



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE VIGAS *JOIST* PARA ESTRUCTURAS  
DE TECHOS LIVIANOS, FABRICADAS CON BAMBÚ**

**Josué Jonattan Monterroso Salazar**

Asesorado por el Ing. Fredy Alexander Contreras Castañaza

Guatemala, abril de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE VIGAS *JOIST* PARA ESTRUCTURAS  
DE TECHOS LIVIANOS, FABRICADAS CON BAMBÚ**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**JOSUÉ JONATTAN MONTERROSO SALAZAR**

ASESORADO POR EL ING. FREDY ALEXANDER CONTRERAS CASTAÑAZA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

GUATEMALA, ABRIL DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Edgar Fernando Valenzuela Villanueva
EXAMINADOR	Ing. Walter Rolando Salazar González
EXAMINADOR	Ing. Ellios Rodríguez Benítez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **DISEÑO Y EVALUACIÓN DE VIGAS *JOIST* PARA ESTRUCTURAS DE TECHOS LIVIANOS, FABRICADAS CON BAMBÚ**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha abril de 2013.

  
**Josué Jonattan Monterroso Salazar**

Guatemala, 24 de enero de 2014

Ingeniero

Guillermo Francisco Melini Salguero

Jefe del Departamento de Materiales de Construcción

Facultad de Ingeniería

Después de revisar el trabajo de graduación del estudiante Josué Jonattan Monterroso Salazar, quien se identifica con carne No. 2005-16311, titulado "DISEÑO Y EVALUACION DE VIGAS JOIST PARA ESTRUCTURAS DE TECHOS LIVIANOS, FABRICADAS CON BAMBU" y habiendo realizado las correcciones necesarias, doy por aprobado dicho trabajo y lo autorizo para continuar con el proceso correspondiente.

Sin otro particular, me despido atentamente.



Ing. Civil Fredy Alexander Contreras Castañaza

Colegiado 10754

Fredy Alexander Contreras Castañaza  
-Ingeniero Civil- Col: 10754



**USAC**  
**TRICENTENARIA**  
 Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>



Universidad de San Carlos de Guatemala  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 Escuela de Ingeniería Civil

Guatemala,  
 14 de marzo de 2014

Ingeniero  
 Hugo Leonel Montenegro Franco  
 Director Escuela Ingeniería Civil  
 Facultad de Ingeniería  
 Universidad de San Carlos

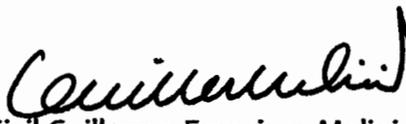
Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación DISEÑO Y EVALUACIÓN DE VIGAS JOIST PARA ESTRUCTURAS DE TECHOS LIVIANOS, FABRICADAS CON BAMBÚ, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Josué Jonattan Monterroso Salazar, quien contó con la asesoría del Ing. Fredy Alexander Contreras Castañaza.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

  
 Ing. Civil Guillermo Francisco Melini Salguero  
 Coordinador del Área de Materiales y  
 Construcciones Civiles



FACULTAD DE INGENIERIA  
 AREA DE MATERIALES Y  
 CONSTRUCCIONES CIVILES  
 USAC

/bbdeb  
 Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





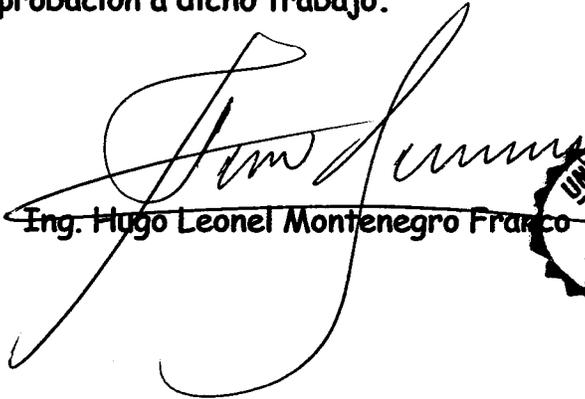
**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Escuela de Ingeniería Civil



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Fredy Alexander Contreras Castañaza y del Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles, Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero, al trabajo de graduación del estudiante Josué Jonattan Monterroso Salazar, titulado DISEÑO Y EVALUACIÓN DE VIGAS JOIST PARA ESTRUCTURAS DE TECHOS LIVIANOS, FABRICADAS CON BAMBÚ, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

  
Eng. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, abril 2014.

/bbdeb.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua

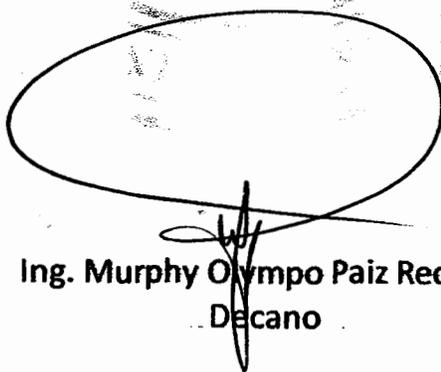




DTG. 166.2014

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO Y EVALUACIÓN DE VIGAS JOIST PARA ESTRUCTURAS DE TECHOS LIVIANOS, FABRICADAS CON BAMBÚ**, presentado por el estudiante universitario **Josué Jonattan Monterroso Salazar**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano

Guatemala, 8 de abril de 2014

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por darme la sabiduría, perseverancia, amor propio y capacidad suficiente para salir adelante cada día.
- Mi madre** María Salazar Castillo, por su amor y apoyo incondicional, vitales para mi desarrollo como persona y ser la persona más importante en mi vida.
- Mi padre** José Antonio Monterroso Sanuncini, por alumbrar mi vida con sus consejos y enseñanzas, y ser la motivación día a día, aun sin su presencia física.
- Mis hermanos** Pavel Antonio, José Armando, Carlos Eduardo, María Amparo, Nancy Mariana y Beverly María, Monterroso Salazar, por poner en mí su apoyo pleno y darme ánimo para no desmayar ante las adversidades.
- Mis sobrinos** Kimberly Monterroso, Brandon Monterroso, Sharon Monterroso, Ángeles Monterroso, Valeria Monterroso, Anthony Córdova, Christopher Córdova, Fernando Zepeda y Eduardo Zepeda, por darnos alegría.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por darme un lugar dentro de ella y ser una importante influencia en mi carrera
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por presentarme retos difíciles para querer superarlos y crecer intelectualmente.
<b>Mi asesor</b>	Ing. Fredy Contreras, por brindarme su asesoría y apoyo en la realización de este trabajo.
<b>Sección Tecnología de la Madera, Facultad de Ingeniería, USAC</b>	Inga. Ericka Cano, Inga. Adela Marroquín, por permitirme ser parte de la sección y darme su apoyo pleno. Jesiel Enríquez, por brindarme ayuda esencial en la realización de los elementos. Compañeros practicantes y tesistas, que en su momento compartimos.
<b>Sección de Estructuras, Facultad de Ingeniería, USAC</b>	Ing. Mario Corzo, por apoyarme de forma desinteresada con sus amplios conocimientos. Fabio Sánchez, por brindarme con su experiencia el completo apoyo para la realización de los ensayos, y compañeros practicantes de dicha sección, por su valiosa ayuda en los mismos.

