenes se centran sobre los platos de acero de las prensas, posteriormente se aplica carga a velocidad constante hasta su fractura. La falla esperada en general, es por aplastamiento y deformaciones relacionadas con el mismo fenómeno de compresión por ejemplo, corte longitudinal en las fibras por la expansión que provoca la compresión inducida (Foto 3).

Los valores de esfuerzos máximos, se calculan como la relación de la fuerza máxima aplicada al área de la sección transversal:

$$\sigma_{ult} = \frac{F_{ult}}{A} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde el área de la sección transversal se calcula de la siguiente forma:



$$A = \frac{\pi}{4} \times [D^2 - (D - 2t)^2]$$

Ecuación 13

**D** es la medida del diámetro exterior, en cm.

**t** es el espesor de la pared del bambú, en cm.



Foto 4.3. Ensayo a Compresión, en la máquina universal.



Foto 4.4. Muestras de bambú después del ensayo a compresión

A continuación se muestra la tabla 2 con el resumen de los resultados obtenidos del esfuerzo último a compresión ( $\sigma_{ult}$ ) a partir de la fuerza última ( $F_{ult}$ ) que se generó durante la realización de las pruebas en laboratorio.

**Tabla 4.2. Resultados de la prueba a Compresión paralela a la fibra.**

Prueba 1

Día: 11 de Octubre de 2008

Hora: 2:30 p.m.

Contenido de Humedad promedio: 26%

Humedad Ambiental: 65%

Probeta	Tipo	$D_{ext}$	$t$	Área ( $cm^2$ )	$F_{ult}$		$\sigma_{ult}$ ( $Kg./cm^2$ )
		( $cm$ )	( $cm$ )		(Ton)	(Kg.)	
COM 1	A	7.62	1.40	27.36	8.960	8960.00	327
COM 2	A	7.62	1.50	28.84	9.934	9934.00	344
COM 3	A	7.62	1.40	27.36	8.603	8603.00	314
COM 4	A	7.62	1.60	30.26	9.244	9244.00	305
COM 5	B	7.62	0.90	19.00	7.564	7564.04	398
COM 6	B	7.62	1.40	27.36	8.060	8060.00	295
COM 7	B	7.62	1.40	27.36	7.691	7691.00	281
COM 8	B	7.62	1.40	27.36	7.456	7456.00	272
COM 9	C	6.35	1.50	22.86	5.228	5228.00	229
COM 10	C	6.35	1.50	22.86	6.003	6003.00	263
COM 11	C	6.35	1.50	22.86	6.174	6174.00	270
<b>Esfuerzo a Compresión promedio =</b>							<b>300</b>

Prueba 2

Día: 11 de noviembre de 2008

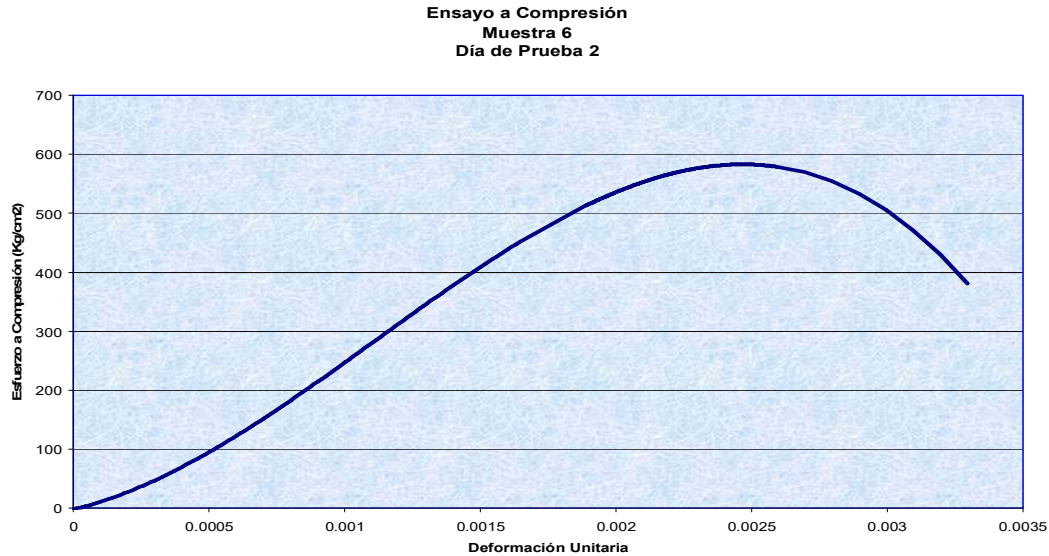
Hora: 2:30 p.m.

Contenido de Humedad promedio: 11%

Humedad Ambiental: 33%

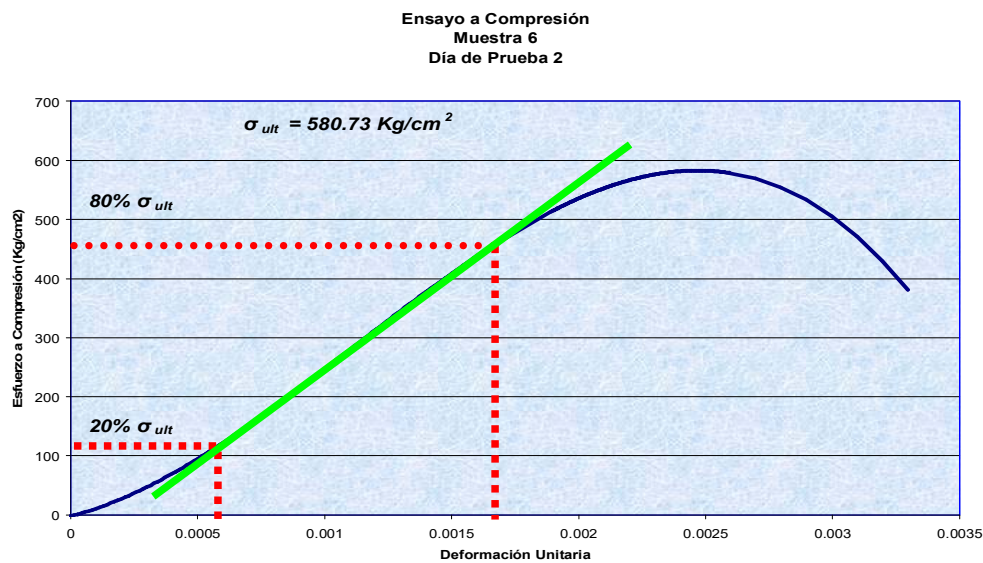
Probeta	Tipo	$D_{ext}$ (cm)	$t$ (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	$F_{ult}$		$\sigma_{ult}$ (Kg./cm <sup>2</sup> )
					(Ton)	(Kg.)	
COM 1	A	7.620	0.64	13.93	9.224	9224.00	662
COM 2	A	7.620	0.79	17.02	8.965	8965.00	527
COM 3	A	7.620	0.64	13.93	9.445	9445.00	678
COM 4	A	7.620	0.64	13.93	8.891	8891.00	638
COM 5	B	7.620	0.79	17.02	8.666	8666.00	509
COM 6	B	7.938	0.64	14.57	8.460	8460.00	581
COM 7	B	7.938	0.95	20.90	7.691	7691.00	368
COM 8	B	8.255	0.79	18.61	7.456	7456.00	401
COM 9	C	7.938	0.95	20.90	6.998	6998.00	335
COM 10	C	8.255	0.95	21.85	6.990	6989.74	320
COM 11	C	8.255	0.95	21.85	6.75	6750.00	309
<b>Esfuerzo a Compresión promedio =</b>							<b>484</b>

Se tomaron como resultados confiables los obtenidos del día de prueba 2, ya que los valores de la resistencia a compresión obtenidos durante este ensayo muestran estar dentro del rango promedio aceptable, comparativamente con estudios similares de caracterización de la guadua Angustifolia.



**Gráfica 4.1. Curva Esfuerzo a compresión – Deformación Unitaria de la probeta 6.**

Con base en los gráficos esfuerzos – deformación, obtenidos a partir de los datos de las pruebas realizadas y siguiendo el procedimiento establecido en ISO 22157-1:2004(E), se obtuvo el módulo de elasticidad del material a compresión. El procedimiento utilizado consistió en encontrar la relación lineal entre el esfuerzo y la deformación unitaria comprendida en los puntos cuyos valores señalan el 20% del esfuerzo de compresión último y el valor del 80% del esfuerzo último a compresión. La siguiente gráfica muestra el procedimiento anteriormente descrito.



**Gráfica 4.2. Procedimiento para el cálculo del módulo de elasticidad a compresión del bambú según ISO 22157-1:2004 (E)**

La tabla 3, muestra el valor calculada del módulo de elasticidad para cada muestra. Cabe destacar que se utilizaron los resultados obtenidos del día de prueba 2, ya que éstos presentaron el menor porcentaje de contenido de humedad.

**Tabla 4.3. Módulo de Elasticidad a compresión**

<i>Probeta</i>	<i>Tipo</i>	$\sigma_{ult}$ (Kg./cm <sup>2</sup> )	20% $\sigma_{ult}$ (Kg./cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_{ult}$ asociado	80% $\sigma_{ult}$ (Kg./cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_{ult}$ asociado	<i>Módulo de Elasticidad a compresión</i> (Kg./cm <sup>2</sup> )
COM 1	A	661.956	132.391	0.00047	529.565	0.00166	<b>334510</b>
COM 2	A	526.665	105.333	0.00050	421.332	0.00144	<b>338881</b>
COM 3	A	677.816	135.563	0.00066	542.253	0.00183	<b>348497</b>
COM 4	A	638.059	127.612	0.00059	510.447	0.00180	<b>317081</b>
COM 5	B	509.100	101.820	0.00044	407.280	0.00141	<b>314815</b>
COM 6	B	580.731	116.146	0.00054	464.585	0.00170	<b>301939</b>
COM 7	B	367.961	73.592	0.00065	294.369	0.00136	<b>310817</b>
COM 8	B	400.738	80.148	0.00059	320.591	0.00131	<b>330751</b>
COM 9	C	334.806	66.961	0.00041	267.844	0.00105	<b>315874</b>
COM 10	C	319.871	63.974	0.00041	255.897	0.00098	<b>336643</b>
COM 11	C	308.900	61.780	0.00053	247.120	0.00111	<b>319216</b>
<b>Módulo de Elasticidad promedio =</b>							<b>324457</b>

De la tabla anterior podemos establecer una relación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión del bambú, tal como se muestra a continuación:

**Tabla 4.4. Relación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión del bambú.**

<i>Probeta</i>	$E / \sqrt{f'b}$
COM 1	13002
COM 2	14767
COM 3	13386
COM 4	12553
COM 5	13953
COM 6	12529
COM 7	16203
COM 8	16522
COM 9	17263
COM 10	18823
COM 11	18163
<b>Promedio =</b>	<b>15196.60</b>

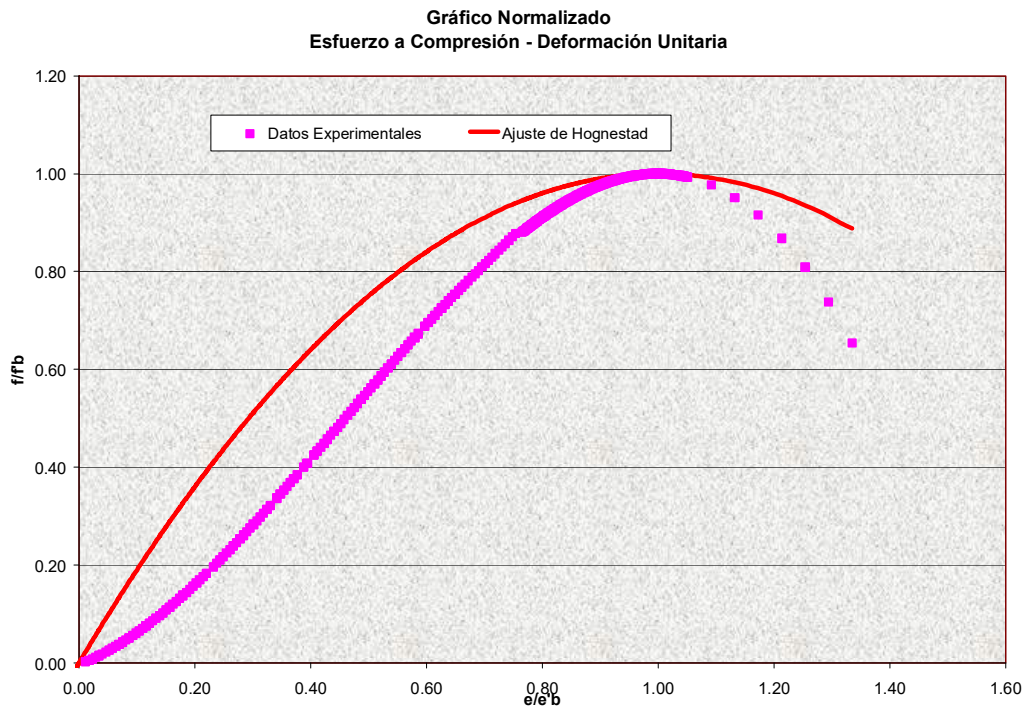
De lo anterior podemos proponer la siguiente expresión:

$$E_b = 15197 \sqrt{f'_b} \quad \text{Ecuación 14}$$

Tomando los resultados obtenidos de la prueba a compresión de todas las muestras de bambú (con porcentaje de humedad del 11%), se procedió a normalizar los valores de esfuerzo y deformación respecto al valor máximo obtenidos de cada una de las pruebas con su correspondiente valor de deformación unitaria y establecimos una relación entre ambas variables de forma general utilizando una variación de la ecuación esfuerzo deformación del concreto desarrollada por Hognestad.

$$f_c = f'_c \left[ 2 \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon'_c} \right) - \left( \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon'_c} \right)^2 \right] \quad \text{Ecuación 15}$$

Primeramente, se ajustaron los datos normalizados obtenidos experimentalmente a la ecuación de Hognestad, dando como resultado un ajuste poco aceptable para el mismo.

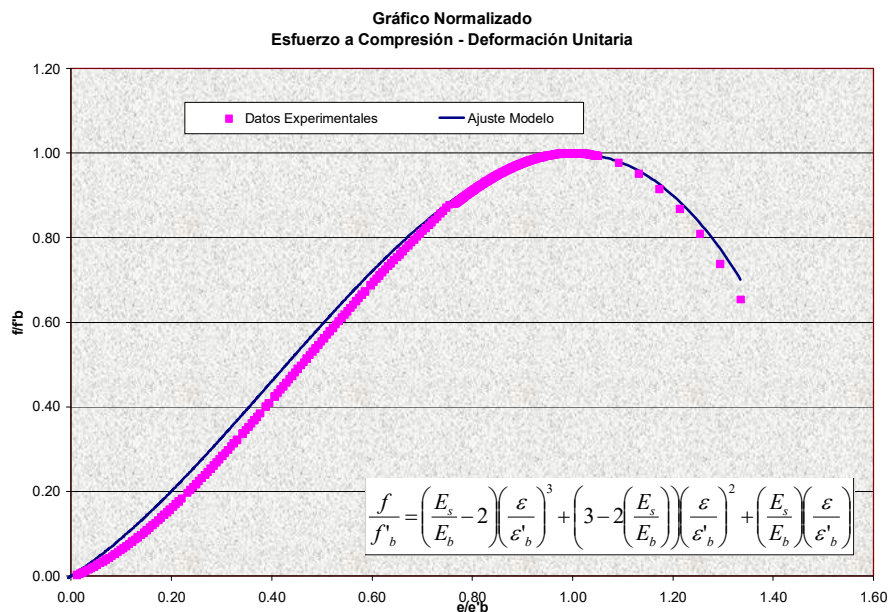


Se planteó una ecuación general para obtener las constantes de ajuste del modelo de predicción tomando en consideración las siguientes condiciones de frontera.

$$\frac{f}{f'_b} = A \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon'_b} \right)^3 + B \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon'_b} \right)^2 + C \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon'_b} \right) + D$$

Para	El valor de $\left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon'_b} \right)$ es:
$\frac{f}{f'_b} = 0$	$\left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon'_b} \right) = 0$
$\frac{f}{f'_b} = 1$	$\left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon'_b} \right) = 1$
$\frac{df}{df'_b} = E_s / E_b$	$\left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon'_b} \right) = 0$
$\frac{df}{df'_b} = 0$	$\left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon'_b} \right) = 1$

Una vez obtenidos las constantes de la ecuación general planteada, se compararon los resultados obtenidos con los experimentales, obteniendo los siguientes resultados:



**Gráfica 4.3. Gráfico Normalizado Esfuerzo – Deformación unitaria del Bambú y Gráfico de ajuste.**

El modelo ajuste propuesto es:

$$\frac{f}{f'_b} = \left( \frac{E_s}{E_b} - 2 \right) \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon'_b} \right)^3 + \left( 3 - 2 \left( \frac{E_s}{E_b} \right) \right) \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon'_b} \right)^2 + \left( \frac{E_s}{E_b} \right) \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon'_b} \right)$$

**Ecuación 16. Modelo de Ajuste desarrollado para la caracterización del esfuerzo a compresión del bambú.**

### 4.3.3 Pruebas a Flexión

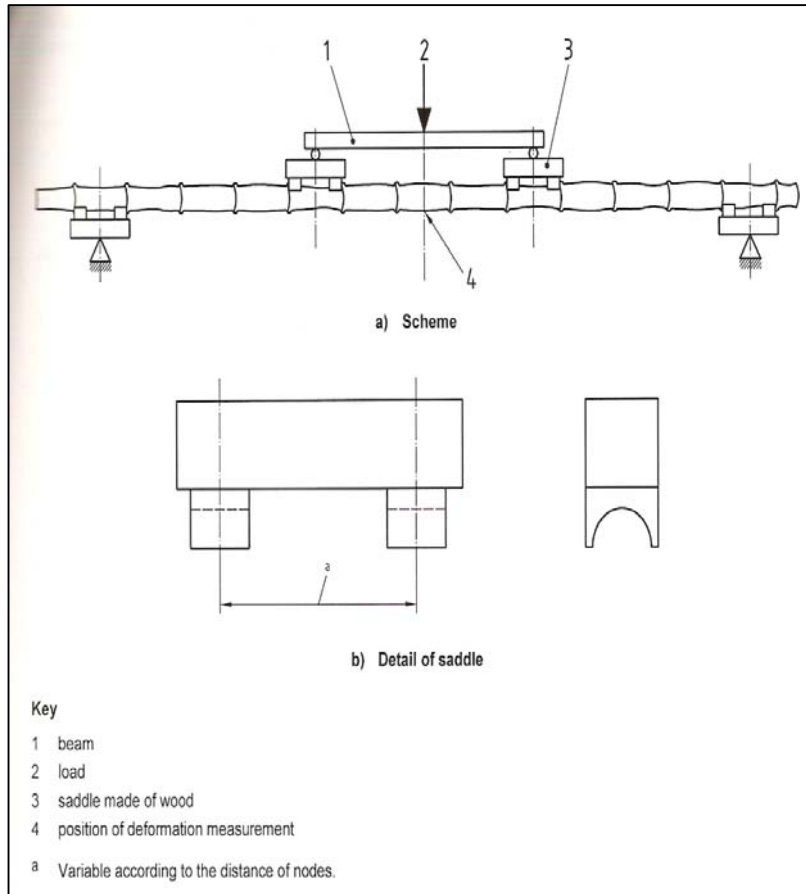
El objetivo de la prueba de flexión, es determinar la capacidad a flexión del bambú con pruebas de 4 puntos, la obtención de la curva carga-deflexión y el módulo de elasticidad nominal del material.

Los ensayos realizados se llevaron a cabo tomando en cuenta la norma ISO 22157-1 para ensayos de flexión, con un dispositivo capaz de asegurar flexión del tronco por la aplicación de carga a los tercios del claro y se deberá de permitir la rotación libre del bambú en los apoyos.

Los tramos recomendados para realizar esta prueba, deben estar libres de defectos aparentes, es decir, el tronco no debe estar rajado, perforado, ni tener ningún aplastamiento a lo largo de su sección. A fin de obtener la falla en flexión, se recomienda que el claro libre sea al menos de 30 veces el diámetro exterior, además deberá dejarse la mitad de la distancia entre nudos en cada extremo. Si el claro es corto, el tronco fallará debido a fuerzas transversales y no se podrá obtener el objetivo de determinar la capacidad a flexión.

La prueba se llevada a cabo bajo el esquema de 4 puntos (Figura 4) por el hecho de proveer una zona más uniforme en los diagramas de elementos mecánicos (momento y fuerza cortante); ya que se estipula que la prueba de flexión en 3 puntos es menos confiable.





**Figura 4.4. Esquema de la prueba a Flexión**

Previo a la prueba, se determina el segundo momento del área o la Inercia de la sección, utilizando los valores del diámetro exterior y el espesor de pared de la siguiente manera:

$$I_B = \frac{\pi}{64} \times [D^4 - (D - 2t)^4] \quad \text{Ecuación 17}$$

Para llevar a cabo la prueba, se acomoda el tramo de bambú sobre la máquina que inducirá la flexión, descansando sobre los apoyos, permitiendo que encuentre su propia posición; a continuación, se coloca el dispositivo que dividirá la carga, luego se alinea el tronco, los dispositivos de apoyo y de carga visualmente sobre un plano vertical. Cuando todos los elementos están en su lugar se procede a aplicar la carga (Foto 5).



Foto 4.5. Ensayo a Flexión

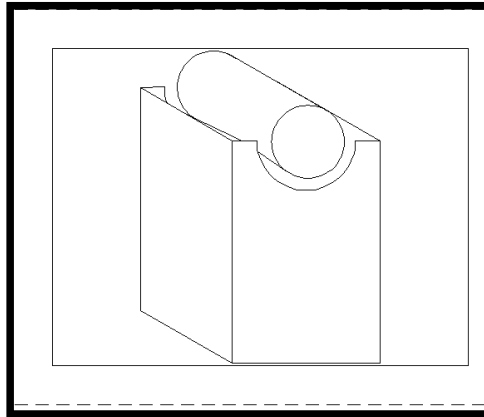


Figura 4.5. Dispositivo de apoyo para ensayo a flexión del bambú.

La carga se aplica a velocidad constante (0.5 mm/seg.); en casos donde no pueda definirse la velocidad, la prueba se realizará con valor de carga constante.

El esfuerzo máximo en flexión se calcula como sigue:

$$\sigma_{ult} = F \times L \times \frac{D/2}{6 * I_B} \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde:

**F** es la carga máxima aplicada, en N

**L** es la longitud de claro libre, en mm

**D** es el diámetro exterior, en mm

**I<sub>B</sub>** es el momento de inercia, calculado con la ecuación 4, en mm<sup>4</sup>.

El módulo de elasticidad nominal (MPa) se calcula analíticamente con la siguiente fórmula, tomando la deflexión a 1/3 del claro o en el primer punto de carga como sigue:

$$E = 23 \times F \times \frac{L^3}{1296 * \delta * I_B} \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde:

F es la carga máxima aplicada, en N

L es la longitud de claro libre, en mm

I<sub>B</sub> es el momento de inercia, calculado con la ecuación 4, en mm<sup>4</sup>.

δ es la deflexión a la mitad del claro, en mm.

A continuación se muestra la tabla de resultados (Tabla 4.5) de las pruebas a flexión. Al igual que con la prueba a compresión, es necesario hacer una comparativa del comportamiento del bambú con respecto a otros materiales. Como podemos ver en la tabla, los resultados obtenidos muestran un esfuerzo promedio a flexión de 691 Kg/cm<sup>2</sup> y un módulo de elasticidad promedio a flexión de 147618.75 Kg/cm<sup>2</sup>. Estos valores se utilizarán en el diseño de los prototipos experimentales y en la predicción del comportamiento de los sistemas de losas propuestos en esta investigación.