**Área de Carpintería,  
Facultad de Ingeniería,  
USAC**

Iván Sánchez y Jesús Gatica, por colaborarme con sus consejos y apoyo desinteresado.

**Dora Rodríguez**

Por darme ánimo y compañía en una etapa tan importante de mi vida, y ser una persona en quien confiar.

**Compañeros de la  
Facultad de Ingeniería,  
USAC**

Por compartir conmigo momentos de gran valor en la formación como profesional.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XI
GLOSARIO .....	XV
RESUMEN .....	XXI
OBJETIVOS.....	XXIII
INTRODUCCIÓN .....	XXV
1. EL BAMBÚ COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN .....	1
1.1. Cultivo.....	7
1.2. Cosecha .....	8
1.3. Variedades aptas para la construcción, disponibles en Guatemala.....	9
1.3.1. Usos en la construcción.....	10
1.3.2. Ventajas.....	10
1.3.3. Desventajas .....	12
1.3.4. Tratamiento preventivo .....	13
2. VARIEDADES DE BAMBÚ ESTUDIADAS EN GUATEMALA.....	17
2.1. Tipos de bambú en Guatemala.....	17
2.2. Regiones donde hay disponibilidad de bambú .....	22
2.3. Características físicas de las diversas variedades estudiadas .....	24
2.4. Propiedades mecánicas de las diversas variedades estudiadas .....	27

3.	GENERALIDADES PARA EL DISEÑO DE VIGAS <i>JOIST</i> .....	31
3.1.	Definición de viga <i>joist</i> .....	31
3.2.	Materiales utilizados para la construcción de vigas <i>joist</i> .....	32
3.3.	Geometrías recomendadas para la construcción de vigas <i>joist</i> .....	34
3.4.	Elementos complementarios para la construcción de vigas <i>joist</i> .....	35
3.5.	Teoría o modelo estático, para el cálculo de la resistencia de vigas <i>joist</i> .....	37
4.	METODOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE VIGAS <i>JOIST</i> UTILIZANDO BAMBÚ COMO MATERIA PRIMA.....	53
4.1.	Características físicas y propiedades mecánicas de las variedades de bambú seleccionadas .....	56
4.2.	Elementos que conforman la viga <i>joist</i> diseñada .....	57
4.3.	Proceso de fabricación de los elementos .....	60
5.	DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL, DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DE LAS VIGAS <i>JOIST</i> FABRICADAS, UTILIZANDO BAMBÚ COMO MATERIA PRIMA .....	63
5.1.	Descripción del método de ensayo de vigas <i>joist</i> .....	64
5.2.	Ensayo de laboratorio, según requerimientos de la Norma Técnica Peruana E – 100, Bambú.....	74
5.3.	Diagramas de corte y momento, obtenidos a partir de los ensayos de laboratorio, de los elementos estructurales.....	97
5.4.	Gráficas carga-deflexión de <i>joist</i> diseñados.....	108
5.5.	Análisis de cordón inferior .....	118
5.6.	Análisis de cordón superior .....	122
5.7.	Análisis de cordón diagonal.....	128

5.8.	Diseño de sistemas .....	133
6.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO.....	137
6.1.	Diseño de cordones.....	137
6.2.	Fallas presentadas en cada viga .....	140
6.3.	Análisis de separación entre vigas .....	154
6.4.	Método de anclaje .....	155
7.	GUÍA PARA LA FABRICACIÓN DE VIGAS <i>JOIST</i> UTILIZANDO BAMBÚ COMO MATERIA PRIMA .....	157
7.1.	Preliminares.....	157
7.2.	Selección de materia prima .....	160
7.3.	Cordón superior .....	164
7.4.	Cordón inferior .....	169
7.5.	Elementos de corte.....	172
7.6.	Uniones y anclajes.....	174
	CONCLUSIONES .....	179
	RECOMENDACIONES .....	181
	BIBLIOGRAFÍA.....	183



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Yema.....	4
2.	Ramas nodales en bambú .....	5
3.	Hoja caulinar.....	5
4.	Estructura del bambú .....	6
5.	Distribución natural del bambú en el mundo .....	23
6.	Clasificación del bambú y su origen por especie .....	24
7.	Vigas <i>joist</i> de acero.....	32
8.	<i>Joist</i> fabricado de madera.....	33
9.	<i>Joist</i> fabricado de madera y metal .....	34
10.	Formas geométricas indeformables .....	34
11.	Elementos comunes de una viga <i>joist</i> .....	35
12.	Esquema de <i>joist</i> típico .....	36
13.	Corte de <i>joist</i> bajo solitud de carga .....	37
14.	Diagramas teóricos de viga simplemente apoyada.....	38
15.	Sección apoyada de viga <i>joist</i> .....	45
16.	Geometría y fuerzas sobre apoyo de <i>joist</i> .....	46
17.	Triángulo para fuerzas actuantes en diagonal .....	48
18.	Esfuerzos de apoyo y desgarre en uniones con pasadores.....	49
19.	Coeficientes de modificación para estabilidad .....	50
20.	Conicidad permisible en culmos de bambú.....	54
21.	Grietas y picaduras no aceptables en bambú estructural .....	54
22.	Perforaciones por causa de insectos en bambú .....	55

23.	Pudrición no aceptable en bambú estructural.....	55
24.	Sección propuesta de <i>joist</i> .....	59
25.	Variantes en vigas <i>joist</i> a diseñar .....	60
26.	Posición de viga a ensayar .....	65
27.	Sistema de ensayo individual de <i>joist</i> .....	66
28.	Posición de deformómetro vertical.....	66
29.	Medidor hidráulico de presión.....	67
30.	Pistón hidráulico RC-1010 .....	68
31.	Apoyo de sistema .....	69
32.	Arriostamiento de sistema de <i>joist</i> .....	69
33.	Posición de deformómetros dentro del sistema .....	70
34.	Colocación de plataforma de aplicación de carga .....	71
35.	Aplicación de carga, colocación estratégica .....	72
36.	Sistema descargado, luego de primer ciclo de carga .....	73
37.	Diagramas para análisis práctico.....	74
38.	Características de JB – A1 .....	77
39.	Características de JB – B1 .....	81
40.	Características de JB – C1 .....	83
41.	Características de JB – D1 .....	83
42.	Posición de sistema y método de aplicación de carga .....	85
43.	Deflexión típica en viga simplemente apoyada.....	98
44.	Sección de <i>joist</i> compuesto .....	100
45.	Sección de bambú .....	102
46.	Distancias hasta eje neutro de la sección.....	104
47.	Gráfica carga <i>versus</i> deflexión JB – A1 .....	108
48.	Gráfica carga <i>versus</i> deflexión JB – B1 .....	109
49.	Gráfica carga <i>versus</i> deflexión JB – C1.....	109
50.	Gráfica carga <i>versus</i> deflexión JB – D1.....	110
51.	Gráfica W (kg/m) <i>versus</i> Y (mm), sistema 1, JB – A2 y A3.....	111