**Tabla 4.5. Resultados de la prueba a flexión.**

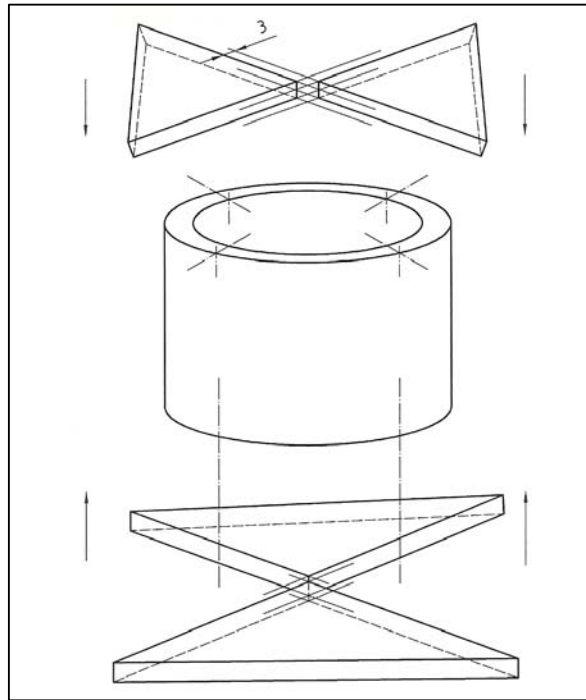
Probeta		D <sub>ext</sub>	Espesor	Area	Inercia	Carga	σ	Módulo de Elasticidad
	L = cm	(cm)	(cm)	cm <sup>2</sup>	(cm <sup>4</sup> )	(Kg)	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )
1	229	7.62	0.635	13.934	85.685	405.34	688	151150
2	248	8.26	0.635	15.201	111.097	432.90	665	168291
3	229	7.62	0.794	17.027	100.512	350.72	507	145316
4	248	8.26	0.635	15.201	111.097	379.82	583	146314
5	229	7.62	0.953	19.961	113.169	441.37	567	144555
6	210	6.99	0.635	12.678	64.639	439.01	831	137291
7	210	6.99	0.635	12.678	64.639	326.20	617	130183
8	210	6.99	0.635	12.678	64.639	360.23	682	159291
9	210	6.99	0.635	12.678	64.639	352.85	668	153268
10	210	6.99	0.635	12.678	64.639	348.68	660	138656
11	210	6.99	0.635	12.678	64.639	390.11	738	142567
12	210	6.99	0.794	15.455	75.386	443.50	720	138059
13	210	6.99	0.476	9.741	51.943	400.33	943	159867
14	210	6.99	0.635	12.678	64.639	355.45	673	139343
15	210	6.99	0.635	12.678	64.639	443.22	839	160123
<b>Promedios de esfuerzo a flexión y Módulo de Elasticidad</b>							<b>692</b>	<b>147619</b>

#### 4.3.4 Determinación de la Resistencia a Corte Paralelo a la Fibra

El objetivo de esta prueba es la determinación de resistencia última al corte de especímenes de tronco de bambú. El estudio del comportamiento a corte del bambú es importante por ser el punto crítico, pues se ha demostrado que, con respecto a diversas clases de madera, el bambú es muy resistente a la tensión y a la flexión, pero es débil cuando se expone a esfuerzos de corte. La resistencia al corte de la madera puede estimarse entre el 20 y 30 % de la resistencia a compresión. Para el bambú, en cambio, sólo es posible considerar alrededor de un 8 –10 % de su resistencia a compresión.

Los especímenes podrán tomarse de cualquier parte del tronco de bambú, las pruebas deberán llevarse a cabo sobre dichos especímenes de los cuales el 50% tengan nudo y el resto sin nudo. La longitud o altura de los elementos deberá ser igual al diámetro. Lo anterior está basado en la experiencia que indica que los especímenes entre nudos, presentan mejor comportamiento. Los extremos deberán estar en lo posible en ángulo recto con la longitud de la pieza y deberán ser planos en su sección transversal por la especímenes de esfuerzos.

Las pruebas deberán llevarse a cabo en una máquina de compresión con unos montadores intermediarios o silletas de acero (Figura 6), los cuales soportan al espécimen en el extremo inferior sobre dos cuartos opuestos y cargados en el extremo superior, sobre los otros dos cuartos; por lo tanto, esta manera de soportar y cargar al espécimen resulta en cuatro áreas de corte.



**Figura 4.6. Prueba a Corte**

En la figura 6 se muestra una distancia de 3 mm entre las puntas de las placas de acero superior e inferior, medida de precaución, para asegurar que el área del material cortado permanezca entre las placas.

Deberán registrarse el espesor de pared, así como la altura promedio de los especímenes en las cuatro áreas de corte. La pieza de prueba deberá situarse en el centro del cabezal móvil de la máquina.

La carga deberá aplicarse continuamente durante la prueba, procurando que el cabezal móvil se desplace a una velocidad constante de 0.01 mm/seg.; deberá registrarse la lectura final de carga máxima a la cual se produce la falla y el número de áreas que fallan.

La resistencia última al cortante deberá calcularse de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\tau_{ult} = \frac{F_{ult}}{\sum(t \times L)}$$

**Ecuación 20**

Donde:

$\tau$  es la resistencia última al corte, en Kg. /cm<sup>2</sup>

F es la carga máxima a la cual el espécimen falla, en Kg.

$\Sigma(t \times L)$  es la suma de los cuatro productos de t (espesor) por L, en cm<sup>2</sup>.



Foto 4.6. Dispositivos utilizados en el ensayo a Corte.

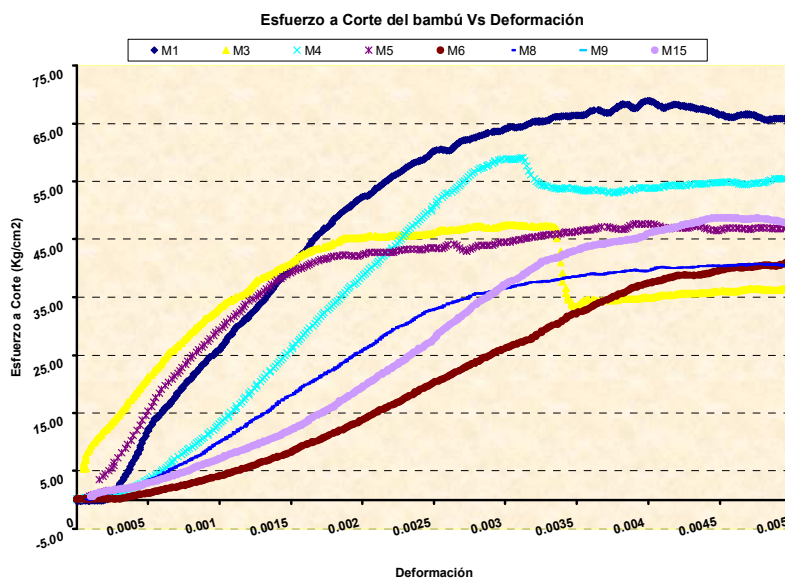


Foto 4.7. Colocación de la muestra para el ensayo a Corte. Prueba realizada en la máquina Universal Laboratorio de Estructuras ITESM.

A continuación se muestra la tabla con el resumen de los resultados obtenidos del esfuerzo último a corte ( $\sigma_{ult}$ ) a partir de la fuerza última ( $F_{ult}$ ) que se generó durante la realización de las pruebas en laboratorio (Tabla 6).

**Tabla 4.6. Tabla de Resultados Pruebas a Corte**

Probeta	Tipo	F (Kg)	T (Kg./cm <sup>2</sup> )
1	B	676.00	69
2	B	662.00	48
3	B	848.00	61
4	B -Nudo	665.00	48
5	B -Nudo	601.00	42
6	B -Nudo	694.00	41
7	M-Nudo	361.59	21
8	M	731.73	43
9	M	571.00	33
10	M	529.00	38
11	M	558.00	40
12	M-Nudo	671.00	39
13	T	709.00	49
14	T	719.00	34
15	T -Nudo	755.00	41
16	T -Nudo	794.00	38
17	T -Nudo	828.00	38
18	T -Nudo	767.00	35
<b>Esfuerzo a corte promedio =</b>			<b>42</b>



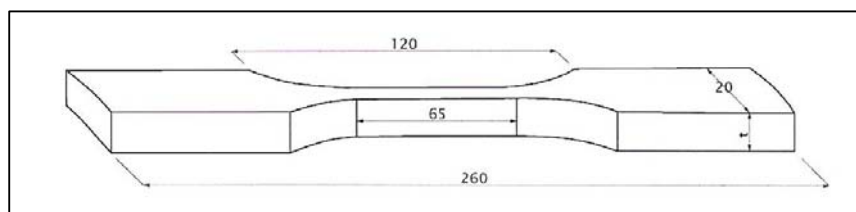
**Gráfica 4.4. Curva Esfuerzo a Corte - Deformación Unitaria del Bambú de algunas probetas ensayadas.**

#### 4.3.5 Determinación de la Tensión Paralela a la Fibra

El objetivo de esta prueba, es la determinación de la resistencia última a tensión paralela a las fibras mediante la aplicación de un incremento gradual de carga a una probeta. La prueba de tensión es uno de los ensayos de materiales más comunes, sin embargo, no es el caso del bambú, ya que presenta mucha dificultad en la sujeción correcta en los extremos de las probetas, debido a que el material sufre de aplastamiento por la compresión perpendicular a la fibra provocada por las mordazas. Así mismo las pruebas en tensión se complican por la baja resistencia al corte del material; por lo que las fallas en pruebas de tensión son en muchos casos causadas por corte longitudinal o compresión y/o aplastamiento transversal (fallas locales).

Para la realización de la prueba, los sujetadores de la máquina de prueba deberán asegurar que la carga sea aplicada a lo largo del eje longitudinal del elemento de prueba y deberán prevenir giros longitudinales de la pieza; dichos sujetadores o insertos deberán prensar al espécimen perpendicularmente a las fibras y en una dirección radial.

Los especímenes podrán tomarse de cualquier parte del tronco; las pruebas de tensión paralela a la fibra deberán realizarse sobre especímenes sin nudo en el caso de investigación científica, o con nudo en caso de investigación comercial y debe situarse en la sección reducida; la diferencia de resultados en tensión entre especímenes con y sin nudo es considerable, siendo un nudo realmente débil en tensión, según Arce, la resistencia a la tensión de una probeta con nudo es del 30% de la probeta sin nudo.<sup>3</sup>



**Figura 4.7. Especimen de prueba a tensión propuesto por Zhou Fangchun (1981)<sup>4</sup>.**

<sup>3</sup> Acceptance Criteria for structural Bamboo AC 162, Marzo 2000. ICBO Evaluation Service, Inc.

<sup>4</sup> Zhou Fangchun, 1981. Studies on physical and mechanical properties of bamboo woods. Journal of Nanjing Technological College of Forest Products, No.2 (In Chinese).



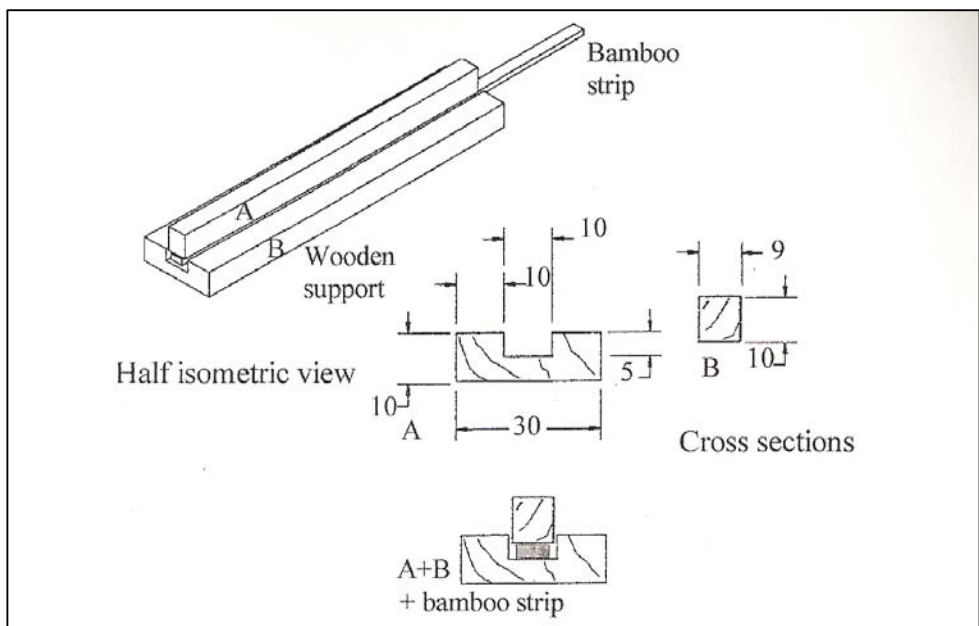


Figura 4.8. Espécimen de prueba a tensión propuesta por Arce (1993)<sup>5</sup>.

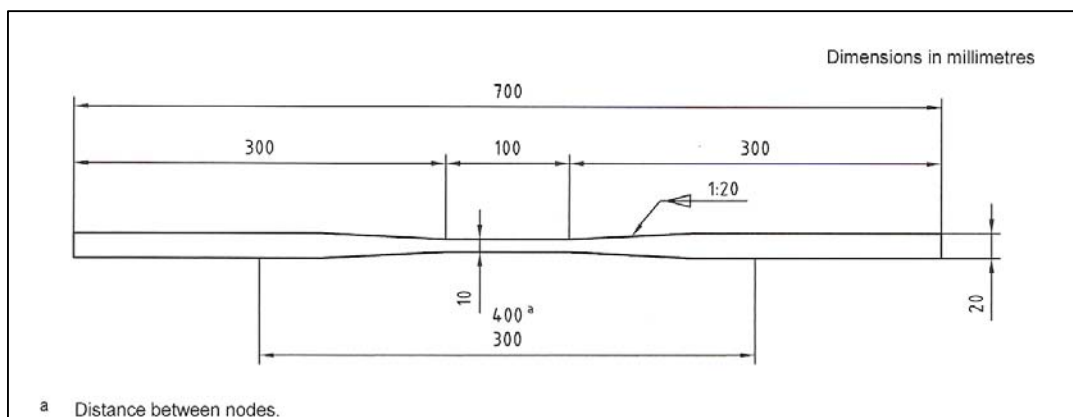


Figura 4.9. Espécimen de prueba a tensión utilizada en Japón. Cortesía del Prof. Inoue<sup>6</sup>.

La dirección de las fibras será paralela al eje longitudinal, dicha sección será rectangular, con dimensiones de espesor de pared nominal, 1 ó 2 cm en la dirección tangencial y la longitud de la sección reducida debe ser entre 5 y 10 cm. La carga deberá aplicarse continuamente a lo largo de la prueba con una velocidad de movimiento de 0.01 mm/seg. Deberá asegurarse que la falla

<sup>5</sup> Arce, O. (1993) Fundamentals of the design of bamboo structures. Thesis Eindhoven University, 260 pp. ISBN: 90-6814-524-X

<sup>6</sup> Este tipo de espécimen de prueba no tiene un nodo en la zona de ensayo, contrario a lo propuesto en ISO 22157-1

ocurra dentro de la sección reducida minimizando la concentración de esfuerzos en la zona de transición.

La resistencia última a tensión deberá determinarse por la relación de la carga máxima a la cual el espécimen falla al área de la sección transversal (de la zona reducida),

$$\sigma_{ult} = \frac{F_{ult}}{A} \quad \text{Ecuación 21}$$



Foto 4.8. Muestra de probetas de sección reducida.



Foto 4.9. Dispositivos de amarre para realizar el ensayo a tensión.



Foto 4.10. Vista Lateral de la sujeción de las probetas en la maquina universal para el ensayo a tensión.

A continuación se muestra la tabla de resultados obtenidos de las pruebas realizadas en los laboratorios del ITESM.

Tabla 4.7. Tabla de resultados de pruebas a tensión paralela a la fibra

Probeta	Sección Transversal		Área	Carga Máxima (P)	Esfuerzo a Tensión
	L1 (cm)	L2 (cm)	cm <sup>2</sup>	Kg	Kg/cm <sup>2</sup>
1	0.775	0.809	0.627	525.449	838
2	0.750	0.693	0.520	688.164	1324
3	0.432	0.820	0.354	318.635	899
4	0.326	0.889	0.290	355.846	1227
5	0.285	1.023	0.292	369.231	1266
6	0.326	0.889	0.290	410.297	1415
7	0.370	0.743	0.275	389.654	1417
8	0.259	0.786	0.204	317.423	1559
9	0.325	1.147	0.373	526.327	1412
10	0.320	1.120	0.358	318.889	890
<b>Promedio =</b>				<b>1204</b>	

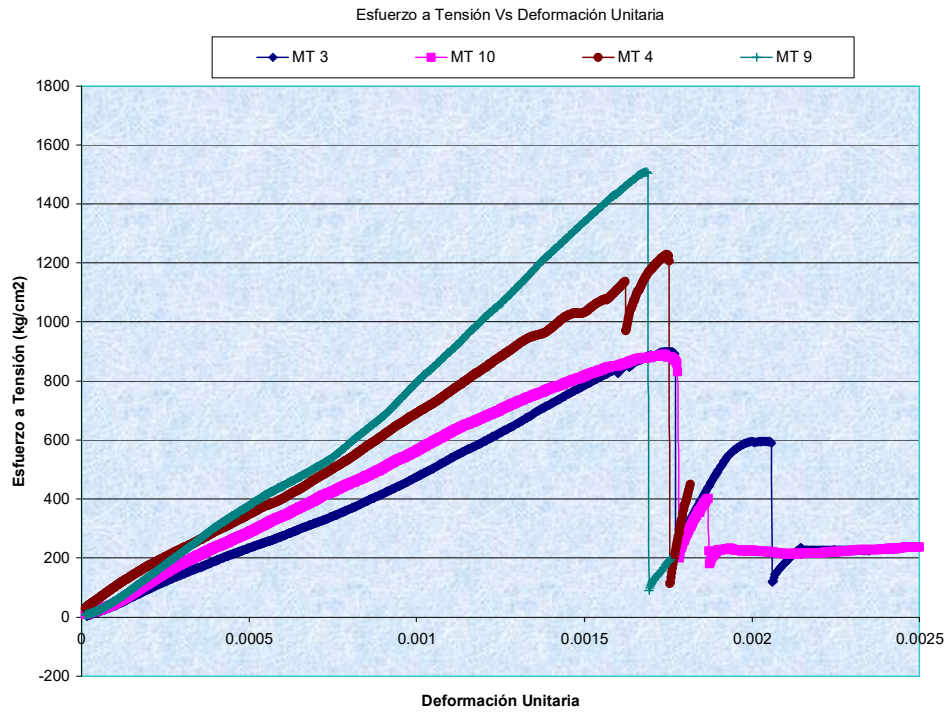
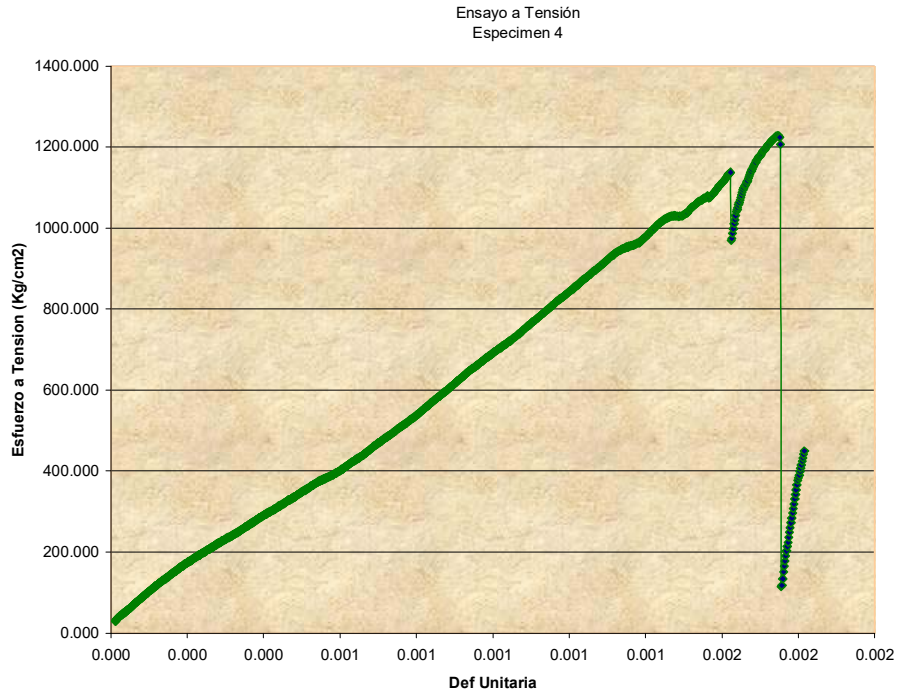
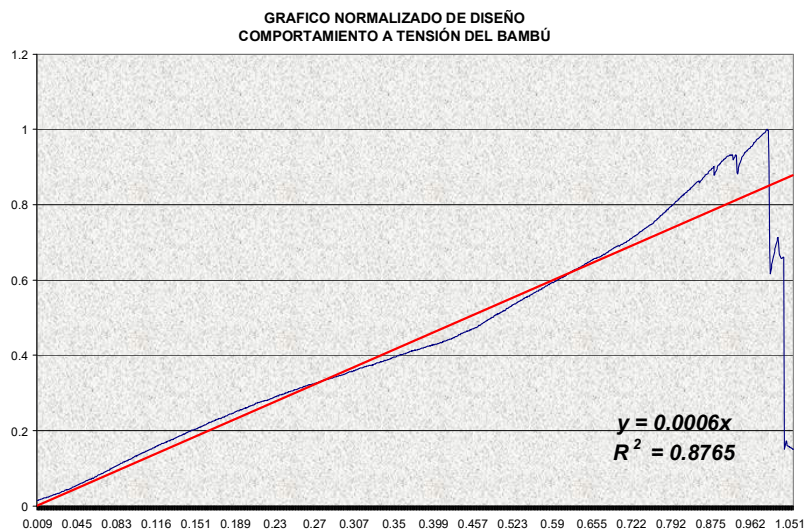




Foto 4.11. Falla a Tensión del bambú.

Al igual que en los resultados obtenidos del ensayo a compresión, para estimar una relación entre el esfuerzo a tensión y su correspondiente deformación unitaria, se normalizaron los datos obtenidos de las probetas ensayadas a tensión y se propuso una relación entre ambas variables. Los resultados se muestran a continuación.



Gráfica 4.5. Gráfica Normalizada del esfuerzo a tensión – deformación unitaria a tensión

De la tabla anterior podemos establecer una relación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a tensión del bambú, tal como se muestra a continuación:

Tabla 4.8. Relación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión del bambú.

Probeta	$E_t / \sqrt{f_{bt}}$
1	16989
2	21737
3	16662
4	17520
5	29656
6	23516
7	16770
8	22184
9	18788
10	16371
<b>Promedio =</b>	<b>20019</b>

De lo anterior podemos proponer la siguiente expresión:

$$E_{tb} = 20019 \sqrt{f_{tb}} \quad \text{Ecuación 22}$$

#### 4.4 Resumen de los resultados obtenidos

A continuación se muestra en forma tabular el resumen de los resultados obtenidos de la caracterización mecánica de la *Guadua Angustifolia* realizada en los laboratorios del ITESM.

	Contenido de Humedad (%)	Resistencia a Compresión (Kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo Cortante (Kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de Elasticidad a Compresión (Kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de Elasticidad a Flexión (Kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo en Tensión (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo axial por flexión (Kg/cm <sup>2</sup> )
<b>ITESM, Monterrey, 2008</b>	<b>11.30</b>	<b>484</b>	<b>42</b>	<b>324,457</b>	<b>147,618</b>	<b>1,204</b>	<b>692</b>

Tabla 4.9. Resumen de resultados de las pruebas de la caracterización

### **4.5 Comparativa de los resultados**

Los resultados de las pruebas realizadas son influenciadas en gran medida por las condiciones en las cuales fue cultivada la guadua, así como su proceso de conservación y curado. Como son muchos los factores involucrados en el proceso la variabilidad entre los valores obtenidos experimentalmente, es muy alta, por tal razón a continuación se resumen los diversos estudios realizados sobre las características físicas y mecánicas de la Guadua Angustifolia kunth, las cuales han sido compiladas por Arbelaez et al, 2001 (para 50 años), y por el Autor en la revisión bibliográfica de memorias de seminarios y congresos, y documentos especializados sobre la guadua en los últimos años (Ver anexo1).

“Genuardi (1954), recopiló resultados de estudios sobre el bambú llevados a cabo en distintos países y al mismo tiempo experimentó en el CINVA (Centro Interamericano de Vivienda) estudiando el comportamiento a flexión con probetas de Guadua Angustifolia de 80 cm de longitud y sección trapezoidal (base mayor 20 mm, base menor 16 mm, altura 7 mm), obteniendo un módulo de elasticidad en los primeros ensayos de 11600 MPa, y en segunda instancia 12000 MPa; los valores coincidieron con los obtenidos en los experimentos del Colegio de Agricultura de CLEMSON.

Díaz et al (1971) realizaron ensayos en la Guadua Angustifolia (forma Castilla, Cebolla o “balsa”) para estudiar su comportamiento como refuerzo en el concreto. Se utilizó este tipo de guadua por ser la de menor resistencia. El esfuerzo de rotura para 10 ensayos de tracción en latas de guadua con nudos varió entre 54.8 y 104.5 MPa, y en 5 ensayos con latas de los entrenudos varió entre 102.0 y 156.0 MPa. El módulo de elasticidad a tracción, de acuerdo con 8 ensayos en probetas con nudo, varió entre 10700 y 17300 MPa, y según las curvas esfuerzo – deformación la guadua se comporta como un material elástico.

Merino et al (1972) realizaron ensayos para estudiar el comportamiento de la Guadua Macana como refuerzo en el concreto. El esfuerzo de rotura en los ensayos de tensión para 15 probetas sin nudo varió entre 97 y 166 MPa, y para

13 probetas con nudo estuvo entre 94 y 143 MPa. De las probetas con nudo, ninguna falló en los nudos, contrario a lo esperado, es decir la resistencia en los nudos es mayor que en los tramos intermedios. Los ensayos de compresión se realizaron de tal forma que la falla fuera por aplastamiento, para lo cual la altura de las probetas era dos veces el espesor; el esfuerzo de rotura para 8 probetas con nudo varió entre 48 y 66 MPa, y para las 8 probetas sin nudo varió entre 57 y 69 MPa.

Jiménez y Gómez, 1982, realizaron un análisis comparativo de la vivienda en guadua con algunos sistemas tradicionales de construcción; describiendo las propiedades de la guadua a compresión, de acuerdo con los resultados obtenidos por SOLINGRAL LTDA y difundidos por FAJARDO VÉLEZ & CIA LTDA. En los ensayos se utilizaron 17 probetas cortas (con longitud aproximada de 30 cm) y 12 probetas largas (con longitud aproximada de 3.2 m). Para las probetas cortas, la carga de falla a compresión varió entre 50 y 227 kN; para las probetas largas, la carga de falla varió entre 14 y 50 kN. En una probeta larga con restricción de movimiento, evitando el pandeo, la carga de falla fue de 91 kN.

Finalmente se puede notar una gran variabilidad en los resultados obtenidos por las diferentes fuentes investigadas; algunos autores definieron como parámetros: la resistencia última obtenida, y a partir de allí determinaron el esfuerzo admisible; otros, la resistencia última obtenida para el cálculo de la resistencia admisible. De igual manera, hay una variación en las metodologías para realización de ensayos hasta el año 2004, debido que fue durante este año que se normalizó el proceso de ensayo del bambú mediante la ISO.

A continuación se presenta una serie de gráficas que muestran la variabilidad de las propiedades mecánicas de la guadua respecto a su contenido de humedad elaboradas por el Ing. Luis Octavio González Salcedo de la Universidad de Colombia, sede Palmira.



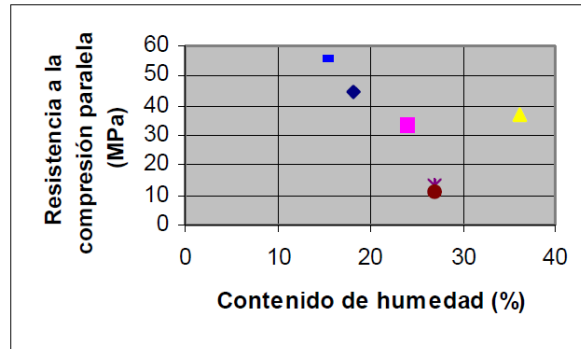


Figura 4.10. Contenido de humedad (%) versus Resistencia a la compresión paralela (MPa), de acuerdo con resultados promedios obtenidos experimentalmente, para la Guadua angustifolia, 1950 - 2005.

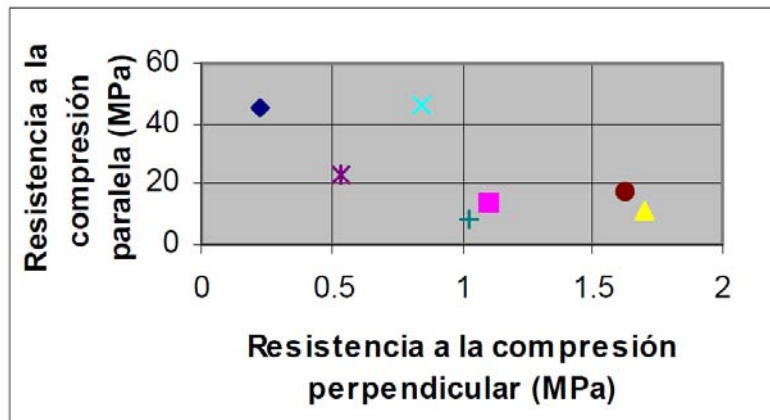


Figura 4.11. Resistencia a la compresión perpendicular (MPa) versus Resistencia a la compresión paralela (MPa), de acuerdo con resultados promedios obtenidos experimentalmente, para la Guadua angustifolia, 1950 - 2005.

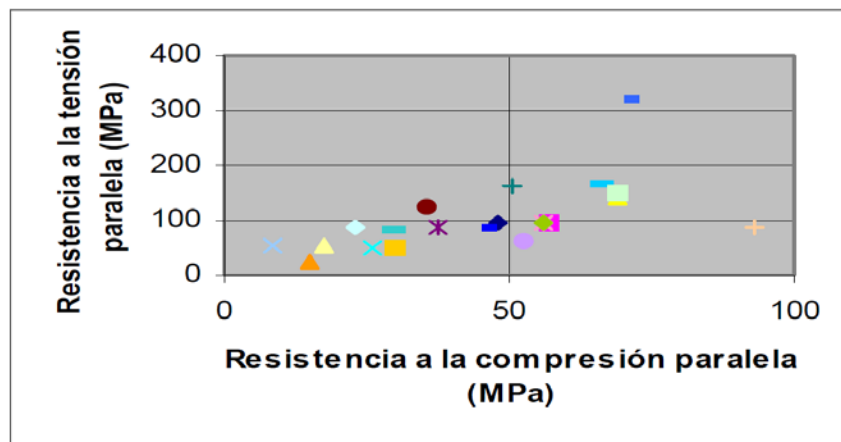


Figura 4.12. Resistencia a la compresión paralela (MPa) versus Resistencia a la tensión paralela (MPa), de acuerdo con resultados promedios obtenidos experimentalmente, para la Guadua angustifolia, 1950 - 2005.

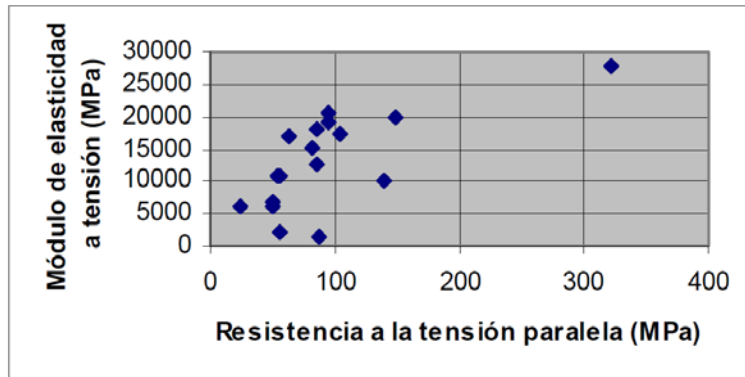


Figura 4.13. Resistencia a la tensión paralela (MPa) versus Módulo de elasticidad a la tensión (MPa), de acuerdo con resultados promedios obtenidos experimentalmente, para la Guadua angustifolia, 1950 - 2005.

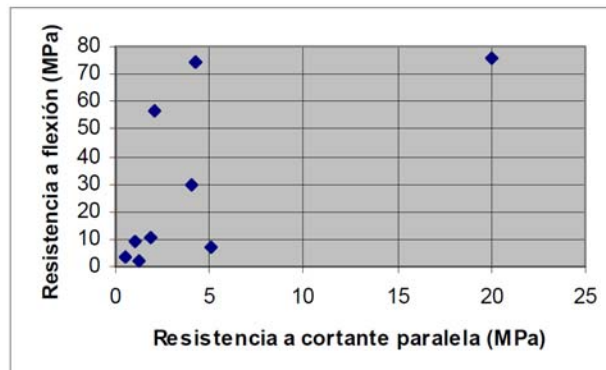


Figura 4.14. Resistencia a la cortante paralela (MPa) versus Resistencia a la flexión (MPa), de acuerdo con resultados promedios obtenidos experimentalmente, para la Guadua angustifolia, 1950 - 2005.

En la figura 10, se relacionan el contenido de humedad (%) y la resistencia a la compresión paralela (MPa) de resultados promedios obtenidos experimentalmente, donde se observa un comportamiento esperado de disminución de la resistencia con el aumento del contenido de humedad. En la figura 11, se relacionan las resistencias a la compresión perpendicular y paralela, donde se observa también un comportamiento esperado de disminución de la resistencia a la compresión paralela con el aumento de la resistencia a la compresión perpendicular. Las figuras 12, 13 y 14, muestran un comportamiento esperado de proporcionalidad directa, con respecto a las propiedades relacionadas.

## Capítulo V.

### Diseño del Prototipo Experimental

#### ***5.1 Introducción.***

En la presente investigación se requiere la evaluación de losas alveolares reforzadas con bambú, por tal motivo en el desarrollo del capítulo, se presentarán los materiales utilizados para la construcción del prototipo, así como las variables que influyen en el diseño final para definir el análisis posterior del modelo de prueba. Además se mostrarán las descripciones de los modelos de prueba.

#### ***5.2 Materiales de Construcción***

##### **5.2.1. El bambú**

Los bambúes son plantas gramíneas de amplia distribución en prácticamente todo el mundo a excepción de Europa, siendo los países asiáticos y los tropicales los que presentan una mayor diversidad en cuanto a especies y tamaño. Esta abundancia ha permitido que el bambú sea una materia prima ideal para innumerables usos en países principalmente asiáticos desde hace miles de años.

Esta situación no se repite por ejemplo, en América latina, por un fenómeno cultural ya que en muchos lugares se considera un material ordinario que denota pobreza y mal gusto, debido principalmente a que era utilizado por comunidades rurales o personas de escasos recursos. Solo en los últimos años se ha observado un cambio en esta actitud y hoy en día se ve a este recurso como un material noble, el que puede ser utilizado para la confección de diferentes productos. Países como Costa Rica, Colombia, Ecuador, Brasil, India, Japón, China y otros han reconocido la importancia económica y

ecológica que pueden albergar algunas especies cuando son utilizadas en forma adecuada por lo cual han desarrollado toda una cultura en torno al bambú, puesto que les brinda alimento, protección, combustible, etc.

Por lo anterior el bambú es un recurso natural renovable que cultivado en forma sistemática, con una tecnología simple y de bajo costo llega a conformar en un tiempo relativamente breve plantaciones forestales perennes, sujetas a pocos riesgos y cuya producción puede recolectarse y habilitarse con facilidad y sin grandes gastos para colocarla en el mercado.

Las investigaciones que se tienen como antecedentes muestran que un miembro de concreto reforzado con bambú, sujeto a compresión no es mas débil que una pieza similar de concreto de igual área en la sección transversal, por el contrario, si esta reforzado con bambú debe ofrecer una mayor resistencia a la compresión del bambú (González 2005).

Además una pieza de concreto reforzado con bambú obviamente es mas flexible que una pieza de concreto de igual sección transversal como el bambú comparado con el concreto posee aproximadamente el mismo módulo de elasticidad, pero mayor resistencia a la compresión, seria ventajoso emplear cañas de bambú en la zona de compresión de vigas de concreto reforzado.

Comparando el bambú con el acero, el bambú posee un reducido módulo de elasticidad a la tensión, por ello es necesario reemplazar el área de la sección transversal en la zona de tensión de la estructura de concreto reforzado.

Como bien mostraron las pruebas de caracterización del bambú, si éste no se le da un buen tratamiento contra la humedad, podría absorberla estando en contacto con la mezcla de concreto, provocando que con el tiempo el bambú se contraiga en grado mayor y mas rápidamente que el concreto perdiendo la adherencia con el concreto.

Algunos estudios muestran que la resistencia al deslizamiento entre las tablillas del bambú y el concreto es de 0,35 MPa.

Algunas de las bondades de esta especie de bambú que tienen aplicabilidad en la construcción son:

- Alta relación resistencia / peso la cual excede a la mayoría de las maderas y que puede compararse incluso con el acero o con algunas fibras de alta tecnología.
- La relación entre la energía necesaria para su producción y el esfuerzo cuando es sometido a una carga.

### 5.2.2 Concreto

El concreto es una mezcla de diversos elementos utilizada en la construcción. La adecuada dosificación es indispensable para poder preparar un concreto con las normas de calidad requeridas.

Definición: Es la unión de cemento, agua, aditivos, grava y arena lo que nos da una mezcla llamada concreto. El cemento representa sólo el 15% en la mezcla del concreto por lo que es el que ocupa menor cantidad en volumen; sin embargo su presencia en la mezcla es esencial.

El concreto se elabora con arena y grava (agregado grueso) que constituyen entre el 70 y 75 por ciento del volumen y una pasta cementante endurecida formada por cemento hidráulico con agua, que con los vacíos forman el resto. Usualmente, se agregan aditivos para facilitar su trabajabilidad o afectar las condiciones de su fraguado y contenido de vacíos para mejorar la durabilidad.

La grava (gravilla) varía en tamaños desde 5 mm hasta 50 mm para los concretos usados en edificaciones y puentes; en concretos especiales como los usados en presas de gravedad los tamaños pueden ser mayores. Requiere buena gradación, resistencia al desgaste, durabilidad, superficies libres de impurezas. El tamaño máximo está determinado por el proceso de construcción; especialmente influye la separación del refuerzo y las dimensiones del elemento que se pretende construir.

La arena es el material granular que pasa el tamiz N°4, y debe estar libre de impurezas, especialmente orgánicas.

El cemento suministra las propiedades adhesivas y cohesivas a la pasta. Se usa el cemento hidráulico tipo Portland. Para su hidratación requiere cerca del 25% de agua. Sin embargo para mejorar la movilidad del cemento dentro de la pasta se requiere un porcentaje adicional del 10 al 15 %. La relación agua-cemento (a/c) mínima es de 0,35; en la práctica es mayor para darle trabajabilidad a la mezcla de concreto. La relación a/c es uno de los parámetros que más afecta la resistencia del concreto, pues a medida que aumenta, aumentan los poros en la masa y por ende disminuye la resistencia.

El agua de la mezcla debe ser limpia y libre de impurezas y en general debe ser potable. El proceso de hidratación genera calor, que produce aumento de temperatura en la mezcla y expansión volumétrica y que debe controlarse sobre todo en vaciados masivos. Con el fin de controlar el exceso de agua en la mezcla, necesario para facilitar la trabajabilidad del concreto fresco, la tecnología moderna del concreto, facilita los aditivos plastificantes, los cuales además de facilitar el proceso constructivo, permiten obtener concretos de resistencia más uniforme.

Las proporciones de los materiales del concreto deben permitir la mayor compactación posible, con un mínimo de cemento. Las proporciones de una mezcla se definen numéricamente mediante fórmulas, v. gr.: 1:2:4 que representa: "1" parte de cemento, "2" partes de arena, "4" partes de grava, al peso o al volumen. Las proporciones (dosificaciones) al peso son las más recomendables.

Siendo la compresión la propiedad más característica e importante del concreto, las demás propiedades mecánicas se evalúan con referencia a ella. La resistencia a compresión ( $f'c$ ) se mide usualmente mediante el ensayo a compresión en cilindros de 150 mm de diámetro por 300 mm de altura y con 28 días de edad.

La resistencia a compresión ( $f_c$ ) varía significativamente con la variación de algunos parámetros, tales como: la relación agua-cemento ( $a/c$ ), el tamaño máximo de la grava, las condiciones de humedad durante el curado, la edad del concreto, la velocidad de carga, la relación de esbeltez de la muestra (en casos de ensayos sobre núcleos extraídos de concretos endurecidos es diferente de 2, que es la relación de los cilindros estándar, usados para determinar la resistencia del concreto).

En cuanto a la resistencia a tensión, el concreto presenta una resistencia baja y cerca del 10% de la resistencia a compresión.

### ***5.3. Descripción de los modelos de prueba***

Las variables consideradas en el diseño de los prototipos experimentales son:

1. Resistencia del concreto: 200 Kg/cm<sup>2</sup>.
2. Materiales: Cemento – Arena – Grava Fina
3. Diámetros del Bambú.
  - a. 5.0 cm
  - b. 7.5 cm
4. Separación entre el bambú de refuerzo.
  - a. 1.5 H
  - b. 2.0 H
  - c. 2.5 H

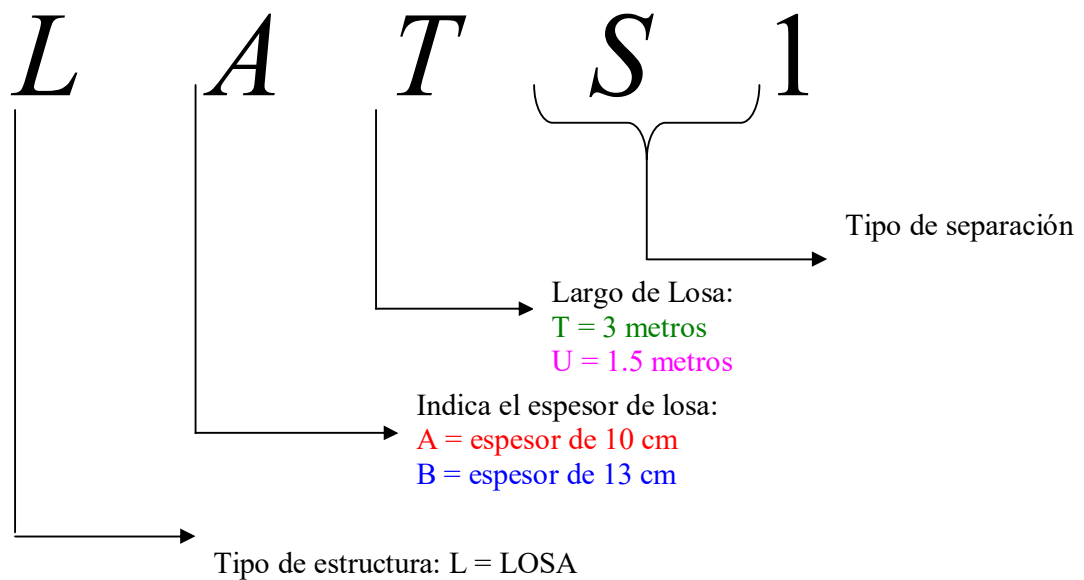
Donde H es el espesor de losa.

5. Longitud
  - a. 1.50 Metros
  - b. 3.00 Metros

Combinando las variables mencionadas anteriormente, se procede a elaborar 12 modelos experimentales, los cuales serán denominados de la siguiente forma:

Modelo
LATS1
LATS2
LATS3
LAUS1
LAUS2
LAUS3
LBTS1
LBTS2
LBTS3
LBUS1
LBUS2
LBUS3

Donde:



En los tipos de separación se clasifican en:

- S1 = 1.5\*(espesor de Losa)
- S2 = 2.0\*(espesor de losa)
- S3 = 2.5\*(espesor de losa)

Es importante destacar que todas las losas tienen un metro de ancho.

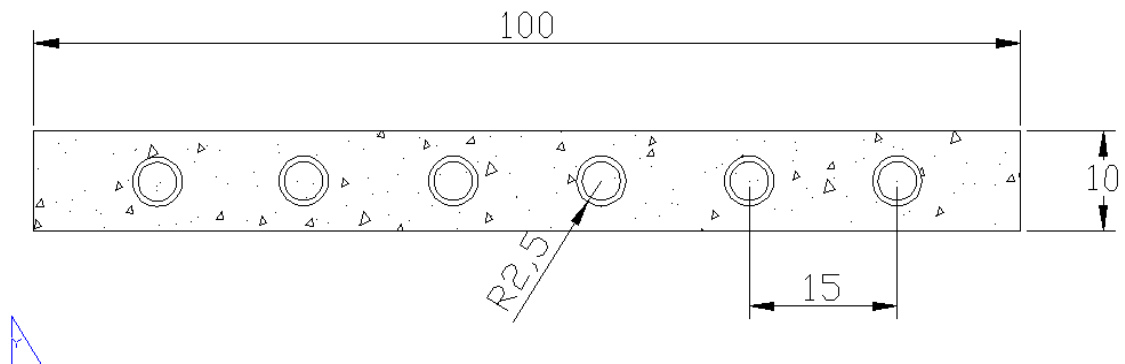


5.3.1 Descripción gráfica de cada modelo experimental

Prototipos	
LATS1	LAUS1

**Tabla 5.1. Distribución del bambú dentro de la sección transversal para los prototipos LATS1 y LAUS1**

TOTAL BAMBUES	6	
DIAMETRO	5	cm
SEPARACION <sup>7</sup> CC	15	cm
SEPARACION OO	10	cm
ESPESOR LOSA	10	cm
		<b>Ancho Acum.</b>
RECUB-AL-BORDE	10	10
B1	5	15
S-OO-1	10	25
B2	5	30
S-OO-2	10	40
B3	5	45
S-OO-3	10	55
B4	5	60
S-OO-4	10	70
B5	5	75
S-OO-5	10	85
<b>B6</b>	5	90
RECUB-AL-BORDE	10	<b>100</b>



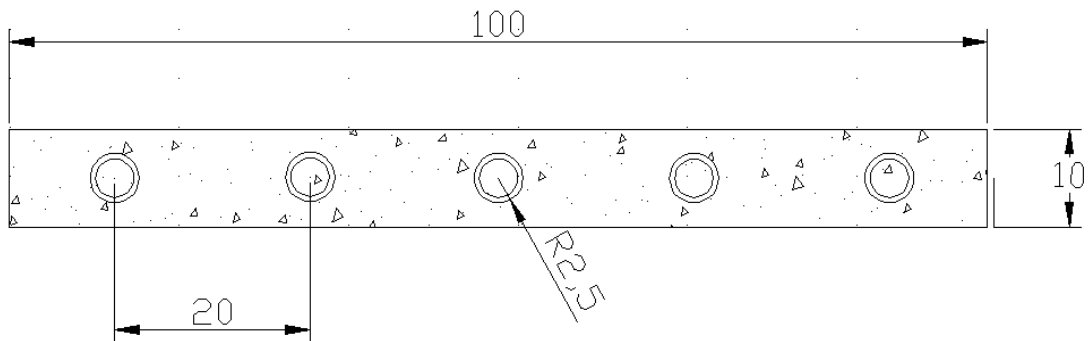
**Figura 5.1. Sección Transversal de los prototipos LATS1 y LAUS1**

<sup>7</sup> Nomenclatura:  
 cc = Centro a Centro  
 oo = Orilla a orilla

Prototipos	
LATS2	LAUS2

**Tabla 5.2. Distribución del bambú dentro de la sección transversal para los prototipos LATS2 y LAUS2**

TOTAL BAMBUES	5	
DIAMETRO	5	cm
SEPARACION CC	20	cm
SEPARACION OO	15	cm
ESPESOR LOSA	10	cm
		<b>Ancho Acum.</b>
RECUB-AL-BORDE	7.5	7.5
B1	5	12.5
S-OO-1	15	27.5
B2	5	32.5
S-OO-2	15	47.5
B3	5	52.5
S-OO-3	15	67.5
B4	5	72.5
S-OO-4	15	87.5
<b>B5</b>	5	92.5
RECUB-AL-BORDE	7.5	100



**Figura 5.2. Sección Transversal de los prototipos LATS2 y LAUS2**

Prototipos	
LATS3	LAUS3

Tabla 5.3. Distribución del bambú dentro de la sección transversal para los prototipos LATS3 y LAUS3

<b>TOTAL BAMBUES</b>	<b>4</b>	
DIAMETRO	5	cm
SEPARACION CC	25	cm
SEPARACION OO	20	cm
ESPEJOR LOSA	10	cm
		<b>Ancho Acum.</b>
RECUB-AL-BORDE	10	10
B1	5	15
S-OO-1	20	35
B2	5	40
S-OO-2	20	60
B3	5	65
S-OO-3	20	85
B4	5	90
RECUB-AL-BORDE	10	100

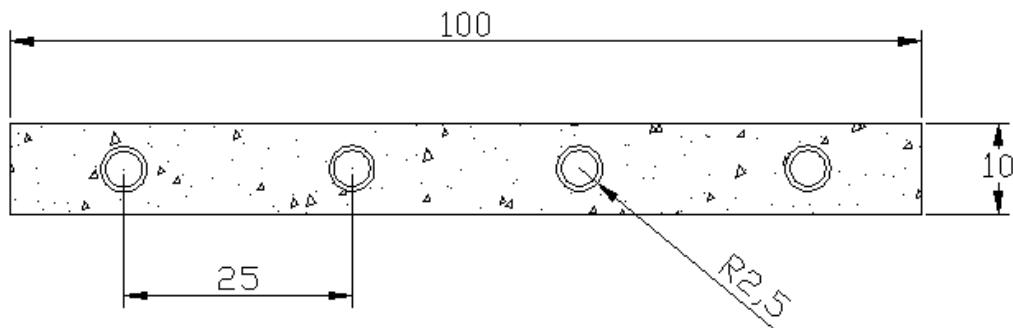


Figura 5.3. Sección Transversal de las secciones LATS3 y LAUS3

Prototipos	
LBTS1	LBUS1

Tabla 5.4. Distribución del bambú dentro de la sección transversal para los prototipos LBTS1 y LBUS1

<b>TOTAL BAMBUES</b>	<b>5</b>	
DIAMETRO	7.5	Cm
SEPARACION CC	18.75	cm
SEPARACION OO	11.25	cm
ESPESOR LOSA	12.5	cm
		<b>Ancho Acum.</b>
RECUB-AL-BORDE	8.75	8.75
B1	7.5	16.25
S-OO-1	11.25	27.5
B2	7.5	35
S-OO-2	11.25	46.25
B3	7.5	53.75
S-OO-3	11.25	65
B4	7.5	72.5
S-OO-4	11.25	83.75
B5	7.5	91.25
RECUB-AL-BORDE	8.75	100