52.	Gráfica W (kg/m) versus Y (mm), sistema 2, JB – B2 y B3 .....	111
53.	Gráfica W (kg/m) versus Y (mm), sistema 3, JB – C2 y C3.....	112
54.	Gráfica W (kg/m) versus Y (mm), sistema 4, JB – D2 y D3.....	112
55.	Diagrama de corte JB – A1 .....	114
56.	Diagrama de momento JB – A1 .....	115
57.	Planta típica de sistema ensayado.....	134
58.	Falla por tracción perpendicular en JB – A1 .....	141
59.	Falla por tracción perpendicular en JB – B1 .....	142
60.	Falla por desgarre en JB – C1 .....	143
61.	Falla por tracción perpendicular en JB – C1 .....	143
62.	Falla por tracción perpendicular en JB – D1 .....	144
63.	Aplastamiento y tensión perpendicular en sistema 1 .....	145
64.	Gráfica de comportamiento de JB – B2 .....	146
65.	Gráfica de comportamiento de JB – B3 .....	147
66.	Falla por compresión perpendicular en sistema 2.....	148
67.	Falla por desgarre y tracción perpendicular en JB – B.....	148
68.	Gráfica de comportamiento de JB – C2 .....	149
69.	Gráfica de comportamiento de JB – C3 .....	150
70.	Falla por tensión perpendicular en JB – C3 .....	151
71.	Fallas secundarias en sistema 3 .....	151
72.	Gráfica de comportamiento de JB – D2 .....	152
73.	Gráfica de comportamiento de JB – D3 .....	152
74.	Falla por desgarre en JB – D3 sistema 3 .....	153
75.	Perno de acero utilizado .....	155
76.	Perno de bambú torneado .....	156
77.	Sierra ingletadora .....	158
78.	Barreno de pedestal.....	159
79.	Herramienta usada .....	159
80.	Materia prima para elaboración de vigas .....	160

81.	Medidas realizadas en la selección del bambú.....	161
82.	Geometría necesaria para triangulación de <i>joist</i> .....	162
83.	Simetría de vigas utilizando bambú .....	163
84.	Corte adecuado de culmos de bambú .....	163
85.	Medidas para perforación de cordón superior .....	165
86.	Marca en eje de culmo .....	166
87.	Método de sujeción de varas de bambú .....	167
88.	Perforación de cordón longitudinal .....	168
89.	Vista de cordón longitudinal perforado .....	169
90.	Medidas para perforación de cordón inferior .....	170
91.	Elemento longitudinal perforado .....	172
92.	Medidas para cordones diagonales .....	173
93.	Elemento diagonal .....	173
94.	Corte de perno metálico .....	175
95.	Perforación y colocación de pernos metálicos.....	176
96.	Bolillo de bambú para perno.....	177

## TABLAS

I.	Características físicas de cuatro especies de bambú 1 .....	26
II.	Características físicas de cuatro especies de bambú 2 .....	26
III.	Características físicas de tres especies de bambú .....	27
IV.	Propiedades mecánicas de las especies de bambú.....	30
V.	Propiedades mecánicas de especies seleccionadas .....	56
VI.	Características físicas de especies seleccionadas.....	57
VII.	Variaciones en vigas <i>joist</i> a construir .....	62
VIII.	Medidas directas de vigas <i>joist</i> fabricadas con bambú .....	63
IX.	Modelo de tabla a utilizar para tabulación de datos .....	76

X.	Primera aplicación de carga a JB – A1 .....	77
XI.	Segunda aplicación de carga-descarga a JB – A1 .....	78
XII.	Tercera aplicación de carga a JB – A1 .....	79
XIII.	Aplicación de carga hasta ruptura de JB – A1 .....	80
XIV.	Aplicación de carga a JB – B1 .....	81
XV.	Aplicación de carga a JB – C1 .....	82
XVI.	Aplicación de carga-descarga a JB – D1 .....	84
XVII.	Modelo de tabla a utilizar para tabulación de datos.....	87
XVIII.	Datos de ensayo sistema 1, JB – A2 y 3 .....	88
XIX.	Datos de carga inicial de ensayo sistema 2, JB – B2 y 3 .....	89
XX.	Descarga de ensayo sistema 2, JB – B2 y 3 .....	90
XXI.	Carga hasta la falla de ensayo sistema 2, JB – B2 y 3.....	91
XXII.	Datos de carga inicial de ensayo sistema 3, JB – C2 y 3 .....	92
XXIII.	Descarga de ensayo sistema 3, JB – C2 y 3 .....	93
XXIV.	Carga hasta la falla de ensayo sistema 3, JB – C2 y 3 .....	94
XXV.	Datos de carga inicial de ensayo sistema 4, JB – D2 y 3 .....	95
XXVI.	Descarga de ensayo sistema 4, JB – D2 y 3 .....	96
XXVII.	Carga hasta la falla de ensayo sistema 4, JB – D2 y 3 .....	96
XXVIII.	Datos medidos directamente de vigas.....	103
XXIX.	Distancia al centroide de vigas .....	104
XXX.	Cálculo de inercia de la sección de cada viga diseñada .....	107
XXXI.	Datos de carga para diseño de vigas .....	113
XXXII.	Datos para diagrama de corte de JB – A1 .....	114
XXXIII.	Cortante en cada posición de la viga.....	114
XXXIV.	Datos para diagrama de momento de JB – A1 .....	115
XXXV.	Momento en cada posición de la viga .....	115
XXXVI.	Datos de cortante y momento máximo en cada viga.....	116

XXXVII.	Valores de corte en posiciones de cada viga.....	116
XXXVIII.	Valores de momento en posiciones de cada viga.....	117
XXXIX.	Esfuerzos sobre cordón inferior de vigas diseñadas .....	121
XL.	Esfuerzo de flexión sobre cordón superior .....	124
XLI.	Cortante paralelo a las fibras sobre cordón superior.....	125
XLII.	Compresión perpendicular en cordón superior .....	127
XLIII.	Compresión aplicada sobre el cordón diagonal .....	131
XLIV.	Cortante paralelo a las fibras sobre el cordón diagonal .....	132
XLV.	Carga distribuida aplicada a cada sistema.....	135
XLVI.	Separaciones máximas aplicando F,S.....	136
XLVII.	Comparación de esfuerzos en cordón a tensión.....	137
XLVIII.	Comparación de esfuerzos en cordón superior .....	138
XLIX.	Comparación de esfuerzos en cordón diagonal.....	139
L.	Separación máxima de sistema de <i>joist</i> .....	154

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
$\beta$	Ángulo beta
A	Área
W	Carga distribuida
cm	Centímetros
cm <sup>4</sup>	Centímetros a la cuarta potencia
cm <sup>2</sup>	Centímetros al cuadrado
C <sub>D</sub>	Coficiente de modificación por duración de carga
C <sub>L</sub>	Coficiente de modificación por estabilidad lateral de vigas
C <sub>r</sub>	Coficiente de modificación por redistribución de cargas
C. H	Contenido de humedad
Y	Deflexión en milímetros
$\rho$	Densidad
De	Diámetro exterior de los culmos
Di	Diámetro interior de los culmos
b <sub>1</sub>	Distancia desde anclaje hasta extremo más cercano de cordón diagonal
F <sub>v</sub>	Esfuerzo cortante paralelo a la fibra, actuante
F'v	Esfuerzo cortante paralelo a las fibras, permisible
F'c	Esfuerzo de compresión perpendicular a las fibras
Fc	Esfuerzo de compresión perpendicular a las fibras, permisible

<b>Ss</b>	Esfuerzo de desgarre
<b>fm</b>	Esfuerzo de flexión aplicado
<b>f'm</b>	Esfuerzo de flexión permisible
<b><math>\sigma</math></b>	Esfuerzo de tracción axial
<b><math>\sigma_{\perp}</math></b>	Esfuerzo de tracción perpendicular a las fibras
<b><math>\sigma'_{\perp}</math></b>	Esfuerzo de tracción perpendicular a las fibras, permisible
<b>Fi</b>	Esfuerzo permisible
<b>fi</b>	Esfuerzo permisible, modificado por los coeficientes
<b>e y t</b>	Espesor de pared del bambú
<b>P</b>	Fuerza aplicada
<b>o</b>	Grados
<b>g/cm<sup>3</sup></b>	Gramos por cada centímetro cúbico
<b>I</b>	Inercia
<b>kg</b>	Kilogramos
<b>kg-m</b>	Kilogramos multiplicado por metro
<b>kg/cm<sup>2</sup></b>	Kilogramos por cada centímetro al cuadrado
<b>kg/m</b>	Kilogramos por cada metro lineal
<b>lbf</b>	Libras fuerza
<b>l</b>	Longitud de entrenudo
<b>L</b>	Luz efectiva
<b>m</b>	Metro
<b>m<sup>4</sup></b>	Metros a la cuarta
<b>mm</b>	Milímetros
<b>S</b>	Módulo de sección
<b>M</b>	Momento
<b>d</b>	Peralte efectivo
<b>%</b>	Porcentaje
<b>plg</b>	Pulgadas

<b>R</b>	Reacción en el apoyo
<b>sen</b>	Seno
<b>C</b>	Valor de compresión sobre cordón diagonal
<b>V</b>	Valor de esfuerzo cortante



## GLOSARIO

<b>Ácido tánico</b>	Tipo de sustancia química que se encuentra en las plantas y en algunos alimentos, con propiedades antioxidantes.
<b>Alma abierta</b>	Característica de las vigas cuando son aligeradas, en lugar de un alma sólida se coloca barras.
<b>Alma llena</b>	Característica de una viga cuando el alma es constituida por un solo material sin aligeramiento alguno.
<b>Almidón</b>	Elemento que constituye la principal reserva energética de los vegetales.
<b>Anclaje</b>	Elemento destinado a fijar firmemente.
<b>Apical</b>	Extremo superior en forma de punta.
<b>Arriostrar</b>	Colocar piezas para asegurar la invariabilidad de forma en una armazón.
<b>Aurícula</b>	Prolongación de la parte inferior de las hojas.
<b>Autoclave</b>	Aparato utilizado para esterilizar, por medio de vapor y altas temperaturas.

<b>Bambudal</b>	Terreno poblado con bambú.
<b>Basal</b>	Posición en la base de una formación orgánica.
<b>Biomasa</b>	Materia orgánica originada en un proceso, utilizable como fuente de energía.
<b>Centroide</b>	Línea imaginaria que pasa justo en el centro de gravedad de un elemento.
<b>Conicidad</b>	Forma cónica.
<b>Cópula</b>	Atadura o ligamento de algo con otro elemento.
<b>Cordón</b>	Elemento longitudinal que forma parte de un <i>joist</i> .
<b>Cuarto menguante</b>	Fase de la luna que provoca descenso del agua en la tierra.
<b>Cuneiforme</b>	Forma de cuña.
<b>Déficit</b>	Falta o escasez de algo necesario.
<b>Deflexión</b>	Desviación de la posición original, sufrida por la acción de alguna fuerza.
<b>Deformómetro</b>	Instrumento dispuesto para la medición de deflexiones.

<b>Dial</b>	Sinónimo de deformómetro.
<b>Difusión</b>	Acción y efecto de difundir o distribuir.
<b>Disgregar</b>	Separar lo que estaba unido.
<b>Dístico</b>	Partes de una planta que están situadas en un mismo plano, que miran a uno u otro lado del eje.
<b>Entrepiso</b>	División que se construye entre un piso y otro.
<b>Esbeltez</b>	Relación entre alto y ancho.
<b>Falla</b>	Defecto en un elemento producido, que merma su resistencia.
<b>Flamdeo</b>	Falla por flexión que sufre un elemento esbelto ante la acción de una carga.
<b>Fotosíntesis</b>	Proceso metabólico de ciertas células, para sintetizar sustancias utilizando la energía luminosa.
<b>Gramínea</b>	Plantas que tienen tallos cilíndricos, comunmente huecos interrumpidos por nudos.
<b>Haz</b>	Cara superior de la hoja.
<b>Herbácea</b>	Que tiene la naturaleza o cualidades de la hierba.

<b>Híbrido</b>	Planta procreada por dos individuos de distinta especie.
<b>Higrómetro</b>	Instrumento para determinar la humedad.
<b>Hongo cromógeno</b>	Bacteria que produce materias colorantes.
<b>Ignición</b>	Efecto de iniciar una combustión.
<b><i>In vitro</i></b>	Producido en laboratorio por métodos experimentales.
<b>Inmunizar</b>	Hacer que un organismo sea exento de ciertos ataques.
<b><i>Joist</i></b>	Elemento tipo viga formado por celosía en el alma. Viga de alma abierta.
<b>Lancéola</b>	Hoja que se asemeja en forma a una lanza.
<b>Lígula</b>	Especie de apéndice situado en el sostén de las hojas de las gramíneas.
<b>Luz efectiva</b>	Longitud real a utilizar para el diseño de una viga.
<b>Macolla</b>	Conjunto de plantas que nacen de un mismo pie.
<b>Maleza</b>	Abundancia de hierbas tipo arbustos.