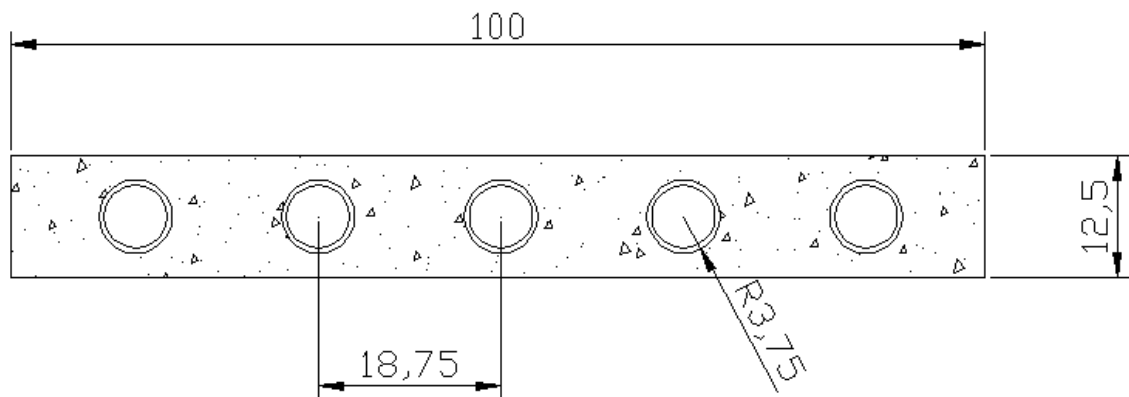


Figura 5.4. Sección transversal de los prototipos LBTS1 y LBUS1

Prototipos	
LBTS2	LBUS2

Tabla 5.5. Distribución del bambú dentro de la sección transversal para los prototipos LBTS2 y LBUS2

TOTAL BAMBUES	4	
DIAMETRO	7.5	Cm
SEPARACION CC	25	Cm
SEPARACION OO	17.5	Cm
ESPEJOR LOSA	12.5	cm
		<b>Ancho Acum.</b>
RECUB-AL-BORDE	8.75	8.75
B1	7.5	16.25
S-OO-1	17.5	33.75
B2	7.5	41.25
S-OO-2	17.5	58.75
B3	7.5	66.25
S-OO-3	17.5	83.75
B4	7.5	91.25
RECUB-AL-BORDE	8.75	100

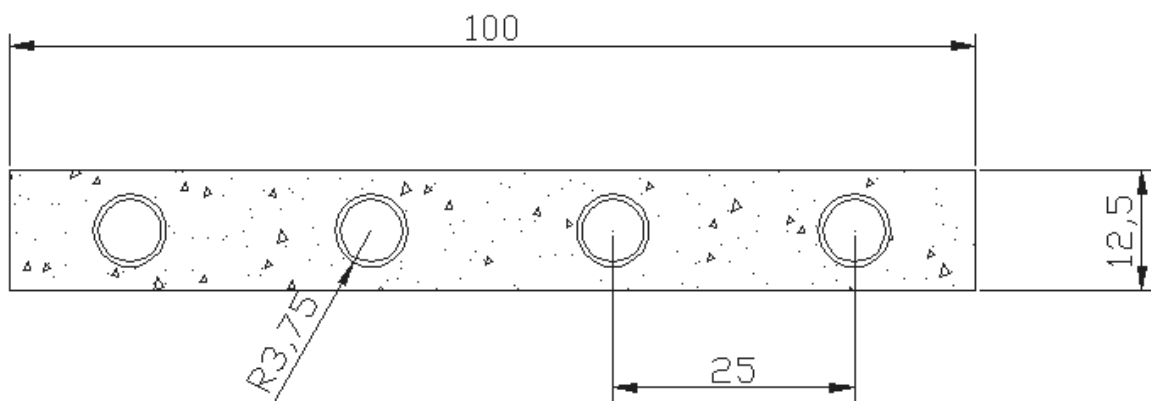


Figura 5.5. Sección Transversal de los prototipos LBTS2 y LBUS2

Prototipos	
LBTS3	LBUS3

Tabla 5.6. Distribución del bambú dentro de la sección transversal para los prototipos LBTS3 y LBUS3

TOTAL BAMBUES	3	
DIAMETRO	7.5	cm
SEPARACION CC	31.25	cm
SEPARACION OO	23.75	cm
ESPESOR LOSA	12.5	cm
		<b>Ancho Acum.</b>
RECUB-AL-BORDE	15	15
B1	7.5	22.5
S-OO-1	23.75	46.25
B2	7.5	53.75
S-OO-2	23.75	77.5
B3	7.5	85
RECUB-AL-BORDE	15	100

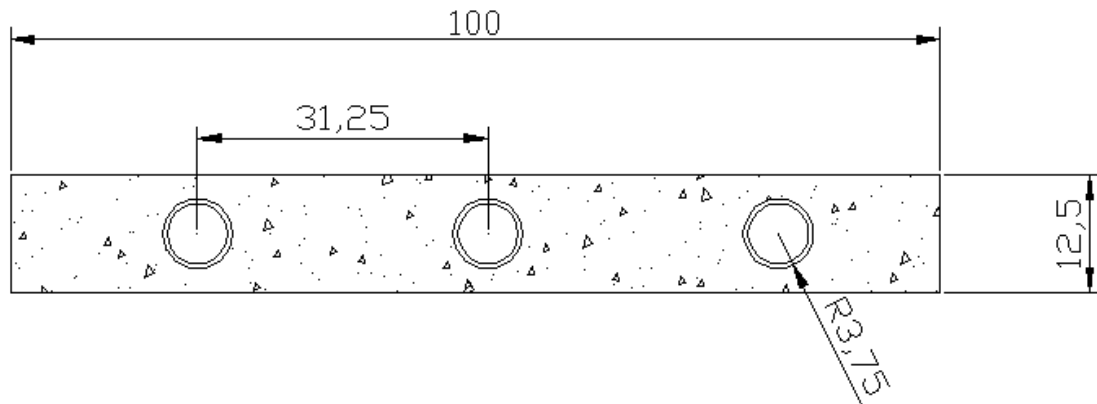


Figura 5.6. Sección transversal de los prototipos LBTS3 y LBUS3

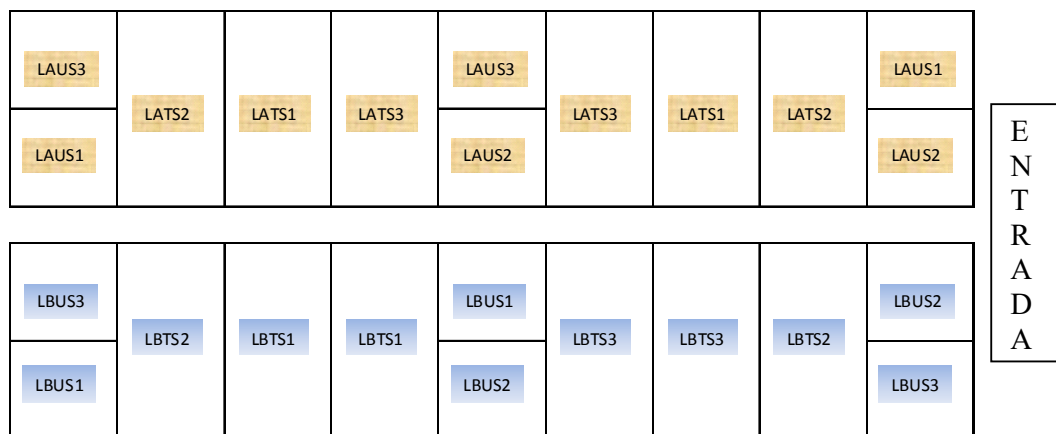
Para todos los prototipos de prueba se propuso un recubrimiento de 2.5 centímetros en la parte inferior y en la parte superior del bambú.

Como parte de la definición del alcance de esta investigación se procedió a establecer dos (2) repeticiones de cada modelo.

Seguidamente se presentó una propuesta para garantizar la aleatoriedad en la ubicación de los prototipos de prueba:

- Se consideró cada uno de los conjuntos de losas como un bloque (2 en total);
- Dentro de cada bloque, se consideraron 3 factores (con un nivel cada uno), correspondientes a los diferentes tipos de separaciones;
- Se consideró que existen dos réplicas para de cada bloque y factor, correspondientes al grupo y tipo de separación;
- Se corrió un diseño factorial con tres factores de un nivel y dos bloques para obtener las corridas aleatorias.

Como resultado de esta aleatorización la ubicación de las losas durante el colado de las mismas dentro del Laboratorio de Estructuras del ITESM queda de la siguiente forma:



## Capítulo VI.

### Construcción de Prototipos y Resultados de las pruebas experimentales.

#### **6.1 Introducción**

En este capítulo se presenta el proceso que se desarrolló para llevar a cabo la construcción de los prototipos de prueba, la realización del ensayo a flexión de las losas y el análisis de los resultados de las pruebas.

Se construyeron 12 prototipos de losas reforzadas con diferentes cuantías de bambú. De los 12 prototipos, 6 tienen una longitud de 1.5 metros y 6, una longitud de 3 metros. Del grupo de losas que tienen 1.5 metros de longitud, 3 losas tienen 10 cm de espesor y 3 diferentes cuantías de bambú (S1, S2, S3, descritos en el capítulo 5). Es la misma distribución para los prototipos que tienen longitud de 3 metros. El concreto tiene resistencia de 200 Kg/cm<sup>2</sup>, de peso normal y tamaño de agregado grueso #2.

Los prototipos de losas se ensayaron en el laboratorio de estructuras del ITESM, para cargas de flexión, y con los datos obtenidos del mismo, se obtendrá la curva de carga – desplazamiento y se comparará la carga última esperada contra la carga máxima resistida por el prototipo.

#### **6.2 Construcción de prototipos**

Los pasos necesarios para la construcción de los prototipos de prueba son:

1. Selección del bambú: Se debe escoger el bambú que este lo más derecho posible. Se separaron en dos grupos, los que tenían diámetro de 2-2½" y aquellos que tenían un diámetro entre 3 y 3½". El bambú no debe presentar fisuras longitudinales ni transversales, ni daños por impacto.



2. Corte del bambú: Se procedió a cortar en tramos de 1.50 y 3.00 metros el bambú para posteriormente colocarlos dentro de la cimbra respetando los criterios de la cuantía de cada prototipo y la disposición de las losas dentro del laboratorio.
3. Colocación del bambú dentro de la cimbra: Una vez cortado el bambú se procede a colocarlos siguiendo la geometría propuesta en el diseño experimental, reforzándolos con clavos en los extremos de la losa.
4. Colado de la losa: Una vez que estuvieran bien sujetos los bambúes a la cimbra y colocados según las especificaciones del diseño se procedió al colado de la losa. El concreto fue premezclado con resistencia a compresión de  $200 \text{ Kg/cm}^2$  y el colado de los 24 prototipos se hizo el mismo día, bajo las mismas condiciones.

#### Notas:

- Durante la construcción de los prototipos se presentaron algunas dificultades en sujetar el bambú dentro de la cimbra en la posición adecuada, más aún cuando algunos tramos no estaban totalmente horizontales y basados en el bambú existente, el diámetro del bambú a colocar dentro de las losas de 10 cm de espesor era mayor al propuesto en el diseño inicial, por lo que al momento del colado las piezas se movieron de lugar debido a la presión con lo que se colocaba el concreto.
- En las losas de 12.5 cm también se presentó el problema que el bambú de refuerzo existente era de mayor diámetro que el propuesto en el diseño inicial, pero al tener una cimbra un poco más alta se cubrió el espesor faltante. Esto trajo como consecuencia que las losas tipo B, al final del colado quedaran de espesores de 14 – 17 cm.

- Se tomaron muestras de cilindros (6 en total) durante el colado, de igual forma se hizo la prueba de revenimiento (14 cm).

### 6.3 Registro Fotográfico de la construcción de los prototipos



Foto 6.1. Corte de las piezas de Bambú para ser colocadas como refuerzo a flexión en las losas



Foto 6.2. Colocación y nivelación de la cimbra.



Foto 6.3. Colocación del bambú dentro de las cimbras, manteniendo el recubrimiento propuesto.



Foto 6.4. Colocación de las mangueras de bombeo para el colado del concreto.



Foto 6.5. Colado de las losas.

### 6.4 Realización del ensayo a Flexión de los prototipos

Los prototipos se ensayaron con una configuración de carga a los tercios del claro simplemente apoyado, mediante una distribución de cargas tal y como se muestra en la foto.

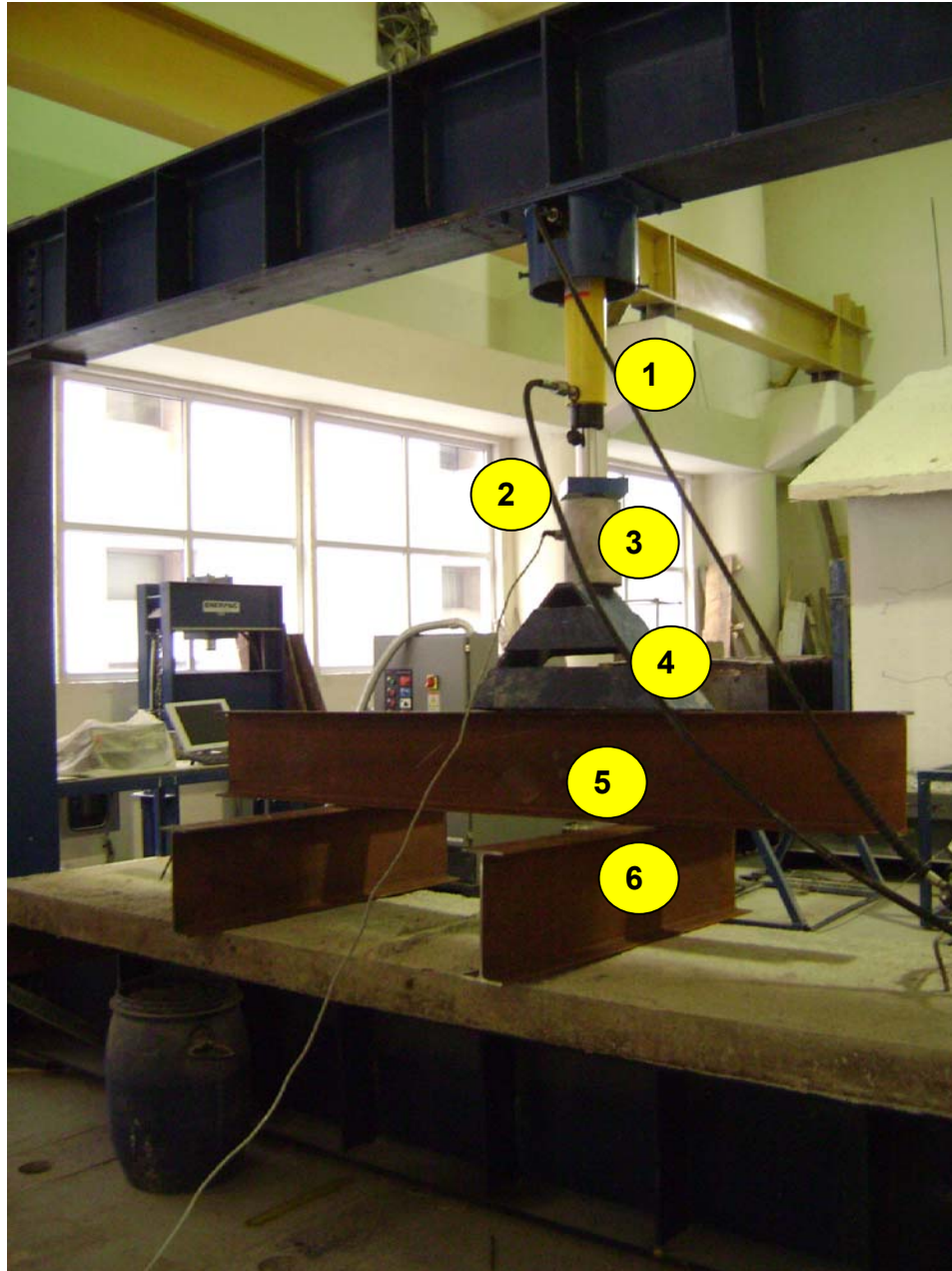


Foto 6.6. Configuración de prueba para la realización del ensayo a flexión de las losas.

Los elementos mostrados en la foto son:

1. Gato Hidráulico
2. Placa de seguridad: Peso = 12.76 Kg
3. Celda de Carga: Peso = 24 Kg
4. Trípode para transferencia de Carga: Peso = 44 Kg
5. Viga Longitudinal de 2mts.: Peso = 22.32 Kg/m
6. Vigas Transversales situadas a los tercios del claro de la losa: Peso = 22.32 Kg/m.

Lo anterior nos muestra que las losas estarán sometidas a una precarga antes de iniciar las pruebas correspondiente a 170.04 Kg.

Adicionalmente se colocó un medidor de deformación (LVDT) en el centro del claro que registraba las deflexiones en el tiempo.

### ***6.5 Resultados obtenidos de las pruebas experimentales para cada uno de los prototipos.***

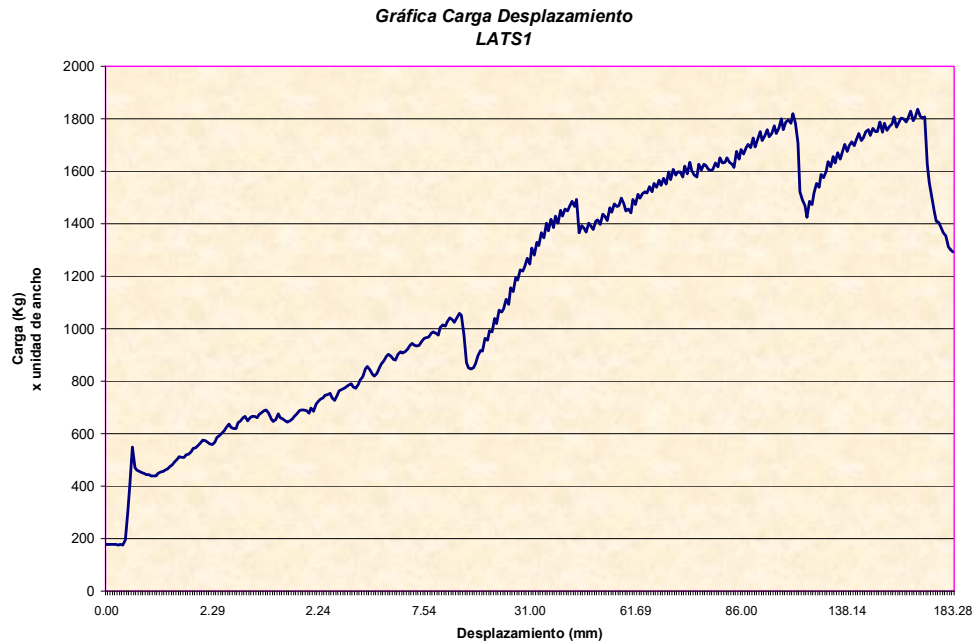
A continuación se muestran las gráficas de carga-desplazamiento que se obtuvieron durante la realización de las pruebas de los prototipos en los laboratorios del ITESM. A partir de estos resultados se procedió a establecer las cargas momento curvatura y las gráficas P-D para realizar la comparación de las cargas esperadas – contras reales registradas en cada uno de los modelos.

#### **6.5.1 Curvas carga - desplazamiento de los prototipos.**

Los gráficos mostrados a continuación son una parte muy importante del presente trabajo de investigación, ya que nos muestran el comportamiento de los distintos tipos de losas propuestas cuando son sometidos a carga estática aplicada a los tercios del claro, simplemente apoyadas en los extremos.

6.5.1.1 Losa tipo LATS1

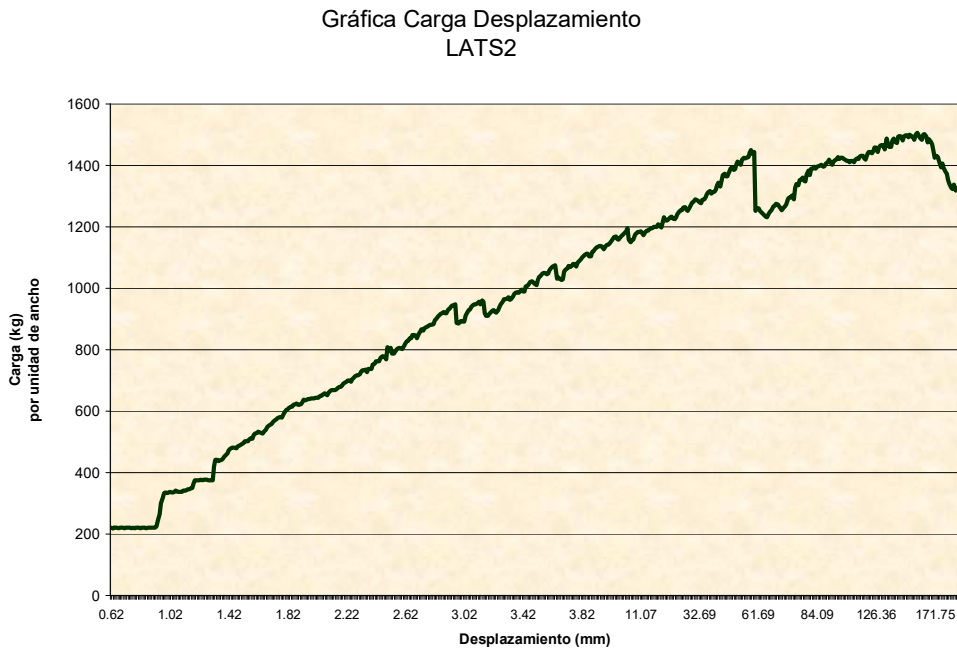
Gráfica 6.1. Gráfica Carga Desplazamiento modelo LATS1



<b>Datos Generales:</b>	
Espesor de Losa nominal	10 cm
Espesor de losa real	10 cm
Largo	3.00 m
Tipo de Separación para el bambú	1.5*H = 15 cm
Cantidad de Bambú como refuerzo	6 Bambúes
Ancho Nominal	100 cm
Ancho Real	62.5 cm
Estado al momento de efectuarse la prueba:	La losa presentaba grietas longitudinales en todo el claro, producto que al momento del colado no se mantuvo el recubrimiento provisto.
Carga Máxima Resistida / unidad de ancho (b)	1837.34 Kg

6.5.1.2. Losa tipo LATS2

Gráfica 6.2. Gráfica Carga Desplazamiento modelo LATS2



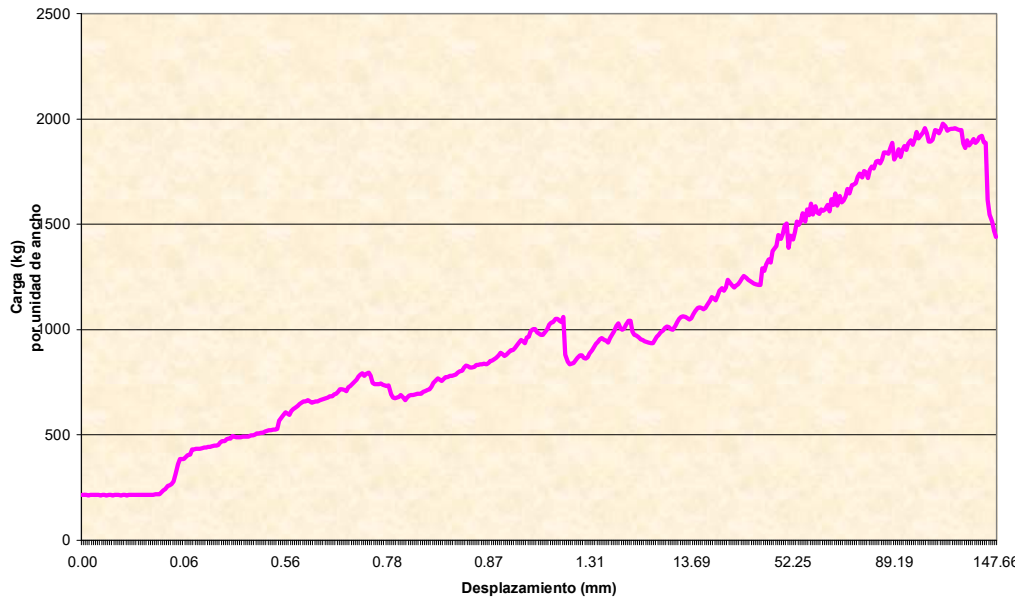
<b>Datos Generales:</b>	
Espesor de Losa nominal	10 cm
Espesor de losa real	10 cm
Largo	3.00 m
Tipo de Separación para el bambú	$2.0 * H = 20 \text{ cm}$
Cantidad de Bambú como refuerzo	5 Bambúes
Ancho Nominal	100 cm
Ancho Real	92 cm
Estado al momento de efectuarse la prueba:	La losa presentaba grietas longitudinales en todo el claro, producto que al momento del colado no se mantuvo el recubrimiento provisto.
Carga Máxima Resistida / unidad de ancho (b)	1506.39 Kg



6.5.1.3 Losa tipo LATS3

Gráfica 6.3. Gráfica Carga Desplazamiento modelo LATS3

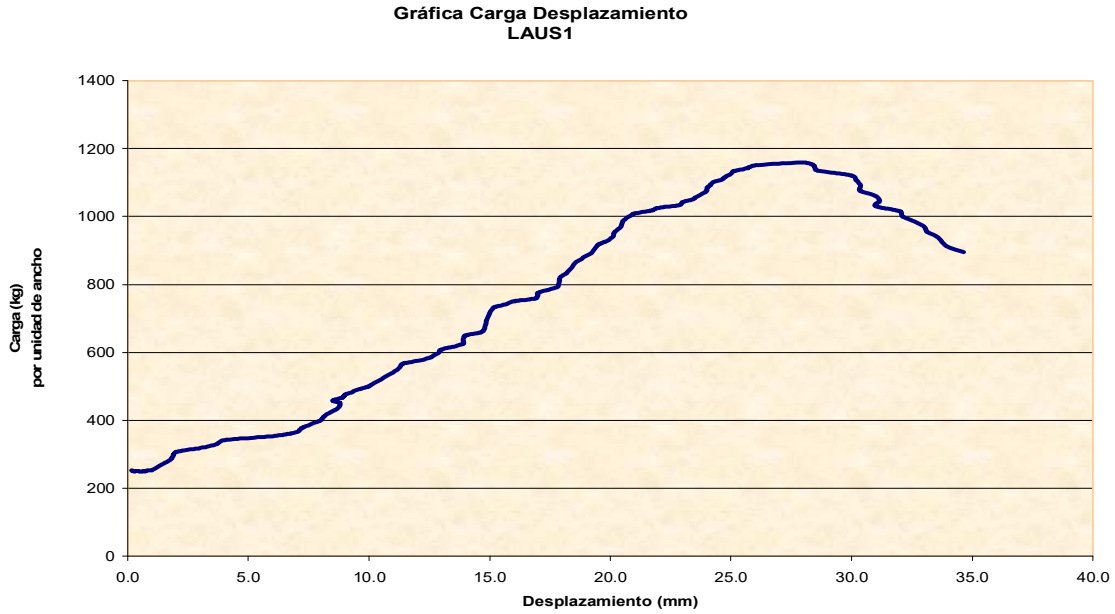
Gráfica Carga - Desplazamiento  
LATS3



Datos Generales:	
Espesor de Losa nominal	10 cm
Espesor de losa real	10 cm
Largo	3.00 m
Tipo de Separación para el bambú	2.5*H = 25 cm
Cantidad de Bambú como refuerzo	4 Bambúes
Ancho Nominal	100 cm
Ancho Real	62.5 cm
Estado al momento de efectuarse la prueba:	La losa presentaba grietas longitudinales en todo el claro, producto que al momento del colado no se mantuvo el recubrimiento provisto.
Carga Máxima Resistida / unidad de ancho (b)	1978.04 Kg.

6.5.1.4 Losa tipo LAUS1

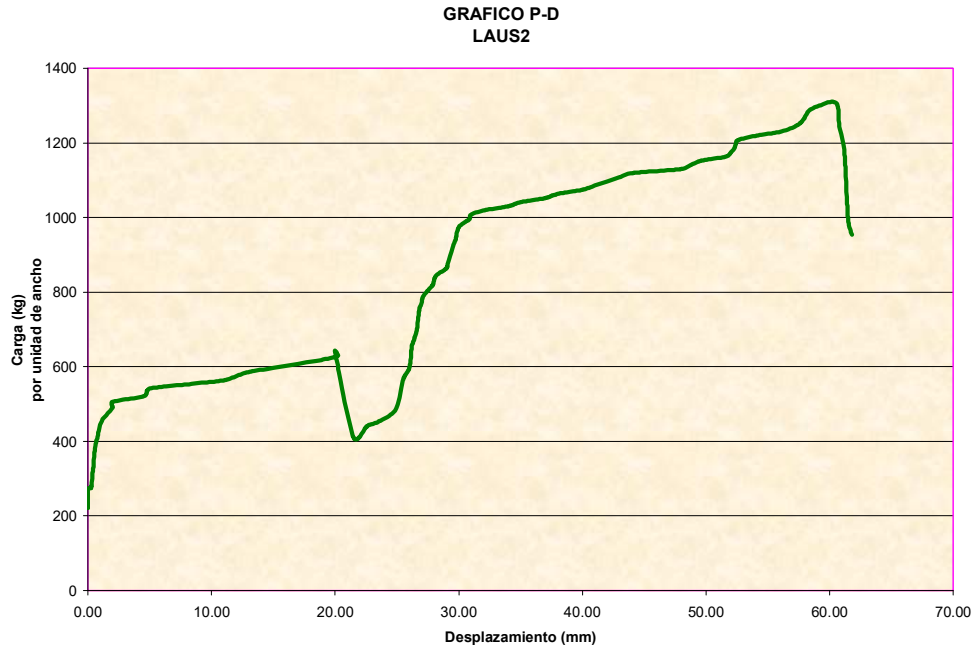
Gráfica 6.4. Gráfica Carga Desplazamiento modelo LAUS1



<b>Datos Generales:</b>	
Espesor de Losa nominal	10 cm
Espesor de losa real	10 cm
Largo	1.50 m
Tipo de Separación para el bambú	$1.5 \cdot H = 15 \text{ cm}$
Cantidad de Bambú como refuerzo	6 Bambúes
Ancho Nominal	100 cm
Ancho Real	60 cm
Estado al momento de efectuarse la prueba:	La losa presentaba grietas longitudinales en todo el claro, producto que al momento del colado no se mantuvo el recubrimiento provisto. Tenía expuesto el bambú sobre la superficie
Carga Máxima Resistida / unidad de ancho (b)	1158.70 Kg

6.5.1.5 Losa tipo LAUS2

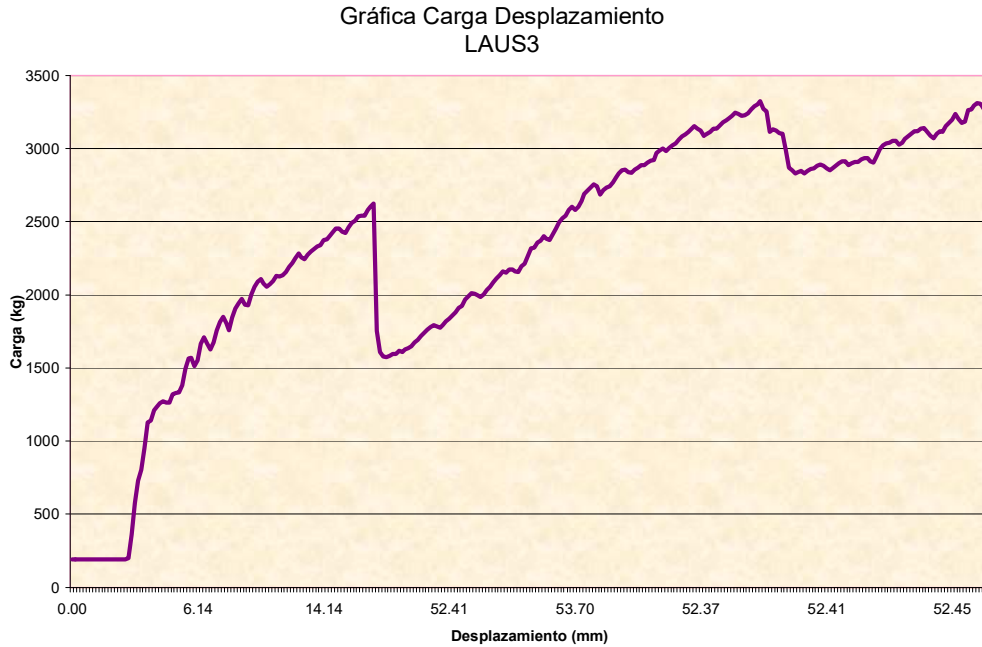
Gráfica 6.5. Gráfica Carga Desplazamiento modelo LAUS2



<b>Datos Generales:</b>	
Espesor de Losa nominal	10 cm
Espesor de losa real	10 cm
Largo	1.50 m
Tipo de Separación para el bambú	$2.0 \cdot H = 20$ cm
Cantidad de Bambú como refuerzo	5 Bambúes
Ancho Nominal	100 cm
Ancho Real	45 cm
Estado al momento de efectuarse la prueba:	La losa presentaba grietas longitudinales en todo el claro, producto que al momento del colado no se mantuvo el recubrimiento provisto.
Carga Máxima Resistida / unidad de ancho (b)	1308.15 Kg

6.5.1.6 Losa tipo LAUS3

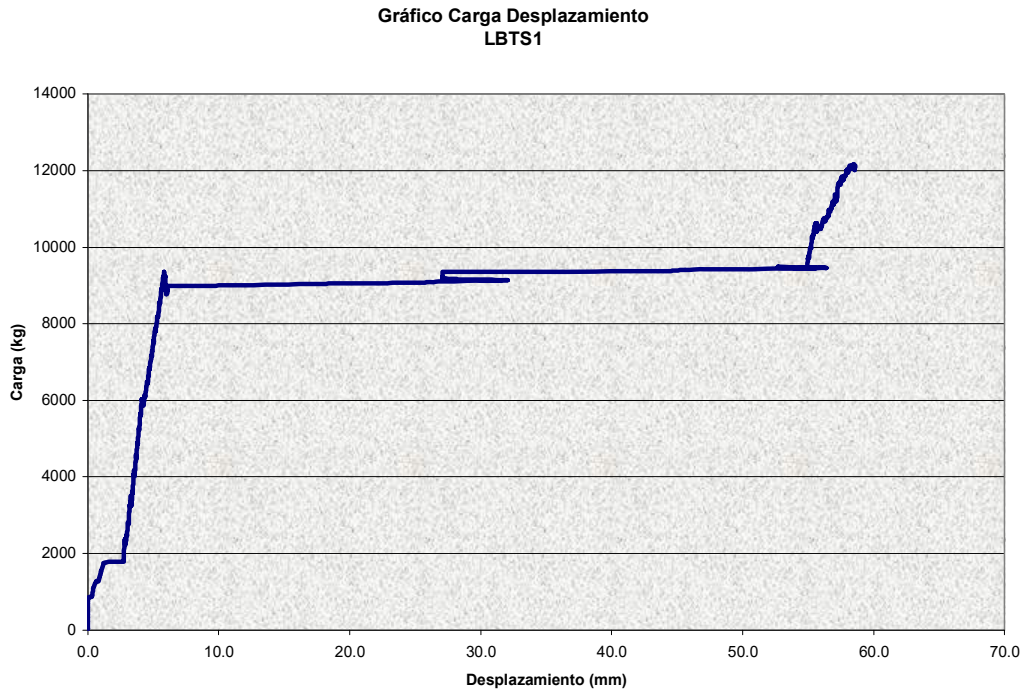
Gráfica 6.6. Gráfica Carga Desplazamiento modelo LAUS3



<b>Datos Generales:</b>	
Espesor de Losa nominal	10 cm
Espesor de losa real	10 cm
Largo	1.50 m
Tipo de Separación para el bambú	$2.5 \cdot H = 25$ cm
Cantidad de Bambú como refuerzo	4 Bambúes
Ancho Nominal	100 cm
Ancho Real	100 cm
Estado al momento de efectuarse la prueba:	La losa presentaba grietas longitudinales en todo el claro, producto que al momento del colado no se mantuvo el recubrimiento provisto.
Carga Máxima Resistida / unidad de ancho (b)	3324.80 Kg

6.5.1.7 Losa tipo LBTS1

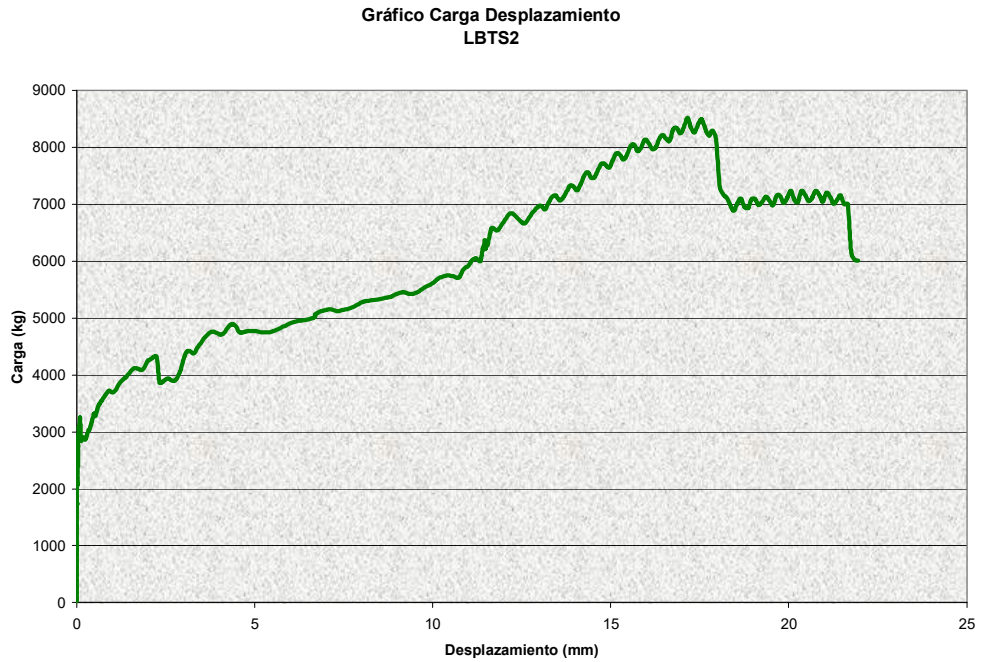
Gráfica 6.7. Gráfica Carga Desplazamiento modelo LBTS1



<b>Datos Generales:</b>	
Espesor de Losa nominal	12.5 cm
Espesor de losa real	15 cm
Largo	3.00 m
Tipo de Separación para el bambú	$1.5 \cdot H = 18.75 \text{ cm}$
Cantidad de Bambú como refuerzo	5 Bambúes
Ancho Nominal	100 cm
Ancho Real	100 cm
Estado al momento de efectuarse la prueba:	Sección completa
Carga Máxima Resistida	12,165.00 Kg

6.5.1.8 Losa tipo LBTS2

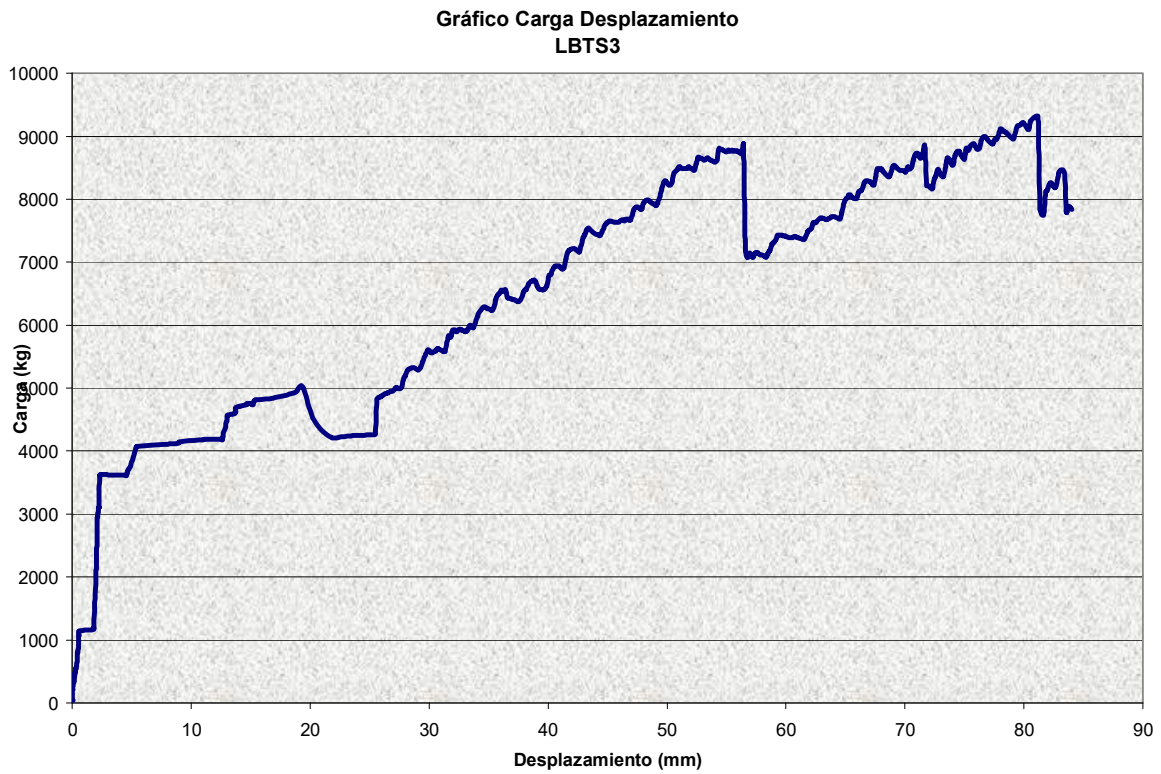
Gráfica 6.8. Gráfica Carga Desplazamiento modelo LBTS2



<b>Datos Generales:</b>	
Espesor de Losa nominal	12.5 cm
Espesor de losa real	15 cm
Largo	3.00 m
Tipo de Separación para el bambú	$2.0 \cdot H = 25 \text{ cm}$
Cantidad de Bambú como refuerzo	4 Bambúes
Ancho Nominal	100 cm
Ancho Real	100 cm
Estado al momento de efectuarse la prueba:	.Sección Completa.
Carga Máxima Resistida	8,519.00 Kg

6.5.1.9 Losa tipo LBTS3

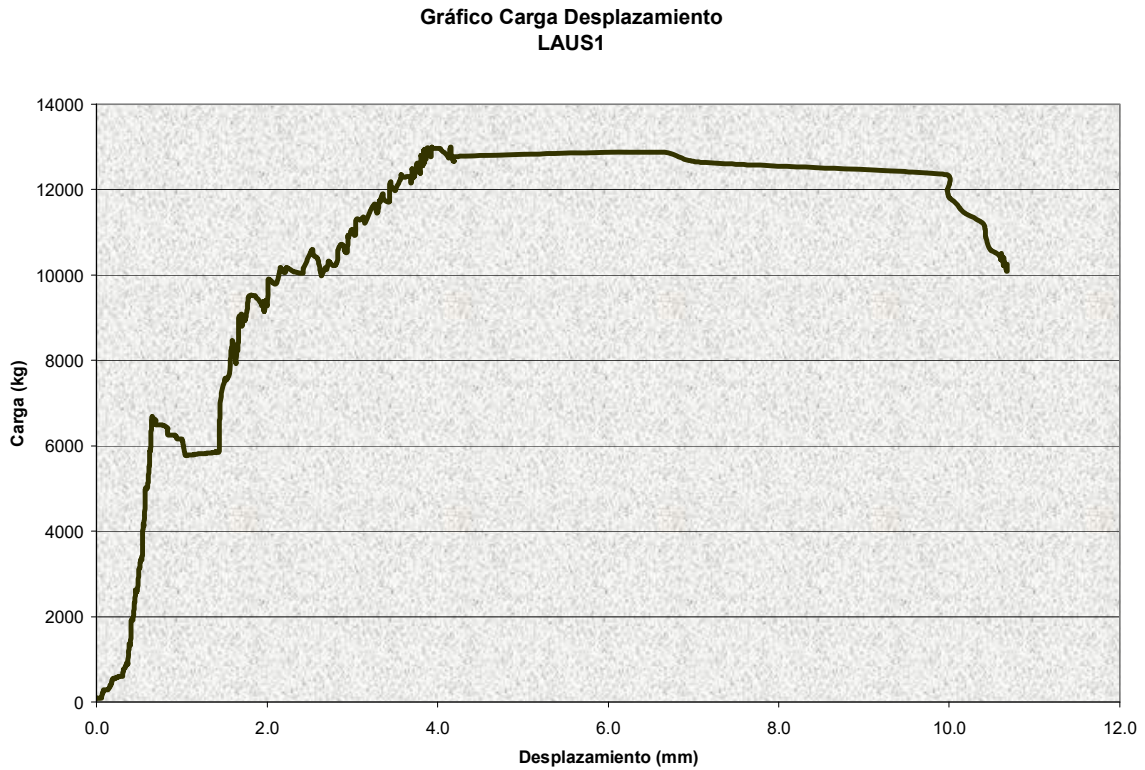
Gráfica 6.9. Gráfica Carga Desplazamiento modelo LBTS3



<b>Datos Generales:</b>	
Espesor de Losa nominal	12.5 cm
Espesor de losa real	15 cm
Largo	3.00 m
Tipo de Separación para el bambú	$2.5 \cdot H = 31.25$ cm
Cantidad de Bambú como refuerzo	3 Bambúes
Ancho Nominal	100 cm
Ancho Real	100 cm
Estado al momento de efectuarse la prueba:	Sección Completa.
Carga Máxima Resistida	9,324.00 Kg

6.5.1.10 Losa tipo LBUS1

Gráfica 6.10. Gráfica Carga Desplazamiento modelo LBUS1

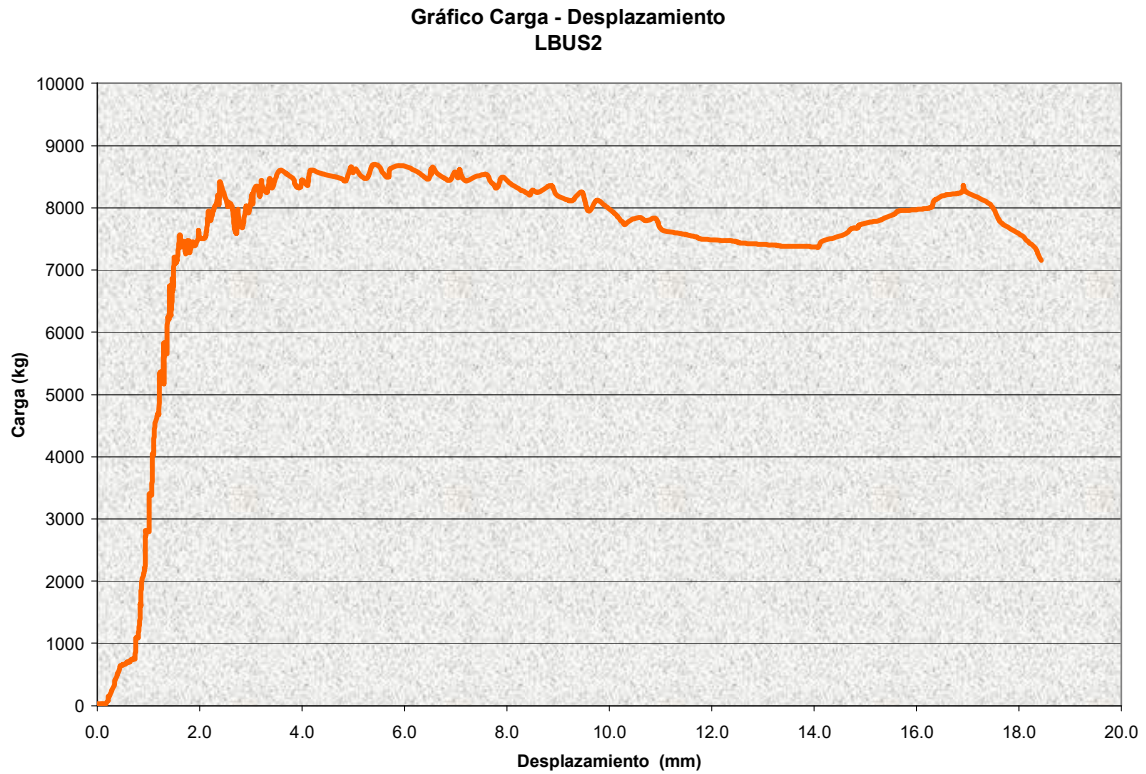


<b>Datos Generales:</b>	
Espesor de Losa nominal	12.5 cm
Espesor de losa real	15 cm
Largo	1.50 m
Tipo de Separación para el bambú	$1.5 \cdot H = 18.75 \text{ cm}$
Cantidad de Bambú como refuerzo	5 Bambúes
Ancho Nominal	100 cm
Ancho Real	100 cm
Estado al momento de efectuarse la prueba:	Sección Completa
Carga Máxima Resistida	12,994 Kg