<b>Mandril</b>	Pieza dispuesta en un barreno para sujetar la broca.
<b>Manómetro</b>	Instrumento que mide la presión ejercida.
<b>Morfología</b>	Parte de la biología que trata de la forma de los seres orgánicos.
<b>Nudo</b>	Cada una de las partes del bambú, dispuestas como diafragmas.
<b>Parénquima</b>	Base del tejido celular que contiene almidón y es, en su mayoría, verticalmente elongada.
<b>Pedestal</b>	Elemento en que se asegura o afirma algo.
<b>Peralte</b>	Elevación de una armadura o viga.
<b>Perno</b>	Pieza de cualquier material que se usa para afirmar elementos entre sí.
<b>Promontorio</b>	Bulto que aparece en alguna parte.
<b>Pubescencias</b>	Especie de pelos singulares de algunas especies de bambú.
<b>Raíces adventicias</b>	Planta que se desarrolla en un lugar distinto del habitual.

<b>Ralear</b>	Cortar árboles de un cultivo para beneficiar el crecimiento del resto.
<b>Resina</b>	Sustancia sólida de consistencia pastosa, insoluble en agua, obtenida naturalmente de algunas plantas.
<b>Retracción</b>	Reducción persistente de volumen en ciertos tejidos orgánicos.
<b>Savia</b>	Líquido que circula por los vasos de las plantas, del cual toman las células las sustancias para su nutrición.
<b>Sazonamiento</b>	Ocasión oportuna de las plantas para su cosecha.
<b>Seta</b>	Cualquier especie de hongo, con forma de sombrilla.
<b>Silvicultura</b>	Ciencia que trata del cultivo de los bosques o selvas.
<b>Taxonomía</b>	Ciencia que trata de la clasificación de los grupos de animales y vegetales.
<b>Tiralíneas</b>	Instrumento que sirve para trazar líneas con tinta.
<b>Vaina</b>	Ensanchamiento de la hoja que envuelve el tallo.
<b>Xilófago</b>	Organismo que se alimenta de la madera, básicamente de celulosa y lignina.

## RESUMEN

La difícil situación que atraviesan los países latinoamericanos desde hace muchos años, producto del desempleo, déficit habitacional y altos costos de las viviendas, entre otros, ha motivado a las personas a buscar alternativas al respecto; el bambú está formando parte importante de un nuevo enfoque para la solución de estos problemas, los cuales no son ajenos al país y se viven cada día con mayor crudeza, convirtiendo al bambú en una importante opción para el desarrollo, básicamente para las comunidades rurales.

Para emprender con el diseño y construcción utilizando bambú en elementos estructurales, fue necesario conocer las características físicas y propiedades mecánicas de las especies que han sido objeto de mayor estudio en el medio, para ello se hizo referencia a documentos, tanto trabajos de graduación, como publicaciones de investigaciones realizadas a nivel nacional, de los cuales se obtuvieron los datos necesarios, estos son presentados en el capítulo dos.

Con el análisis descrito en el capítulo cuatro, se seleccionaron dos especies de bambú que presentan, según la literatura, las mejores propiedades resistentes y características tanto físicas, como de disponibilidad, presentados en el capítulo uno y dos, para construir elementos estructurales, como las vigas *joist*.

Con el fin de comprender las generalidades necesarias para el diseño y elaboración de estos elementos, en el capítulo tres se analizó y describió cada una de las características y modelos estáticos para realizar los cálculos necesarios que se podrán aplicar en el diseño posterior.

Se realizó la construcción de vigas *joist*, utilizando variaciones en peralte y método de anclaje, plasmadas en el capítulo cuatro y justificadas por el diseñador luego de comprender los parámetros y requerimientos necesarios de diseño, presentados en el capítulo tres.

Por medio de ensayos de laboratorio se obtuvo la resistencia mecánica de cada viga, con la ayuda de la Norma Técnica Peruana E-100 Bambú y al analizar cada uno de los resultados se dan las recomendaciones más relevantes y útiles para posteriores aplicaciones.

Al final se presentan, tanto el análisis de resultados de las pruebas de laboratorio, como también los cálculos realizados con los datos obtenidos de estas, como contribución, se creó una guía para la construcción de *joist* utilizando bambú, para que el lector comprenda paso a paso la fabricación de cada uno de los elementos que conforman dichas vigas de manera sencilla y concisa.

## OBJETIVOS

### General

Diseñar y evaluar vigas *joist* para estructuras de techos livianos utilizando bambú como materia prima para su fabricación.

### Específicos

1. Realizar una recopilación bibliográfica para identificar las variedades de bambú estudiadas en Guatemala, que presenten características aptas para la construcción.
2. Diseñar vigas *joist*, construidas a partir de la combinación, de dos variedades de bambú de las identificadas, que presenten características resistentes óptimas para la construcción.
3. Determinar experimentalmente la resistencia mecánica de vigas *joist* fabricadas con bambú apto para la construcción, a través de ensayos de laboratorio mediante la utilización de la Norma Técnica Peruana E-100 Bambú.
4. Desarrollar una guía de lineamientos específicos para la construcción de vigas *joist* que puedan ser utilizadas para cubiertas de techo livianos, utilizando bambú y anclajes mecánicos para su fijación.



## INTRODUCCIÓN

La construcción de vigas *joist* en la ingeniería se limita al uso de acero y se extiende en menor medida a la madera. Las aplicaciones típicas para estos elementos son techos y entresijos. La falta de una alternativa funcional y de bajo costo que permita construir dichas estructuras, hace necesario el estudio de materiales alternativos para analizar y determinar el comportamiento de estos.

Entre los materiales que pueden ser factibles para construir dichos elementos estructurales, se encuentra el bambú; ya que es un material que presenta propiedades mecánicas y características físicas óptimas para su empleo en la construcción, y que en Guatemala se le da escaso uso en aplicaciones estructurales, pese a que se encuentra una gran variedad de especies en toda la república. Además, el bambú es un material natural renovable, cuyo uso no provoca deforestación y puede sustituir materiales de uso convencional, debido a que es sustancialmente más económico y tiene una mayor capacidad de regeneración.