6.5.1.11 Losa tipo LBS2

Gráfica 6.11. Gráfica Carga Desplazamiento modelo LBUS2

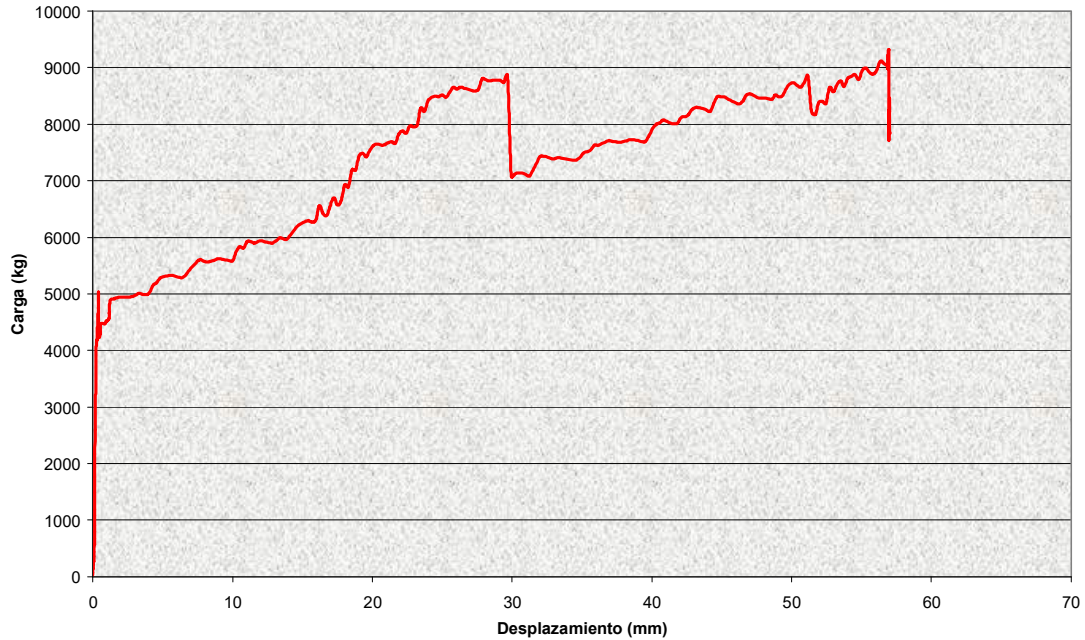


<b>Datos Generales:</b>	
Espesor de Losa nominal	12.5 cm
Espesor de losa real	15 cm
Largo	1.50 m
Tipo de Separación para el bambú	2.0*H = 25 cm
Cantidad de Bambú como refuerzo	4 Bambúes
Ancho Nominal	100 cm
Ancho Real	100 cm
Estado al momento de efectuarse la prueba:	Sección Completa
Carga Máxima Resistida	8,688.00 Kg

6.5.1.12 Losa tipo LBUS3.

Gráfica 6.12. Gráfica Carga Desplazamiento modelo LBUS3

Gráfico Carga - Desplazamiento  
LBUS3

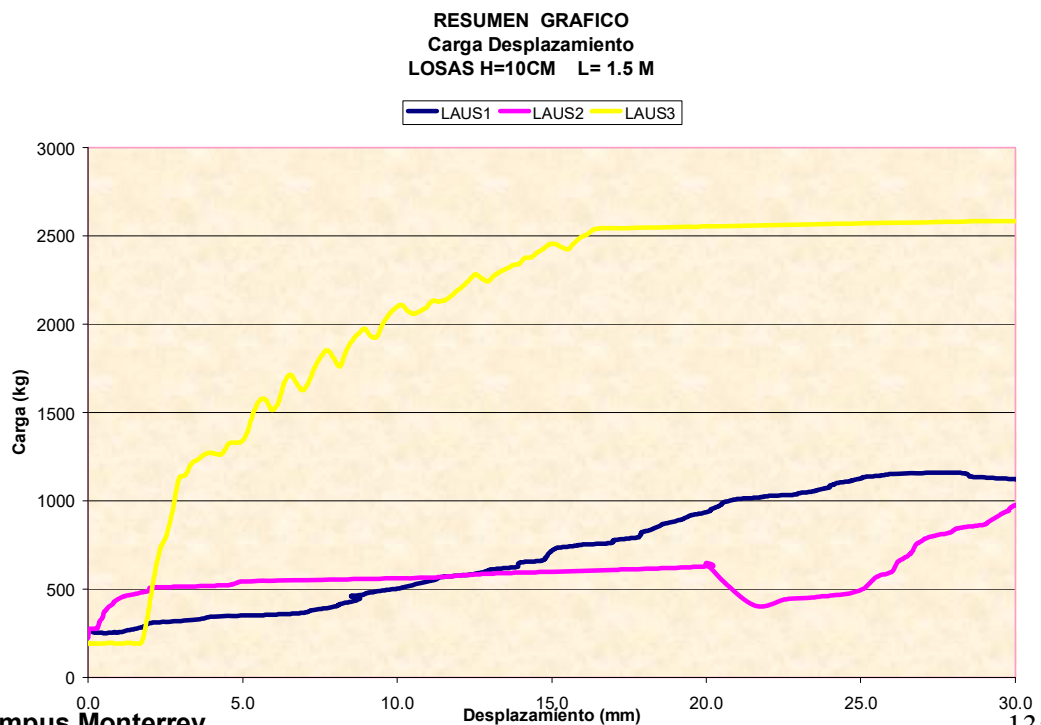
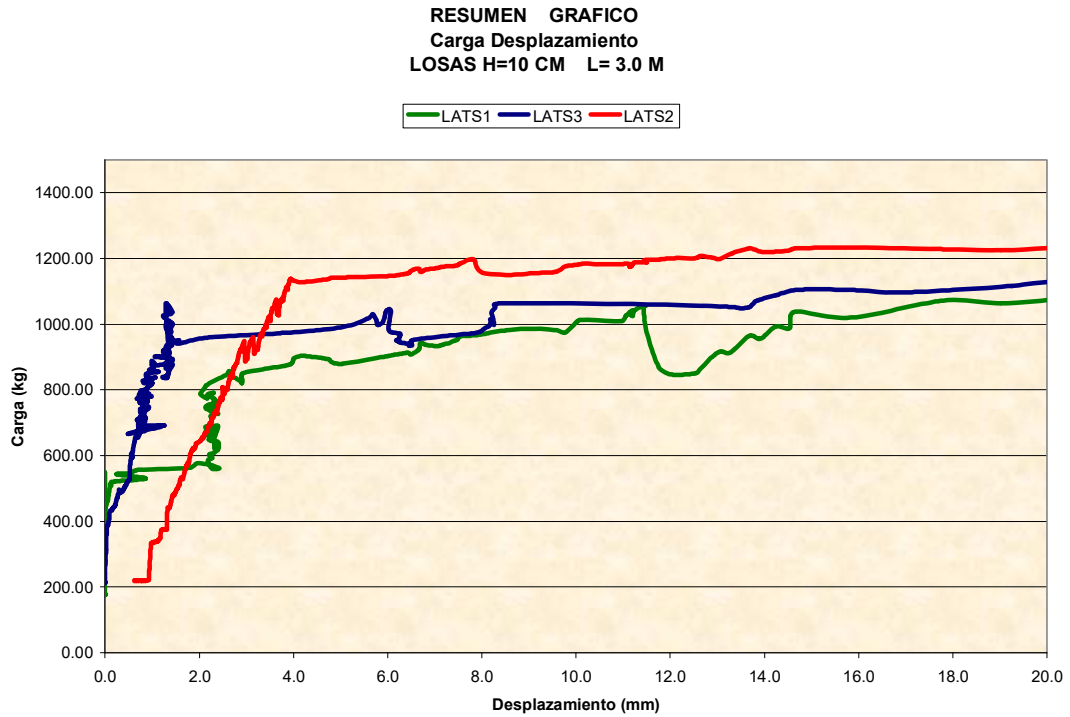


Datos Generales:	
Espesor de Losa nominal	12.5 cm
Espesor de losa real	15 cm
Largo	1.50 m
Tipo de Separación para el bambú	2.5*H = 31.25 cm
Cantidad de Bambú como refuerzo	3 Bambúes
Ancho Nominal	100 cm
Ancho Real	100 cm
Estado al momento de efectuarse la prueba:	Sección Completa
Carga Máxima Resistida / unidad de ancho (b)	9,315.00 Kg

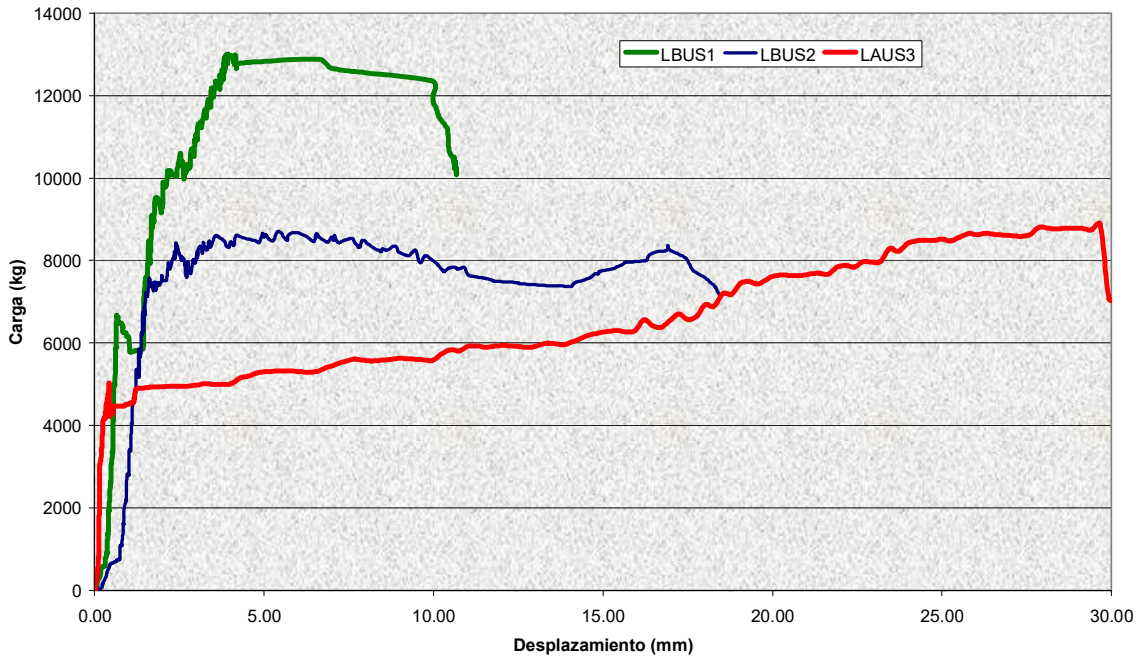
### 6.5.2 Resumen de resultados

A continuación se presenta un resumen gráfico de los resultados obtenidos del ensayo a flexión, asociados al espesor y largo de la losa.

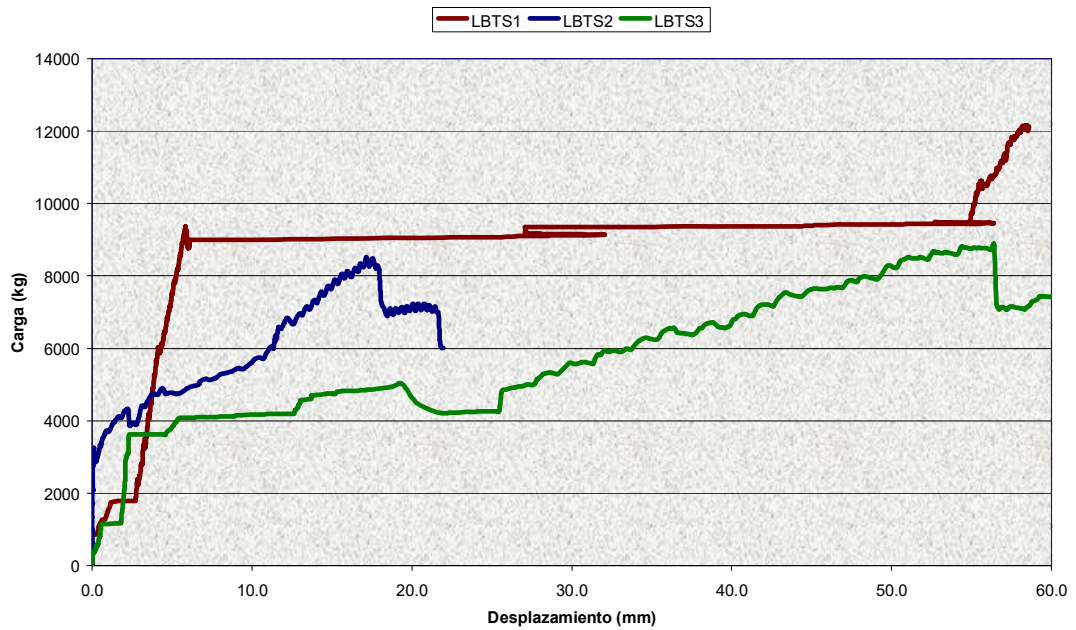
**Gráfica 6.13. Resumen gráfico de Resultados obtenidos del ensayo a flexión**



RESUMEN GRAFICO  
Carga - Desplazamiento  
LOSAS h= 15 cm L= 1.5 M



RESUMEN GRAFICO  
Carga Desplazamiento  
LOSAS h=15 cm L= 3.0 M



Podemos observar que para las losas de 10 cm en tramos de 1.5 metros y 3 metros no existe un patrón definido de comportamiento, ya que las mismas

presentaron algunos detalles al momento de efectuarse la prueba a flexión, como fue la pérdida de sección producto que en algunas losas no se tenía el recubrimiento adecuado o bien el bambú se movió de lugar al momento del colado quedando fuera de la posición establecida en el diseño preliminar.

Sin embargo las losas de 15 cm de espesor, si tienen un patrón de comportamiento bien definido entre los tramos de 1.5 y 3 metros como se puede notar en las gráficas, donde sobresale que las losas que poseen una mayor cuantía de bambú obtuvieron la mayor carga total resistida.

Las losas de 15 cm con menor cuantía de bambú lograron sostener por más tiempo la carga alcanzando las máximas deflexiones.

Es importante mencionar que luego de realizar las pruebas, aquellas losas donde quedaba algún tramo de bambú aparente, se extrajo una muestra del mismo para medir el porcentaje de humedad, dando como resultado en las 5 probetas tomadas un porcentaje de humedad promedio del 26%. Este valor es superior al mostrado en el capítulo anterior donde se caracterizó el bambú y se demostró que el porcentaje de humedad promedio en el bambú del mismo lote era de 11%. Ver Foto 7.



**Foto 6.7. Muestra del bambú después de haber realizado el ensayo a flexión..**

Las fallas registradas en tramos los tramos cortos (1.50 m) de losa fueron por corte mientras que en los tramos largos (3.00 m) se registraron fallas a flexión. Sin embargo todas las losas presentaron la falla por la adherencia entre el bambú y el concreto. Registrándose un deslizamiento máximo de 2 cm.

### ***6.6 Reporte Fotográfico de las pruebas realizadas.***



**Foto 6.8. Sección incompleta de losa de 10 cm de espesor, ensayada a flexión**



**Foto 6.9. Falla por corte en losas de 1.5 metros.**



Foto 6.10. Falla por flexión presentada en losas de 3 metros de Longitud.



Foto 6.11. Grietas longitudinales presentes en las losas de 10 cm de espesor, debido al poco recubrimiento provisto para el bambú.



Foto 6.12. Falla por adherencia del bambú dentro del concreto.



Foto 6.13. Grieta transversal en losa de 15 cm de espesor y reforzada con 5 bambúes. Vista Inferior de la misma.



### 6.7 Resultados de la Falla por adherencia.

Una vez realizadas las pruebas de flexión en las losas se pudo observar un deslizamiento del bambú dentro del concreto, como consecuencia de la pérdida de adherencia entre ambos materiales. A continuación se presenta una tabla resumen de la magnitud de los deslizamientos obtenidos en cada una de las pruebas realizadas, observándose que en la losas de 15 cm de espesor se presentó un mayor deslizamiento en comparación con las losas de 10 cm.

Tabla 6.1. Resultados de la Falla por Adherencia en las losas.

<i>Modelo</i>	<i>Deslizamiento (cm) (a partir del borde de la losa hacia el interior)</i>
LATS1	0.75
LATS2	0.82
LATS3	0.80
LAUS1	1.10
LAUS2	1.05
LAUS3	1.20
LBTS1	1.50
LBTS2	1.65
LBTS3	2.00
LBUS1	1.70
LBUS2	1.80
LBUS3	1.95

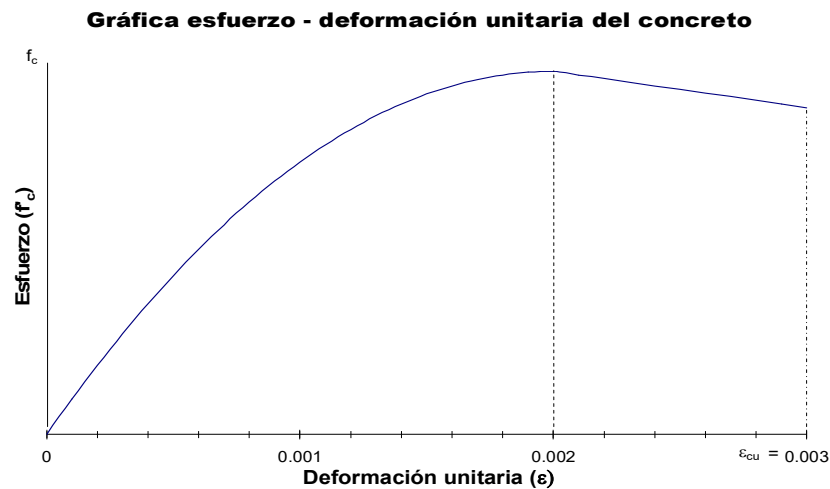
### 6.8 Predicción Teórica de los prototipos.

Una vez obtenidos los resultados del ensayo a flexión de las losas se procedió a establecer un modelo teórico para predecir el comportamiento de los prototipos

bajo condiciones de adherencia completa entre el bambú y el concreto y tomando los valores de resistencia a compresión y tensión del bambú de las pruebas de caracterización realizadas previamente.

El comportamiento de elementos de concreto reforzado sometidos a flexión puede comprenderse de manera más clara mediante el uso de las gráficas que relacionan el momento flexionante resistente en una sección con la curvatura correspondiente.

Este tipo de gráfico requiere un procedimiento iterativo para determinar cuatro puntos relevantes de las gráficas momento – curvatura de secciones transversales rectangulares de concreto reforzado. La magnitud y la posición de la fuerza resultante de compresión en el concreto, después de la etapa elástica, se obtienen mediante el diagrama esfuerzo – deformación unitaria propuesto por Hognestad que considera una curva parabólica en el intervalo  $0 \leq \epsilon_c \leq 0.002$  y una línea recta en el intervalo  $0.002 \leq \epsilon_c \leq 0.004$  y que se presenta en la figura 14. La deformación máxima útil en el concreto se considera  $\epsilon_{cu} = 0.003$ .



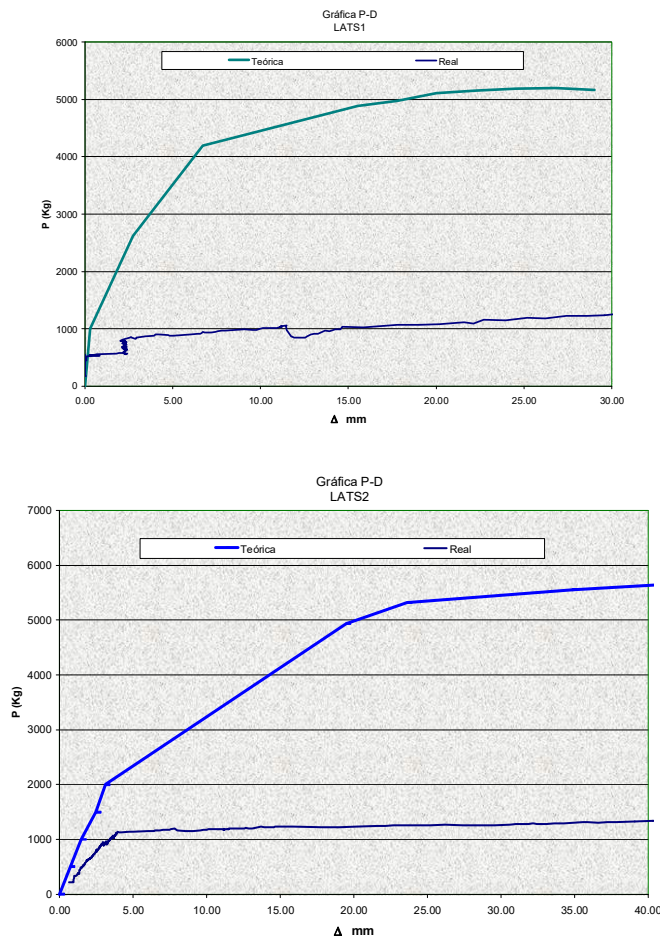
**Gráfica 6.14. Gráfica Esfuerzo – Deformación Unitaria del concreto**

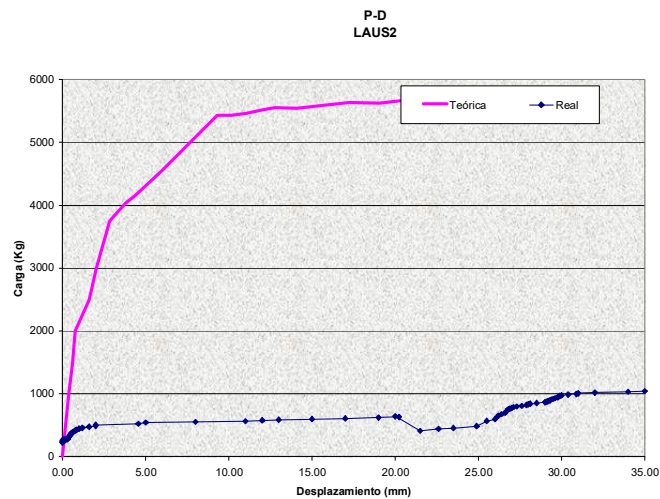
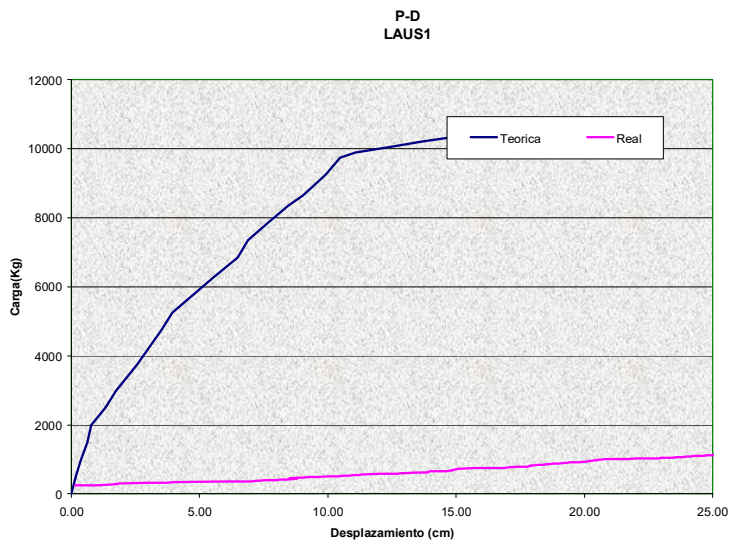
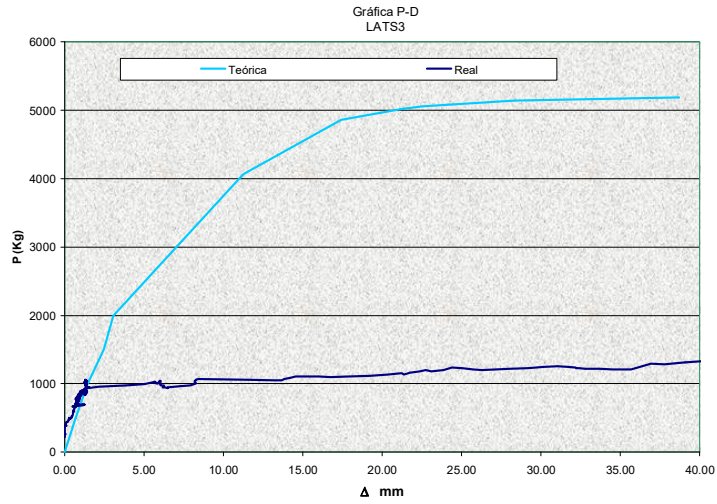
En cada uno de los puntos por determinar, el procedimiento consiste en suponer el valor de la deformación unitaria para las condiciones estudiadas y mediante el procedimiento de tanteos, obtener la profundidad del eje neutro que cumple con las condiciones del equilibrio de fuerzas.

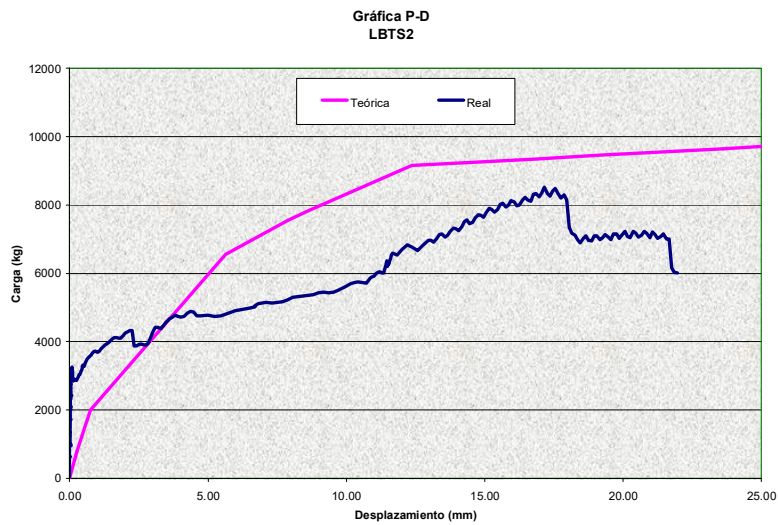
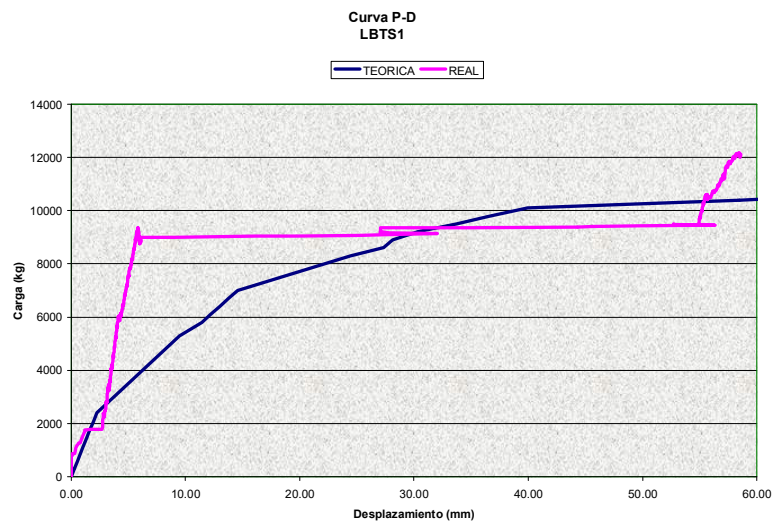
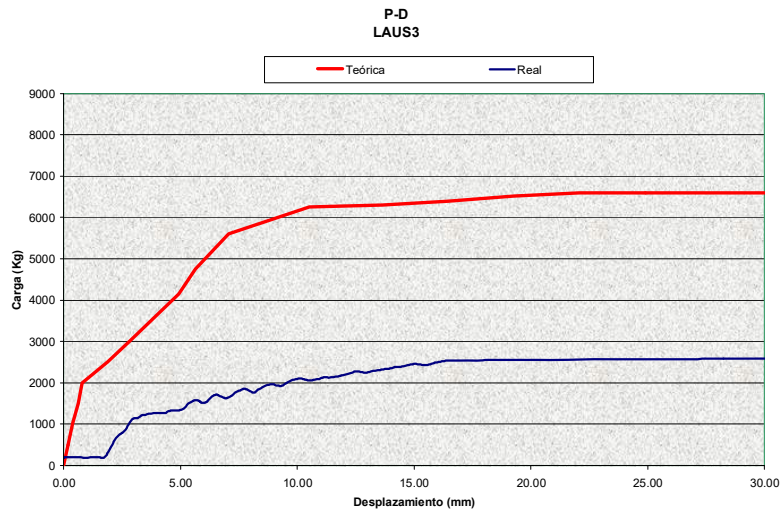
Una vez establecidas las gráficas momento – curvatura para cada modelo se calcularon las deflexiones al centro del claro de cada modelo utilizando los conceptos de trabajo virtual y los gráficos teóricos momento- curvatura planteados anteriormente. De esta forma se obtuvieron los gráficos carga – desplazamientos teóricos para cada modelo.

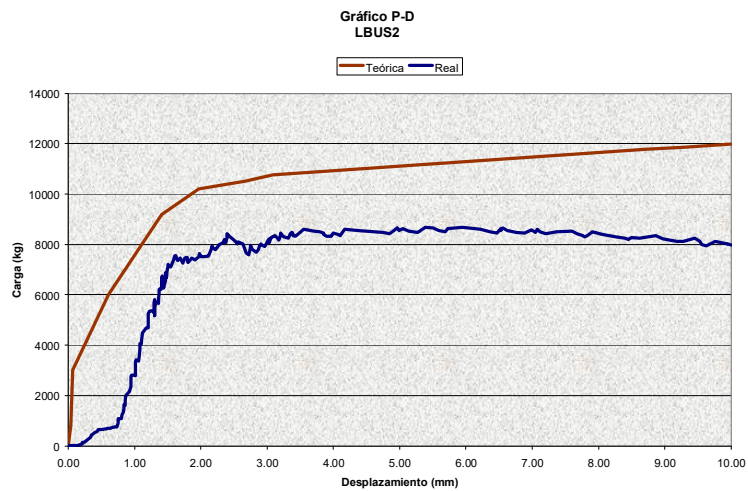
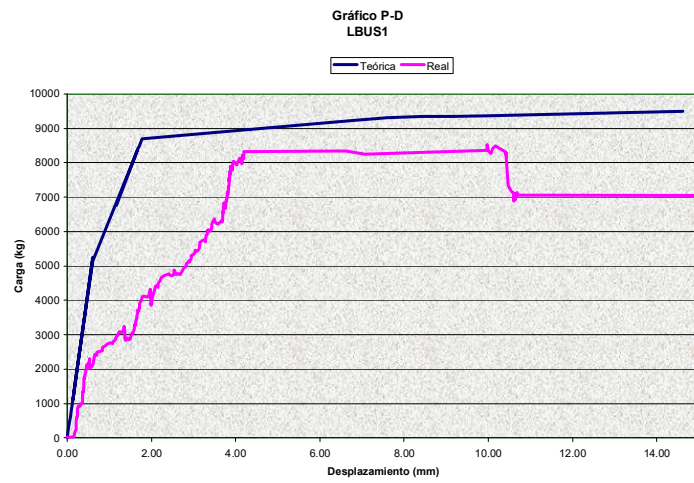
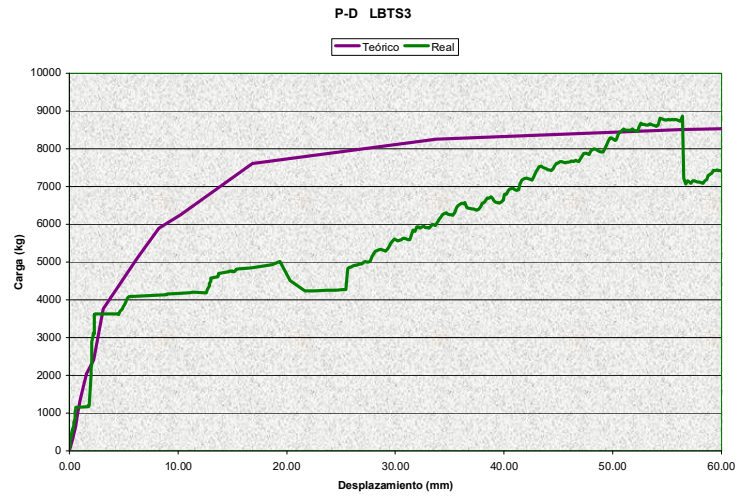
A continuación se muestran las tablas comparativas entre los resultados teóricos esperados y los resultados reales obtenidos de las pruebas experimentales.

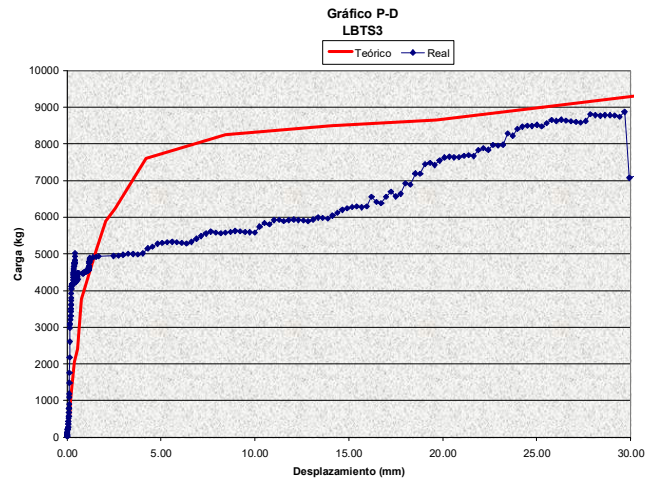
**Gráfica 6.15. Gráficos comparativos del modelo teórico vs valores experimentales.**











De los resultados anteriores podemos notar que las losas de 10 cm no presentaron un comportamiento adecuado debido a que las secciones ya presentaban grietas longitudinales lo que provocó que la sección no trabajara de manera completa sino más bien por secciones de concreto efectiva.

En general las secciones con más bambú de refuerzo presentaron un mejor comportamiento estructural que las de menor cuantía.

Los modelos teóricos para las losas de 15 cm presentan algunas diferencias con los resultados experimentales obtenidos debido a la pérdida de adherencia del bambú con el concreto lo que hace que el sistema presente menos resistencia que la esperada.

### 6.9 Modelo de Corte en Losas compuestas

Finalmente, a partir de los datos obtenidos experimentalmente se logró establecer una relación entre el cortante último y las propiedades de las secciones geométricas de los modelos propuestos, aplicando el modelo de Porter (1976).

Recordemos que los valores dependientes (X) se obtienen de la relación:

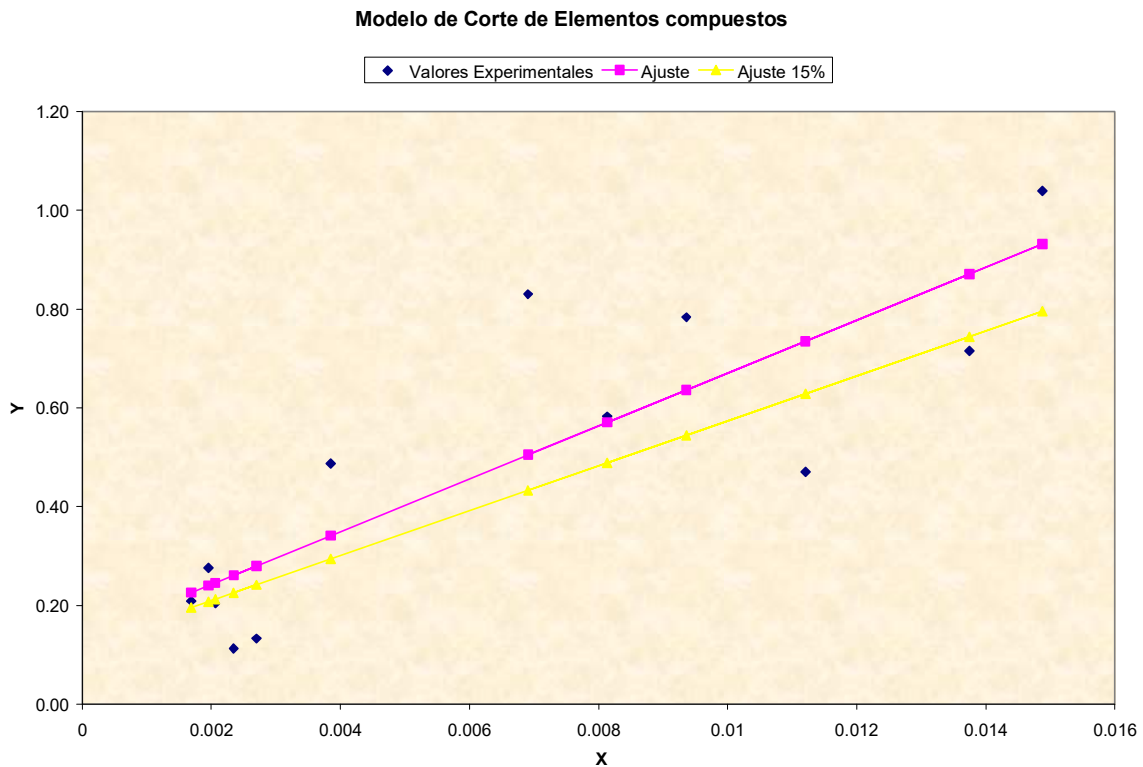
$$\frac{\rho d}{L' \sqrt{f'c}}$$

Y la variable independiente (Y):

$$\frac{V_e s}{bd\sqrt{f'c}}$$

Cada uno de estos parámetros, fueron descritos en el Capítulo 5.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación:



Y la expresión matemática que relaciona ambas variables es:

$$V_u = \frac{bd}{s} \left( \frac{45.5 \rho d}{L'} + 0.12 \sqrt{f'c} \right)$$



## Capítulo VII

### Análisis de Costos

#### 7.1 Introducción

Para complementar la propuesta desarrollada en esta investigación, determinamos la factibilidad económica de la propuesta, ya que, dicha factibilidad es un punto importante en cuanto a la implementación se refiere y mas aún, si la finalidad de ésta es llegar a dar un servicio a nivel social.

Para la determinación de la factibilidad económica de la propuesta que se hace en el presente trabajo, se analizaron los costos directos de la construcción las losas alveolares propuestas, adicionando al final cierto porcentaje de costos indirectos, tanto de operación como de campo dependiendo si es un sistema de autoconstrucción o prefabricación.

Es importante aclarar que todo concepto en el apartado de materiales se asumió que están presentes en el lugar de fabricación de las losas, no incluye ningún tipo de transporte ni de curado en el caso del bambú. El bambú utilizado en el presente análisis es *Guadua Angustifolia*.

Los rendimientos de la mano de obra se definieron en base a observación y criterios definidos por obreros especializados en el área. Además se cuenta con el equipo necesario para una producción a gran escala.

Al final del Capítulo, se muestra una tabla comparativa en cuanto al costo con un sistema de losas con sonotubos y reforzadas con acero de refuerzo convencional a flexión; que se encuentran actualmente en el mercado mundial.

#### 7.2 Integración de costos directos

A continuación se presentan las tablas de la integración de los costos directos de 6 de los 12 prototipos realizados. Es importante aclarar que en las siguientes tablas se asume que se cuenta con una plantación de bambú, por lo que el costo del tramo de 3 metros de bambú es mínimo. De igual forma como se plantea un sistema prefabricado, al costo de la cimbra propuesta es considerando la reutilización de la misma.

**Tabla 7.1. Integración de costos directos para losas con espesor de 10 cm.**

A. Losa de 10 cm de espesor, L = 3.00 m y separación entre bambúes de 1.5\*H

<b>Materiales</b>				
Concepto	Cantidad	Unidad	Costo Unitario	Importe
Bambú	18.00	ml	27.00	486.00
Concreto Premezclado	0.29	m <sup>3</sup>	1149.94	331.44
Clavos	0.30	Kg	28.00	8.40
Cimbra	8.00	ml	9.44	75.49
<b>Importe de Materiales</b>				<b>\$901.33</b>

<b>Mano de Obra</b>				
Concepto	Cantidad	Unidad	Costo Unitario	Importe
Albañil	0.1	Jor	300.00	30.00
Ayudante de albañil	0.1	Jor	220.00	22.00
Carpintero	0.12	Jor	288.00	34.56
Ayudante de carpintero	0.12	Jor	220.00	26.40
<b>Importe Mano de Obra</b>				<b>\$112.96</b>

<b>COSTO DIRECTO TOTAL</b>	<b>\$1014.29</b>
----------------------------	------------------

B. Losa de 10 cm de espesor, L = 3.00 m y separación entre bambúes de 2.0\*H

<b>Materiales</b>				
Concepto	Cantidad	Unidad	Costo Unitario	Importe
Bambú	15.00	ml	27.00	405.00
Concreto Premezclado	0.29	m <sup>3</sup>	1149.94	333.69
Clavos	0.30	Kg	28.00	8.40
Cimbra	8.00	ml	9.44	75.49
<b>Importe de Materiales</b>				<b>\$ 822.59</b>

<b>Mano de Obra</b>				
Concepto	Cantidad	Unidad	Costo Unitario	Importe
Albañil	0.1	Jor	300.00	30.00
Ayudante de albañil	0.1	Jor	220.00	22.00
Carpintero	0.12	Jor	288.00	34.56
Ayudante de carpintero	0.12	Jor	220.00	26.40
<b>Importe Mano de Obra</b>				<b>\$ 112.96</b>

<b>COSTO DIRECTO TOTAL</b>	<b>\$935.55</b>
----------------------------	-----------------

C. Losa de 10 cm de espesor, L = 3.00 m y separación entre bambúes de 2.5\*H

<b>Materiales</b>				
Concepto	Cantidad	Unidad	Costo Unitario	Importe
Bambú	12.00	ml	27.00	324.00
Concreto Premezclado	0.29	m <sup>3</sup>	1149.94	335.95
Clavos	0.30	Kg	28.00	8.40
Cimbra	8.00	ml	9.44	75.49
<b>Importe de Materiales</b>				<b>\$ 743.84</b>

<b>Mano de Obra</b>				
Concepto	Cantidad	Unidad	Costo Unitario	Importe
Albañil	0.1	Jor	300.00	30.00
Ayudante de albañil	0.1	Jor	220.00	22.00
Carpintero	0.12	Jor	288.00	34.56
Ayudante de carpintero	0.12	Jor	220.00	26.40
<b>Importe Mano de Obra</b>				<b>\$ 112.96</b>

<b>COSTO DIRECTO TOTAL</b>	<b>\$856.80</b>
----------------------------	-----------------

**Tabla 7.2. Integración de costos directos para losas con espesor de 15 cm.**

A. Losa de 15 cm de espesor, L = 3.00 m y separación entre bambúes de 1.5\*H

<b>Materiales</b>				
Concepto	Cantidad	Unidad	Costo Unitario	Importe
Bambú	15.00	ml	27.00	405.00
Concreto Premezclado	0.44	m <sup>3</sup>	1149.94	509.39
Clavos	0.30	Kg	28.00	8.40
Cimbra	8.00	ml	9.44	75.52
<b>Importe de Materiales</b>				<b>\$ 998.31</b>

<b>Mano de Obra</b>				
Concepto	Cantidad	Unidad	Costo Unitario	Importe
Albañil	0.1	Jor	300.00	30.00
Ayudante de albañil	0.1	Jor	220.00	22.00
Carpintero	0.12	Jor	288.00	34.56
Ayudante de carpintero	0.12	Jor	220.00	26.40
<b>Importe Mano de Obra</b>				<b>\$ 112.96</b>

<b>COSTO DIRECTO TOTAL</b>	<b>\$1111.27</b>
----------------------------	------------------

B. Losa de 15 cm de espesor, L = 3.00 m y separación entre bambúes de 2.0\*H

<b>Materiales</b>				
Concepto	Cantidad	Unidad	Costo Unitario	Importe
Bambú	12.00	ml	27.00	324.00
Concreto Premezclado	0.44	m <sup>3</sup>	1149.94	511.00
Clavos	0.30	Kg	28.00	8.40
Cimbra	8.00	ml	9.44	75.52
<b>Importe de Materiales</b>				<b>\$ 918.92</b>

<b>Mano de Obra</b>				
Concepto	Cantidad	Unidad	Costo Unitario	Importe
Albañil	0.1	Jor	300.00	30.00
Ayudante de albañil	0.1	Jor	220.00	22.00
Carpintero	0.12	Jor	288.00	34.56
Ayudante de carpintero	0.12	Jor	220.00	26.40
<b>Importe Mano de Obra</b>				<b>\$ 112.96</b>

<b>COSTO DIRECTO TOTAL</b>	<b>\$1031.88</b>
----------------------------	------------------

C. Losa de 15 cm de espesor, L = 3.00 m y separación entre bambúes de 2.5\*H

<b>Materiales</b>				
Concepto	Cantidad	Unidad	Costo Unitario	Importe
Bambú	9.00	ml	27.00	243.00
Concreto Premezclado	0.45	m <sup>3</sup>	1149.94	512.62
Clavos	0.30	Kg	28.00	8.40
Cimbra	8.00	ml	9.44	75.52
<b>Importe de Materiales</b>				<b>\$ 839.54</b>

<b>Mano de Obra</b>				
Concepto	Cantidad	Unidad	Costo Unitario	Importe
Albañil	0.1	Jor	300.00	30.00
Ayudante de albañil	0.1	Jor	220.00	22.00
Carpintero	0.12	Jor	288.00	34.56
Ayudante de carpintero	0.12	Jor	220.00	26.40
<b>Importe Mano de Obra</b>				<b>\$ 112.96</b>

<b>COSTO DIRECTO TOTAL</b>	<b>\$952.50</b>
----------------------------	-----------------

Con la finalidad de tener una panorámica mas clara de los costos directos determinados en las tablas anteriores, se presenta la Tabla 3 que resume los resultados obtenidos para los diferentes prototipos.

Tabla 7.3. Resumen del análisis de costos

Modelo	Costo Directo Total
LATS1	\$ 1,014.29
LATS2	\$ 935.55
LATS3	\$ 856.80
LBTS1	\$ 1,111.27
LBTS2	\$ 1,031.88
LBTS3	\$ 952.50

Tal como se explicó anteriormente, los costos que se muestran son el resultado del análisis realizado asumiendo que se cuenta con una plantación de bambú, capaz de soportar la demanda de una producción a gran escala. Sin embargo, es importante hacer una comparación de costos cuando no se cuenta con tal plantación ya que el costo se ve afectado.

### 7.3 Comparativa de costos

Es importante realizar una comparativa general del costo de la propuesta que se plantea en este trabajo de investigación con sistemas que actualmente se están implementando en la industria de la construcción, por lo que a continuación se muestra una tabla comparativa con el sistema de losas alveolares con sonotubos y reforzado con acero convencional a flexión, considerando que para cada modelo experimental ambos sistemas constructivos soportarán la misma resistencia última a flexión.



Tabla 7.4. Comparativa De Costos

Concepto	Concreto + Bambú	Concreto + Sonotubo + Acero
Losa de 10 cm de espesor con 6 alvéolos	\$ 1,014.29	\$ 1200.81
Losa de 10 cm de espesor con 5 alvéolos	\$ 935.55	\$ 1151.63
Losa de 10 cm de espesor con 4 alvéolos	\$ 856.80	\$ 1102.46
Losa de 15 cm de espesor con 5 alvéolos	\$ 1,111.27	\$ 1565.54
Losa de 15 cm de espesor con 4 alvéolos	\$ 1,031.88	\$ 1506.74
Losa de 15 cm de espesor con 3 alvéolos	\$ 952.50	\$ 1447.33

\* Los costos presentados en la tabla anterior incluyen en ambos caso la mano de obra.

Como podemos observar en la Tabla 4, el sistema propuesto de losas reforzadas con bambú tiene un costo de aplicación menor que un sistema equivalente bajo las mismas condiciones de resistencia y diseño. Sin embargo, estos costos pueden afectarse por factores como el transporte del bambú, que en este caso en particular se consideró no tomar en cuenta este rubro en los costos.

El sistema propuesto en esta investigación, al ser un sistema prefabricado requiere un estricto control de calidad para garantizar que el sistema funcione eficientemente en condiciones de resistencia y servicio.

## Capítulo VIII

### Conclusiones y Recomendaciones

#### 8.1 Conclusiones:

1. La Guadua es un bambú, y es uno de los materiales de construcción más resistentes, y diversos productos elaborados a partir de la Guadua, están siendo usados en varias aplicaciones.
2. Generalmente, se podría considerar a la Guadua como un material ortotrópico, es decir, tiene propiedades mecánicas particulares en las tres direcciones: longitudinal, radial y tangencial.
3. Sin embargo, la Guadua también es un material orgánico y está sujeta a una gran variabilidad, debido a varias condiciones, como la edad de crecimiento, genética, estación climática, el suelo y condiciones medioambientales, así como la localización del culmo en el tallo de la Guadua.
4. Una vez realizadas las pruebas de caracterización mecánica de la Guadua se obtuvieron los siguientes resultados:
  - Se realizaron dos pruebas de contenido de humedad, donde las condiciones ambientales al momento de realizar la prueba influyeron en los resultados obtenidos. En la primera prueba el resultado obtenido fue de 26% de contenido de humedad promedio y un segundo set de pruebas realizadas en fecha posterior dio como resultado un contenido de humedad promedio de 11%.

- La Resistencia a compresión promedio obtenido fue de  $484 \text{ Kg/cm}^2$ , las muestras ensayadas tenían un contenido de humedad promedio del 11%.
  - El Módulo de Elasticidad a Compresión promedio obtenido fue de  $324,457 \text{ Kg/cm}^2$ , y la deformación unitaria promedio a compresión de las muestras ensayadas fue de 0.0025.
  - El Esfuerzo cortante directo obtenido por la prueba de corte directo es de  $42 \text{ Kg/cm}^2$ , donde las muestras que tenían nudo en el largo de prueba no mostraban diferencias significativas de resistencias respecto aquellas muestras que no tenían nudo.
  - El Esfuerzo a tensión indirecto producido por Flexión es de  $692 \text{ Kg/cm}^2$ . Cabe destacar que la falla fue por cortante en la dirección longitudinal del elemento, el esfuerzo obtenido es el equivalente a  $M^*y / I$ ; y con los resultados obtenidos de esta prueba se pudo calcular el Módulo de Elasticidad a Flexión promedio el cual fue de  $147,618 \text{ Kg/cm}^2$ .
  - El Esfuerzo a Tensión directo obtenido fue de  $1,204 \text{ Kg/cm}^2$ . El Módulo de Elasticidad a Tensión fue de  $708,235 \text{ Kg/cm}^2$  y la deformación unitaria a tensión obtenida fue de 0.0017.
5. Los resultados obtenidos de las pruebas de caracterización de la Guadua, muestran un comportamiento elástico ya que recupero su forma original luego de la falla.
6. Con los resultados obtenidos del ensayo a compresión de la Guadua, se logró normalizar los valores obtenidos de las muestras y proponer un

modelo matemático de ajuste de orden cúbico de esfuerzo – deformación en la caracterización del bambú en compresión.

$$\frac{f}{f'_b} = \left( \frac{E_s}{E_b} - 2 \right) \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon'_b} \right)^3 + \left( 3 - 2 \left( \frac{E_s}{E_b} \right) \right) \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon'_b} \right)^2 + \left( \frac{E_s}{E_b} \right) \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon'_b} \right)$$

7. Se logró establecer una relación entre el Módulo de Elasticidad a compresión en el bambú y su resistencia a compresión:

$$E_b = 15197 \sqrt{f'_b}$$

Donde podemos observar que el valor obtenido experimentalmente como factor de correlación es muy parecido al utilizado en el diseño de concreto reforzado para calcular el Módulo de Elasticidad de concreto a partir de su resistencia a Compresión:

$$E_c = 15100 \sqrt{f'_c}$$

8. La falla por tensión en el bambú se presenta de manera frágil, tal y como se pudo comprobar experimentalmente, y muestra un comportamiento lineal hasta la falla.
9. Se logró establecer una relación entre el Módulo de Elasticidad a tensión en el bambú y su resistencia a tensión:

$$E_{tb} = 20019 \sqrt{f_{tb}}$$

Donde podemos observar que el valor obtenido experimentalmente como factor de correlación no es parecido al utilizado en el diseño de concreto reforzado para calcular el Módulo de Elasticidad a tensión de concreto, el cual podemos calcular aproximadamente como del 8% al 12% de su resistencia a compresión.