La recopilación de datos se hace para obtener información vital sobre las características de distintas variedades de bambú, seleccionando dos de ellas, para la construcción de vigas *joist* utilizando criterios acertados y buena práctica de la ingeniería. El diseño se hace utilizando variaciones significativas por cada juego de vigas, como: el peralte efectivo, el ángulo interno de los triángulos, el método de anclaje y la luz efectiva, la cual se mantuvo constante para fines prácticos de elaboración, y ensayos de laboratorio.

Los ensayos y cálculos básicos fueron realizados bajo requerimientos de la Norma Técnica Peruana E-100 Bambú, con los que se determinaron las propiedades mecánicas de los elementos fabricados. Como parte final de este documento se elaboró una guía donde se detallan los lineamientos básicos y recomendaciones necesarias para la construcción de cada elemento que conforman las vigas *joist*.

## 1. EL BAMBÚ COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN

Es el miembro más grande de la familia universal de las herbáceas, el bambú, no solo es la planta con mayor velocidad de crecimiento, sino la mayor productora de biomasa, superado en ambos aspectos solo por las algas marinas.

Las características del material y un favorable balance ecológico, hacen del bambú una alternativa viable para la madera en cualquier aspecto que se considere. La estructura lignocelulósica de las células del bambú y sus propiedades tecnológicas son muy similares a las de la madera. El bambú supera a esta en durabilidad, dureza, careciendo de resina y ácidos tánicos.

- Clasificación del bambú

Es frecuente que las personas que siembran bambú, se dediquen a cruzar unas especies con otras, haciendo híbridos genéticos creando así algunas variaciones en la morfología de las plantas. Hoy existen especies de bambú que pueden presentar hasta 10 variaciones distintas con respecto a la planta natural, todas ellas creadas por el hombre, a estos nuevos tipos de plantas se les llama Variedades, y son comercializadas principalmente, por ser extrañas a la vista de la gente. En la naturaleza, sin embargo, también se dan estas pequeñas variaciones y, por el hecho de que el hombre no participa en la formación de las mismas, se le asigna el término de subespecie.

Las subespecies poseen las mismas características que la especie y se distinguen entre sí por pequeñas diferencias morfológicas. La subespecie es una parte de la especie formada por una o más poblaciones poco diferenciadas y con una distribución regional concreta.

A pesar de que el bambú ha sido explotado por el hombre de muchas maneras, aún se desconocen muchos de sus aspectos botánicos. La mayoría de las especies en América poseen los tallos lisos y generalmente huecos, con paredes relativamente delgadas y rigidizadas transversalmente por tabiques o nudos. Debido a su floración poco frecuente, es difícil clasificarlo como las demás plantas basándose en las características de sus flores y frutos.

- Morfología

Debido a su adaptabilidad, los bambúes exhiben una amplia distribución geográfica y una gran diversidad morfológica. Debido a su naturaleza especializada y a sus floraciones infrecuentes, se le ha dado mucha importancia a las estructuras morfológicas tales como: rizoma, culmo, yema, complemento de ramas, hojas caulinares y follaje para su identificación. A continuación se describen estas estructuras morfológicas.

- Rizoma

Es un eje segmentado típicamente subterráneo que constituye la estructura de soporte de la planta, y juega un papel importante en la absorción. Consta de tres partes: el cuello del rizoma, el rizoma y las raíces adventicias, en la figura 4 se muestra el rizoma de la especie *Guadua Angustifolia*.

- Culmo

Es el eje aéreo segmentado que emerge del rizoma. Este término se emplea principalmente cuando se hace referencia a los bambúes leñosos. El culmo consta de: cuello, nudos y entrenudos, como se observa en la figura 4. Se le denomina cuello a la parte de unión entre el rizoma y el culmo; nudos son el punto de unión de los entrenudos y la parte más resistente del culmo, pueden ser prominentes o casi imperceptibles; entrenudo se le conoce a la porción del culmo comprendida entre dos nudos, pueden ser huecos como en la mayoría de las especies, o sólidos como en la *Guadua*.

- Yema

Está siempre protegida por un propilo; puede ser activa o inactiva, de carácter vegetativo o reproductivo. En el culmo las yemas se localizan por encima de la línea nodal y en posición dística como se ve en la figura 1; rompen su inactividad generalmente cuando el culmo ha completado el crecimiento apical. En algunos bambúes, las yemas basales permanecen dormidas indefinidamente mientras que en otros son las yemas del tercio medio, las que no se desarrollan; a veces hay ausencia total de yemas en el primer tercio o en las tres cuartas partes del culmo.

Todos los bambúes americanos, con excepción de *Chasquea* tienen una sola yema por nudo, estas son importantes en los estudios taxonómicos, pues ayudan a identificar especies, secciones y géneros. También cumplen un papel muy importante en el campo de la biotecnología para la propagación *in vitro*.

Figura 1. **Yema**



Fuente: LONDOÑO, Ximena. Identificación taxonómica de los bambúes de la región noroccidental del Perú. p. 26.

- Complemento de rama

Las ramas se originan en la línea nodal, por encima de esta o sobre un promontorio. Su número y organización varían mucho. Existe, desde una rama, hasta más de 100 ramas por nudo, caso notable en la figura 2, dispuestas en forma de abanico con una rama central dominante o sin ella. La ramificación de los bambúes varía mucho durante los diferentes estados de desarrollo de la planta, sin embargo, la forma más típica de ramificación se observa en la parte media de los culmos adultos.

En algunos bambúes las ramas basales se modifican y llegan a transformarse en espinas como sucede en la mayoría de las especies de la *Guadua*. Las ramas apicales del culmo que, generalmente se desperdician en los manejos silviculturales, tienen alto contenido de fibra y pueden ser aprovechadas en la fabricación de papel y de paneles.

Figura 2. **Ramas nodales en bambú**



Fuente: LONDOÑO, Ximena. Identificación taxonómica de los bambúes de la región noroccidental del Perú. p. 26.

- **Hoja caulinar**

Es la estructura que nace en cada nudo del culmo y tiene como función proteger la yema que da origen a las ramas y al follaje. Presenta cambios progresivos en su tamaño, forma, consistencia y cubierta a lo largo del culmo, en la figura 3 se observan varios tipos de hojas. Se consideran a las de la porción media del culmo como las más características de la especie.

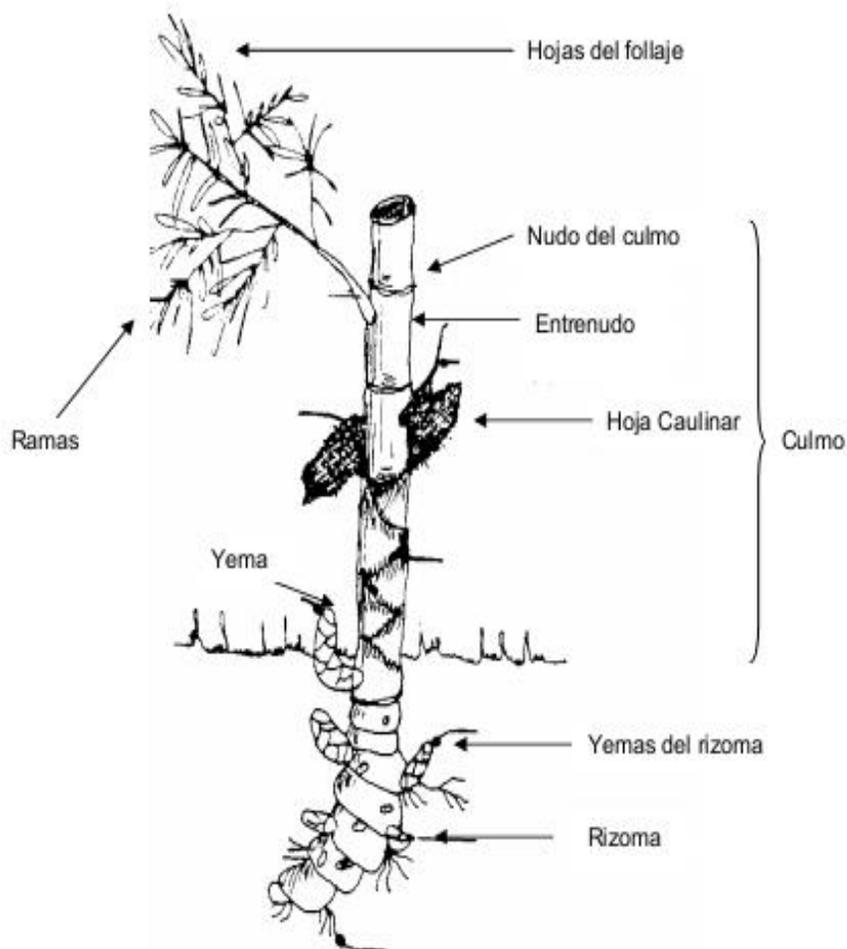
Figura 3. **Hoja caulinar**



Fuente: <http://www.bambúmex.org>. Consulta: junio de 2013.

En una misma especie se pueden observar hojas persistentes en la base y caducas en la porción superior. Son un carácter diagnóstico importante a nivel de especies, secciones y géneros. Estas estructuras, además de proteger las yemas del culmo, se utilizan para la fabricación de objetos artesanales y como elemento decorativo.

Figura 4. **Estructura del bambú**



Fuente: MONROY, Elia. Tratamiento químico de cuatro especies de bambú para su preservación, utilizando ácido bórico-bórax-dicromato de sodio por el método de Inmersión y baño caliente-frío proyecto FODECYT No. 04-2011. p. 5.

En la figura 4 se muestra la morfología típica del bambú, para las distintas especies se presentarán variaciones, en cada una de las partes mostradas en dicha figura.

- Follaje

Es la principal fuente de elaboración de alimento en la planta. En la mayoría de las gramíneas la hoja está constituida por: vaina, lamina, apéndices como aurículas y fibras. El follaje es importante en los estudios taxonómicos sobre todo a nivel anatómico.

### **1.1. Cultivo**

El bambú se aclimata a todo tipo de suelos y terrenos, incluso en plantaciones con terrenos desgastados. Sin embargo, el suelo más apto para su cultivo es el arcilloso o arenoso húmedo, profundo y de buen drenaje que pueda retener algo de humedad; los suelos fangosos salinos no son muy adecuados

- Para cultivar el bambú

Se prepara el terreno, ya sea:

- Limpiando totalmente el terreno.
- Limpiando en fajas paralelas.
- Limpiando únicamente el terreno en los lugares específicos de siembra.

- Para sembrar el bambú
  - Por tallos: se selecciona el tallo que tenga de 2 a 3 años de edad, se escogen los canutos que tengan una yema en cada extremo, se cortan con sierra a ras. En un entrenudo se hace una perforación y se llena de agua. Se siembra inmediatamente, colocándolo horizontalmente en la zanja y cubriéndolo con tierra.
  - Por semilla: se recogen cuando eventualmente florece la planta y se siembran en tablones de invernadero hasta que las plantas alcanzan una altura de 5 a 10 centímetros. luego se transportan en bolsas de plástico y al año se trasplanta al campo definitivo.
  - Por planta madre: se trasplanta el rizoma madre de 1 o 2 años de edad, con tres entrenudos, cuyos canutos tengan una yema y se siembran levemente inclinados, cubiertos por vegetación. También se puede sembrar verticalmente, si es dentro de un vivero.
  
- Para cultivar el bambú
  - Eliminar maleza
  - Ralea
  - Regar
  - Fertilizar
  - Remover tallos secos y rizoma viejo

## **1.2. Cosecha**

La preparación del bambú se inicia con el corte apropiado del tallo, teniendo en cuenta su edad y grado de madurez, del cual depende su resistencia física y su máxima dureza, que la adquiere entre los 4 y 6 años.

La sabiduría campesina recomienda métodos de preservación natural que con el tiempo se han confrontado con la investigación aplicada. Se trata de las observaciones de campo que demuestran la relación entre el contenido de agua en los tallos de bambú y las fases de la luna. Se recomienda efectuar el corte en época de cuarto menguante o fase oscura y preferiblemente a la madrugada entre las 3:00 am y las 5:00 am, cuando hay menor luminosidad y lógicamente poca circulación de líquidos al interior de la planta, es decir, antes de iniciarse la función de fotosíntesis, recomendablemente entre los meses de noviembre y febrero.

Al cortar se puede utilizar un hacha, machete, sierra o instrumentos especiales para bambú. Después del corte es necesario podar las hojas y ramas; y también evitar que el tallo se rompa. Si se corta cada año, debe cortarse el que tenga 3 años y se dejan los más jóvenes, si se cortan cada 2 años, deben cortarse los que tienen 3 y cuatro años de edad y resguardar los más jóvenes.

### **1.3. Variedades aptas para la construcción, disponibles en Guatemala**

Las especies de bambú encontradas en Guatemala aptas para la construcción se pueden mencionar:

- *Bambusa arundinacea*
- *Bambusa textilis*
- *Bambusa tulda*
- *Bambusa tuldoides*
- *Bambusa vulgaris*
- *Bambusa gigantochloa verticillata*
- *Bambusa guadua angustifolia*

- *Bambusa melocana baccifera*
- *Bambusa phyllostachys bambusoides*
- *Bambusa chusquea pittieri*
- *Bambusa giganteus apus*

### **1.3.1. Usos en la construcción**

La mayor aplicación del bambú debiera darse en la construcción, pues este puede combinarse con otros materiales como: maderas, arcilla, cal, cemento, acero, entre otros; de acuerdo con su conveniencia relativa, disponibilidad y costo. Es un material tan versátil que hasta se ha utilizado en la construcción de puentes. Sus cualidades físicas, han hecho que su utilización sea diversa por personas de bajos recursos económicos tanto en países asiáticos como latinoamericanos. Sin embargo, en clases con niveles económicos superiores el bambú se utiliza arquitectónicamente en forma original y artística para decoración de interiores.