10. Los valores obtenidos de las pruebas de caracterización desarrolladas en este estudio difieren con los resultados obtenidos en estudios anteriores en las pruebas de compresión, los resultados se resumen a continuación:

**Tabla 8.1. Resultados de la Comparación de las Pruebas de Compresión.**

	Prueba 1 Compresión (299.99 )	Prueba 2 Compresión (484.24)
Prueba Compresión Estudio Previo 473 kg/ cm <sup>2</sup>	W=71  p-value= 0.0003	W= 171  p-value= 0.7928
Prueba 1 Compresión		W= 76 p-value= 0.0001

Se observa que hay diferencia significativa entre las pruebas 1 y 2 y para la prueba 1 y la prueba del estudio previo, se cree que dicha diferencia se debe al contenido de humedad para cada prueba. De ahí que se observa que las medianas entre la prueba 2 y el estudio previo para la compresión no son significativamente diferentes (p-value = 0.7928), tal vez se deba a que es menor la diferencia en el contenido de humedad, 11% y 8% respectivamente, que entre la prueba 1 que es de 26% .

Por ello se tiene la hipótesis de que la humedad presente en la primera prueba afectó las propiedades de resistencia del bambú en compresión al presentar menos resistencia que las muestras ensayadas el día de prueba 2. Por lo anterior se realizó un análisis de covarianza para probar dicha hipótesis. Los resultados del análisis de covarianza muestra que el Contenido de humedad no influye de manera lineal a la compresión a la fibra de manera significativa (p-value=0.192).

11. El Bambú utilizado para la realización de este estudio fue tomado de la Región de Veracruz, México; distinto al lugar donde se obtuvo el bambú ensayado para las pruebas de caracterización anterior que fue en Tabasco, México.

12. La carga de falla máxima obtenida de todas las pruebas realizadas en las losas es de 12 toneladas aproximadamente, en el modelo de losa de 15 cm de espesor con una cuantía de bambú menor ( $S_3: 3.0 \cdot H$ ).
13. También se observó que el arreglo constructivo no influye en las respuestas obtenidas de las resistencias de las losas propuestas.
14. El proveer un recubrimiento adecuado en las losas es un factor determinante para garantizar un comportamiento adecuado y evitar prematuras fisuraciones en las mismas.
15. En cuanto al sistema constructivo, la separación de los bambúes dentro de las losas es un factor determinante en la respuesta del sistema, ya que mientras más cuantía contenga el prototipo, mejor comportamiento en losas de espesor 15 cm.
16. Sin embargo en losas de 10 cm podemos decir que este comportamiento no se mantiene y la evidencia encontrada demuestra que el bambú puede absorber el agua del concreto y perder resistencia, así como afectar las propiedades mecánicas del concreto. Es por ello que en las losas de menor espesor no se pudo alcanzar la carga por agrietamiento del concreto a tensión.
17. La implementación de una industria de fabricación de losas alveolares reforzadas con bambú a flexión como los propuestos en esta investigación, económicamente es factible si se cuenta con una plantación de bambú propia o si se presenta alguna negociación con los propietarios de las plantaciones, que igualmente pueda garantizar una estandarización en el proceso de cultivo y preservado del bambú para que propiedades como la humedad no afecten significativamente su respuesta mecánica al trabajar de manera compuesta con otros materiales como el concreto.

## 8.2 Recomendaciones:

1. El modelo de predicción de  $P-\Delta$  es válido solamente si en el proceso de diseño se consideran acciones tendientes a controlar la humedad y el volumen dentro de la matriz de concreto, y se garantiza la adherencia entre la guadua y el concreto.
2. Se propone la recopilación de todos los datos obtenidos en las distintas fuentes citadas en esta investigación, y generar las siguientes correlaciones:
  - a. contenido de humedad versus resistencia (compresión, tensión, flexión y cortante),
  - b. resistencia a la compresión perpendicular versus resistencia a la compresión paralela,
  - c. resistencia a la compresión paralela versus resistencia a la tensión paralela,
  - d. resistencia a la tensión paralela versus módulo de elasticidad a la tensión,
  - e. resistencia a corte versus resistencia a la flexión.

La visualización de los datos generales promedios permiten predecir una adecuada proporcionalidad, y se brindaría una herramienta de caracterización de propiedades mecánicas (resistencia última) al área del diseño de estructuras con *Guadua Angustifolia*.

3. Realizar un estudio de la aceptación social de viviendas utilizando losas prefabricadas alveolares reforzadas con bambú a flexión.

4. Tomar en cuenta los efectos de contracción plástica del concreto al interactuar con el bambú de manera de proveer un refuerzo mínimo por temperatura en los prototipos.
5. Se recomienda aplicar sistemas que garanticen una adherencia completa entre el bambú y el concreto sin afectar las propiedades mecánicas de ambos materiales.
6. Hacer consideraciones del tiempo de vida del material, mantenimiento de la estructura y reparación en caso de ser necesario.



## Referencias Bibliográficas

A. Miranda. Estudio experimental de paneles reforzados con bambú para viviendas de Interés Social. Tesis ITESM 2005.

A.C. Chaves De Soto. Fifteen years of bamboo integrated development in Costa Rica: A personal View. Bamboo for Sustainable development. pp 43-48.

ACI 209 R-95. Creep and shrinkage prediction model (Model B3). American Concrete Institute, Detroit, MI, USA, 1995.

ARBELAEZ A., A.; RODRÍGUEZ, S.; HURTADO, A.; “Investigaciones sobre Guadua Angustifolia Kunth realizadas en Colombia (1950 – 2000)”. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Corporación Autónoma Regional del Quindío CRQ. Medellín, 2001, 92p.

ARBELÁEZ, A. La estructura morfológica del culmo de la Guadua Angustifolia Kunth. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Ciencias Agrícolas, 1998, p. 3-18.

ASF-E ARQUITECTOS SIN FRONTERAS. S.f. Viviendas de bajo coste en América Latina: Viviendas Hogar de Cristo. Guayaquil, Ecuador. La vivienda de madera y guadua en los esteros. Info 16. [http://www.asfes.org/info/Info\\_16/Info16\\_06.htm](http://www.asfes.org/info/Info_16/Info16_06.htm)

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA - LA RED 2001. Manual de construcción sismo resistente de viviendas en bahareque encementado. [http://www.desenredando.org/public/libros/2001/csrvbe/guadua\\_lared.pdf](http://www.desenredando.org/public/libros/2001/csrvbe/guadua_lared.pdf)

Bamboo in building structures: Janssen, J.J.A. 1981, PhD Thesis, Eindhoven University of Technology, Holland.

BASTIDAS P, Lucy Amparo. y Edgar Flores B. Uso del Bambú en vivienda para estratos medios. El Bambú como material Estructural en losas de entrepiso. 2000

BERNAL, Carlos (S/F) Técnicas de bambú ahumado.

CÁRDENAS, AM; Mesa, MB; del Coral, M. Escuela de Ingeniería de Antioquia, Colombia. S.f.

<http://materiales.eia.edu.co/ciencia%20de%20los%20materiales/articulo-Guadua.htm>

CARMÍOL, V. 1998. Muebles en Bambú, *Phyllostachys aurea*. Manual de construcción. Editorial Tecnológica de Costa Rica. 169 p.

CASTRILLON, M. y MALAVER, F. Determinación de las propiedades físico-mecánicas de la guadua. En: Simposio Internacional de la guadua. (2004: Pereira). Pereira: El Simposio, 2004. p. 1-3.

CHEATLE, D y LÓPEZ, L. Diseño de uniones y elementos en estructuras de guadua. En: Seminario - Taller Avances en la investigación sobre Guadua (2002: Pereira). Pereira: El Seminario, 2002.

Código de Diseño de Hormigón Armado. ACI-318-2005.

CRUZ, R.H. 1994. La Guadua: Nuestro bambú. Corporación Autónoma Regional del Quindío. Centro Nacional para el Estudio del Bambú-Guadua. Colombia. 293 p.

DÍAZ S., D.; FACCINI F., A.; ROJAS P., J.R.; "Concreto reforzado con guadua". Trabajo de Grado (Ingeniería Civil). Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá. Bogotá, Junio de 1971,76p.

DREHER, D. 2004. Construcción de casa con caña guadua en Guayaquil. Guayaquil, Ecuador.

<http://www.douglasdreher.com/proyectos/canaguadua/>

ESPILOY, Z.B. 1971. Some properties and uses of bamboos. Technical Note No. 109, Forest Products Research and Industries Development Commission. National Science Development Board College. Filipinas.

FALCK, NB. 2003. Nuevas alternativas en materiales para construcción y en la protección del medio ambiente.

<http://www.ilustrados.com/publicaciones/EpZpFEkuZkRUdfDJrS.php>

Fundamental of the design of bamboo structures. Arce – Villalobos, O.A. 1993, PhD, Eindhoven University of Technology, Holland.

GENUARDI, A.; “Las Bambuseas como material de construcción: introducción a una investigación sobre la Guadua angustifolia”. Centro Interamericano de Vivienda (CINVA). Bogotá, 1954.

GHAVAMI K, HOMBEECK RV. Application of bamboo as a construction material: Part I—Mechanical properties and waterrepellent treatment of bamboo, Part II—Bamboo reinforced concrete beams. In: Proc of Latin American Symp on Rational

GHAVAMI K, RODRIGUEZ CS. Engineering materials and components with plants. In: CIB Symposium, Construction and Environment, Theory into Practice Proc., São Paulo, Brazil, CDROM, ISBN 85-88142-01-5, Global Seven Edition, 2000. p. 1–16.

GHAVAMI K, VILLELA M. Columnna reforzada com bambú. Course Report, DEC/PUC-Rio, 2000 [in Portuguese].

GONZALEZ S., "Diseño modelo de vigas de concreto reforzado con tallos de guadua (bambucreto), Guadua angustifolia Kunth" Tesis de Maestría: CIVIL ENGINEERING SCHOOL OF ENGINEERING NEWPORT INTERNATIONAL UNIVERSITY ABRIL DE 2005.

GROVER, P.N. 1957. Preservation of bamboos by modified Boucherie process. Journal of Timber Dryers. Vol. III(3):16-23.

HAMBURK-REINBEK, W. Germany. In: Proceedings: Bamboo Research in Asia. IDRC-IUFRO. p:165-172.

HIDALGO, L.O. 1978. Nuevas técnicas de construcción con bambú. Estudios Técnicos Colombianos Ltda. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. p:26-137.

HIDALGO, Oscar (S/F) The Art of Natural Building: Design, Construction, Technology Síntesis de Arq. Cassandra ADAMS (UC Berkeley) <http://www.networkearth.org/naturalbuilding/bamboo.html>

ICBO, AC 162: Acceptance criteria for structural bamboo, ICBO Evaluation Service Ltd., California, USA, 2000.

INBAR standards for determination of physical and mechanical properties of bamboo. Jansenn J.J.A. 1999. Third Draft, January 1999.

International Bamboo Congress (5th: 1998: San Jose, Costa Rica). Bamboo for sustainable development : proceedings of the 5th International Bamboo Congress and the 6th International Bamboo Workshop, San Jose, Costa Rica, 2-6 November 1998. Editores: Arun Kumar, I.V. Ramanuja Rao and Cherla Sastry. 2002.

ISO 22157-1:2004 – “Bamboo. Determination of physical and mechanical properties”. Primera Edición. Primera parte: Requerimientos.

ISO 22157-2:2004 – “Bamboo. Determination of physical and mechanical properties”. Primera Edición. Primera parte: Manual de Laboratorio.

JANSEN J.J.A. Laboratory manual on testing methods for determination of physical and mechanical properties of bamboo. Third Draft. January 1999.

JANSSEN J.J.A. An international model building code for bamboo. Second Draft, January 1999.

JANSSEN, J.J.A. 1980. The mechanical properties of bamboo used in construction. Eindhoven University of Technology, Netherlands. In: Proceedings: Bamboo Research in Asia. IDRC- IUFRO. p:173-188.

JANSSEN, J.J.A. 1981. The relationship between the mechanical properties and biological and chemical composition of bamboo. Eindhoven University of Technology, Netherland. Proceedings of Congress Group 5.3. Production and Utilization of Bamboo and Related Species. XVII IUFRO World Congress. Kyoto, Japan. p:27

JIMÉNEZ, J.E.; GÓMEZ, I.E.; “Aplicación de la guadua en la vivienda”. Trabajo de Grado (Arquitecto). Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín, 1982, 108p.

JOHN WILEY & SONS, 2000. Alternative construction – Contemporary Natural Building methods. Edited by Lynne Elizabeth and Cassandra Adams.

L. BASTIDAS, E. FLORES. Uso del bambú en vivienda para estratos medios. El bambú como material estructural en losa de entepiso. 2000.

L.E. Moreira, K. Ghavami, J.L.M. Ripper. Industrialized used of bamboo in structures. Bamboo for Sustainable development, pp 549-558.

Liese W. The structure of bamboo in relation to its properties and utilization. In: Proc Int Symposium on Industrial Use of Bamboo, Beijing, China, 1992. p. 95–100.

Liese, W. 1980. Preservation of bamboos. Federal Research Center for Forestry and Forest Products.

Liese, W. 1986. Characterization and utilization of bamboo. University of Hamburg, FRG. In: Proceedings of project group P 5.04. Production and utilization of bamboo and related Species. XVIII IUFRO World Congress. Ljubljana, Yugoslavia. p:11

LONDOÑO, X. La Guadua un bambú importante de América. En Memorias primer Seminario Bamboo 2001, Guayaquil, Ecuador, 8-10 de agosto.

M. Revel. La Prefabricación en la Construcción. URMO, S.A. de Ediciones. 1982.

McClure. 1953. Bamboo as a building construction material. Foreign Agricultural Service, U.S. Dept. of Agriculture, Washington, D.C. EUA. 52.

MERINO S., F.; RODRÍGUEZ B., G.; VALLEJO J., A.; “Elementos de concreto reforzado con guadua”. Trabajo de grado (Ingeniería Civil). Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá. Bogotá, 1972, 41p.

MINISTERIO DE AGRICULTURA Y GANADERÍA DEL ECUADOR. SERVICIO DE INFORMACIÓN AGROPECUARIA DEL MINISTERIO DE AGRICULTURA Y GANADERÍA. Proyecto SICA. 2004. <http://www.sica.gov.ec/>

Mohmod, A.L., Amin, A.H., Kasim, J. y Jusuh, M.Z. 1993. Effects of anatomical characteristics on the physical and mechanical properties of *Bambusa blumeana*. *Journal of Tropical Forest Science* 6(2):159-170. Forest Research Institute of Malaysia.

Norma ISO 22156. Diseño estructural del bambú.

O. Yamashita, S. Kimura, H. Imanishi, K. Kanayama, *Proceedings of the Conference of the Japan Wood Research Society*, (2003) 58 (in Japanese). Organization of Building Applied to Low Cost Housing, CIB, São Paulo, Brazil, 1981. p. 49–66.

P. SÁNCHEZ, Edwin y S. PINEDA, Jorge. Comportamiento de la guadua angustifolia sometida a flexión. Trabajo de grado (Ingeniería Civil). Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil. 2001. P. 101.

PEÑA MUÑOZ, César Y RODRÍGUEZ, Hugo. Propuesta de uniones mecánicas para estructuras de guadua. Santafe de Bogotá, 1997. Trabajo de grado (Arquitectura). Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, Facultad de Artes. P 108.

Porter, M.L., Ekberg, C.E., Jr., “Design Recommendations for steel deck floors slabs,” *Journal of the Structural Division, Proceedings of the American society of Civil Engineering* , Paper 12528, Vol 102, No ST121 pp 2121-2136, November 1976

Porter, M.L., Ekberg, C.E., Jr., Greimann, L.F., and Elleby, H.A., “Shear-Bond Analysis of Steel Deck Reinforced Slabs,” *Journal of the Structural Division, Proceedings of the American society of Civil Engineering* , Paper 12611, Vol 102, No ST12, pp 2255-2268, December 1976.

Portland Concrete Institute. Manual for the design of hollow cores slabs. Second Edition. 1998.

PROYECTO UTP-GTZ. Guía para la construcción de puentes. Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ciencias Ambientales. <http://ambiental.utp.edu.co/guadua/puentes/index.htm#puente>

Purushotham, A. 1963. A preliminary note on some experiments using bamboo as reinforcement in cement concrete. Journal of Timber and Dryers and Preserver's Association of India. Vol IX(4): p:3-14.

Purushotham, A., S.K. Sudan y V. Sagar. 1953. Preservative treatment of green bamboos under low pneumatic pressures. Indian Forester. Wood Preservation Branch, Forest Research Institute, Dehra Dun, India. Vol. 79(12):652-672.

R. Park, W.L. Gamble. Losas de Concreto Reforzado. Editorial LimusaNoriega, 1990. Reinforced Concrete Structures. R. Park and T. Paulay. John Wiley and Sons, Inc. 1975.

Report on study of bamboo as construction material, Au. F; Ginsburg, Km Poon; YM; Shin, F.G. 1978. The Hong Kong Polytechnic. Robles-Austriaco, L. (1991). "Bamboo reinforcement for rainwater cistern."

Shao, Y., and Shah, S. P. (1997). "Mechanical properties of PVA fiber reinforced cement composites fabricated by extrusion processing." ACI Mater. J., 94-6, 555–564.

Sharma, Y.M.L. 1980. Bamboo in Asia- Pacific region. Bamboo research in Asia: Proceedings of a workshop held in Singapore. Ottawa, Ont. Canadá. IDRC. p:99-120.



Sonti, V.R., R.N. Karmakar y K. Dey. 1983. Low cost dome structure using CCA treated bamboos. Timber Development Association. India. Vol XXIX(4):35-40.

STULZ, Ronald y MUKERJI, Kiran (1993) Materiales de Construcción Apropriados SKAT, Suiza  
<http://media.payson.tulane.edu:8083/html/spanish/sk01ms/sk01ms00.htm#Contents>

SWAMY RN, editor. New reinforced concretes, concrete technology and design, vol. 2, Blackie and Son, Glasgow, 1984.

TEWARI, M.C. Y B. Singhj. 1979. Bamboos their utilization and protection against biodeterioration. Journal of Timber Development Association of India. Vol. XXV(4):12-23

Töngues, C. Construir con Bambú Guadua angustifolia - Ciencia y Técnica -. <http://www.conbam.de/>

VELA G., L. 1982. Los bambúes. Boletín Técnico No. 50. INIF-SARH. México.

VELEZ, Simón / (S/F) Grow Your Own House  
<http://www.chelseagreen.com/DP/GrowYourHouse.htm>

Why Bamboo? Bambooweb. Environmental Bamboo Foundation. Bali, Indonesia. <http://www.kauai.net/bambooweb/whybamboo.html>.

Yeomans R., Francisco S. y Almada N., Delma V. "Cátedra sobre desarrollo e innovación de procesos y tecnologías de vivienda". Civiltec. Enero – Febrero, 2004. Número 7. Monterrey, Nuevo León, México.

ZERI (Zero Emission Research Initiative). 2000. ZERI Pavillion on the EXPO 2000, Germany. <http://bambus.rwth-aachen.de/eng/reports/zeri/englisch/referat-eng.html>

### **Páginas Electrónicas**

<http://www.bwk.tue.nl/bko/research/bamboo/research.htm>

<http://www.conabio.gob.mx/biodiversitas/bambu.htm>

<http://www.worldbank.org/depweb/spanish/sd.html>

<http://www.bambuerver.com/>

<http://www.imcyc.com/revistact06/abr07/HERCAB.pdf>

[http://www.todoarquitectura.com/v2/Gal\\_proy002-1.asp](http://www.todoarquitectura.com/v2/Gal_proy002-1.asp)

<http://www.zeri.org/news/1999/jj/e/bambu.htm>

<http://media.payson.tulane.edu:8083/html/spanish/sk01ms/sk01ms0o.htm>

**ANEXO 1:**  
**PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA *GUADUA angustifolia Kunth*, OBTENIDAS**  
**EXPERIMENTALMENTE, 1950 – 2005.**

Fuente	Cont de humedad (%)	Compresión perpendicular (MPa)	Compresión paralela (MPa)	Flexión (MPa)	Cortante paralela (MPa)	Tensión perpendicular (MPa)	Tensión paralela (MPa)	Modulo de elasticidad tensión (MPa)	Modulo de elasticidad compresión (MPa)
Genuardi (1954)	-	-	-	-	-	-	-	11600	-
Genuardi (1954)	-	-	-	-	-	-	-	12000	-
Díaz et al (1971)	-	-	-	-	-	-	54.8	10700	-
Díaz et al (1971)	-	-	-	-	-	-	104.5	17300	-
Díaz et al (1971)	-	-	-	-	-	-	102.0	-	-
Díaz et al (1971)	-	-	-	-	-	-	156.0	-	-
Merino et al (1972)	-	-	48.0	-	-	-	97.0	-	-
Merino et al (1972)	-	-	66.0	-	-	-	166.0	-	-
Merino et al (1972)	-	-	57.0	-	-	-	94.0	-	-
Merino et al (1972)	-	-	69.0	-	-	-	143.0	-	-
Carvajal et al (1981)	-	-	26.2	-	-	-	51.0	6925	-
Carvajal et al (1981)	-	-	37.6	-	-	-	85.6	12663	-
Carvajal et al (1981)	-	-	35.7	-	-	-	126.2	-	-
Carvajal et al (1981)	-	-	50.3	-	-	-	162.1	-	-
Salazar y Correcha (1981)	-	-	33.1	-	-	-	-	9991	-
Jaimés y Torres (1984)	-	-	48.5	-	5.8	-	140.0	10112	1904
Jaimés y Torres (1984)	-	-	-	-	-	-	159.8	-	-
Botero (1985)	18.2	0.23	45.0	-	-	-	166.8	-	-
Mejía y Salazar (1986)	24.0	-	33.4	-	-	-	-	-	-
Mejía y Salazar (1986)	36.1	-	37.1	-	-	-	-	-	-
Mejía y Salazar (1986) - admisibles	30.0	-	-	37.3	-	-	-	-	-
Mejía y Salazar (1986) - admisibles	-	-	5.4	4.2	-	-	-	-	3900

Fuente	Contenido de humedad (%)	Compresión perpendicular (MPa)	Compresión paralela (MPa)	Flexión (MPa)	Cortante paralela (MPa)	Tensión perpendicular (MPa)	Tensión paralela (MPa)	Módulo de elasticidad tensión (MPa)	Módulo de elasticidad compresión (MPa)
García y Martínez (1991) admisibles	27.0	1.10	13.5	6.0	-	-	-	-	3000
García y Martínez (1991) admisibles	27.0	1.70	11.5	6.0	-	-	-	-	3000
González y Díaz (1992)	-	-	34.0	56.7	2.1	-	-	-	-
Arboleda et al (1997)	-	0.84	45.7	7.2	5.0	0.36	87.2	1545	-
Arboleda et al (1997) -admisibles	-	0.53	22.9	2.3	1.3	0.36	87.2	-	-
DB9/97 (1997)	-	-	69.0	76.0	20.0	-	148.0	20000	-
Aricapa et al (1999)	-	1.63	17.3	10.8	1.9	0.18	55.9	2235	-
Aricapa et al (1999) - admisibles	-	1.03	8.7	3.4	0.5	0.18	55.9	-	-
González y Osorio (2000)	11.5	-	-	-	-	-	55.0	10911	-
Lindermann y Steffens -Pabellón Zeri 2000	-	-	56.0	74.0	4.3	-	95.0	19000	-
Mechanical properties of bamboo (2002)	-	-	52.5	15.2	-	-	63.6	17000	15190
Mechanical properties of bamboo (2002)	-	-	93.0	18.9	-	-	86.3	17900	18900
Mechanical properties of bamboo (2002)	-	-	-	16.5	-	-	-	14000	16500
Eicher (citado en el 2002)	15.0	-	56.0	74.0	-	-	-	19000	18400
Hidalgo et al (citado en el 2002)	-	-	70.5	-	14.4	-	321.3	27700	-
Gavhami (2004)	-	-	29.5	-	2.2	-	82.6	15110	12580
Guzmán y Morel (2004)	-	-	56.0	74.0	4.3	-	95.0	20700	18400
Obermann y Laude (2004)	-	-	30.0	30.0	4.0	-	50.0	6000	-
Obermann y Laude (2004) admisibles	-	-	15.0	9.5	1.0	-	25.0	6000	-