### **1.3.2. Ventajas**

- Es un recurso natural renovable, que puede sustituir en parte a la madera de construcción como, posiblemente, a otros materiales.
- Su forma circular y sección, por lo general hueca, lo hacen un material liviano, fácil de transportar y almacenar en forma conveniente y económica.
- Los culmos cuentan con una estructura física que les proporciona alta resistencia en relación a su peso. Además de un tabique transversal rígido llamado nudo.
- El comportamiento del bambú bajo cargas de flexión, demuestra que es un material ideal para la construcción en zonas sísmicas.

- La superficie natural del bambú, generalmente limpia, dura y de textura lisa, a menudo muestra atractivos colores, cuando los culmos han sido manejados convenientemente. Proporcionando a las construcciones elegancia y belleza.
- Los culmos no tienen corteza que pueda considerarse como desperdicio.
- La estructura de las paredes de los tallos permite que puedan ser cortadas transversalmente o rajadas longitudinalmente, con herramientas simples.
- El bambú es el material más sobresaliente en altura, resistencia y peso, lo cual permite su empleo en todo tipo de miembros estructurales.
- El bambú tiene muy buenas cualidades físicas para un material de construcción, como las siguientes:
  - Es un material liviano que permite bajarle el peso a la construcción, factor muy importante para estructuras sismo resistente.
  - Especialmente sus fibras externas lo hacen muy resistente a fuerzas axiales.
  - El rápido crecimiento del bambú lo hace económicamente muy competitivo.
- En el contexto ecológico el uso del bambú juega un papel muy importante, como:
  - El bambú es un recurso renovable y sostenible.
  - Su rápido crecimiento y la alta densidad de culmos por área significa una productividad muy importante de la tierra y una biomasa considerable.
  - El bambú se utiliza como planta de reforestación.
  - Si el bambú lograra reemplazar la madera o el acero en algunas construcciones, la tala de la selva tropical se disminuiría.

- La manipulación del bambú desde el lugar donde crece, hasta la obra necesita poca energía; los gastos que se necesitan en su proceso son muy bajos con respecto al acero u otros materiales en aplicaciones similares.

### **1.3.3. Desventajas**

- Inconvenientes propios del bambú:
  - La resistencia a fuerzas perpendiculares a las fibras, es muy baja lo que significa que el bambú tiene tendencia de rajarse fácilmente paralelo a las fibras.
  - Una construcción de bambú necesita protección por diseño, que asegure que el bambú no recibe directamente ni humedad, ni rayos directos del sol.
  - El bambú tiene un punto de ignición bajo y como es vacío se quema rápido.
  - Todavía no se estableció una técnica confiable de inmunización contra hongos.
- El bambú es un recurso natural que no se puede estandarizar, debido a que:
  - El comportamiento del bambú puede variar mucho con respecto a la especie, al sitio donde crece, edad, contenido de humedad y la parte del culmo o sección que se esté utilizando.
  - Aún no existe ningún código oficial que ofrezca una norma de clasificación para el uso estructural del bambú.
  - Se necesita un buen mantenimiento para la durabilidad.

#### **1.3.4. Tratamiento preventivo**

Entre los mayores enemigos del bambú se encuentran los insectos xilófagos (que atacan únicamente el área libre de cáscara) la humedad y el sol, siendo los azúcares y almidones propios del bambú, el principal alimento para los insectos y hongos cromógenos o manchadores. Por lo tanto, el bambú que se utiliza en la construcción debe tratarse, después del corte, de manera que no se deteriore y se prolongue así su vida útil, la cual puede alcanzar más de cuarenta años. De hecho, si no se cura ni se protege, a lo sumo podrá llegar a durar hasta diez años.

Para reducir el contenido de estos carbohidratos se debe cortar el bambú durante la estación en la cual el contenido de estos sea más bajo, es decir en la estación más seca y cortar el bambú a la edad madura. Generalmente, el bambú madura a los 3 o 4 años. Los tratamientos que se le pueden aplicar a los culmos de bambú son:

- Curado

Los culmos se cortan en la base y se dejan de 1 a 3 semanas dentro del bambudal con sus ramas y sus hojas adheridas; durante este tiempo el contenido de almidón en el culmo se reduce. Como resultado a este tratamiento la resistencia al ataque de insectos perforadores se incrementa, pero no la resistencia a ataque de otros insectos y hongos.

- Ahumado

Los culmos se almacenan en sitios cerrados expuestos al humo, lo cual ocasiona un cambio de coloración en este, con tendencia al color oscuro. Durante este tratamiento, algunas sustancias tóxicas se depositan al interior del culmo y contribuyen a que adquiera alguna resistencia. Por el calor, el almidón depositado dentro de las células del parénquima puede destruirse.

En Japón, los culmos de bambú se colocan en cámaras de calor a 120-150 grados centígrados, durante 20 minutos, lo que se considera efectivo para la protección contra el ataque de insectos. Con este método se pueden presentar fisuras, facilitando el ataque posterior

- Inmersión

Los culmos frescos se colocan en agua estancada o corriente durante varias semanas, y debido a que la gravedad específica del bambú es menor a 1 se tiene que colocar piedras sobre ellos para mantenerlos sumergidos en el agua, durante la inmersión, los almidones y azúcares de las células de parénquima son expulsados o degradados por bacterias de allí que la resistencia contra insectos se incrementa.

Este método no incrementa la durabilidad contra hongos y el agua estancada quizás tenga efectos negativos sobre el culmo. Algunos trabajos han recomendado que un período de inmersión de 4 a 12 semanas sea suficiente.

- Secado

Los tallos de bambú se pueden secar naturalmente, apilándolos horizontalmente bajo cubierta protegidos del sol y la lluvia por un lapso de dos meses con el fin de alcanzar la humedad requerida. El secado artificial puede realizarse en estufas o cámaras cerradas; o a fuego abierto cuidando de girar continuamente los tallos a fin de conseguir un secado uniforme.

- Métodos químicos

Son más efectivos que los no químicos, pero no siempre son aplicables y económicos, los preservantes no deben contener sustancias tóxicas tanto para hombres como para animales y el secado es una parte esencial de estos métodos.

- Método del tanque abierto

Este tratamiento es económico y simple con un buen efecto protector. Los culmos previamente dimensionados se sumergen en una solución de agua y preservante por varios días. La solución penetra el culmo a través de los extremos y parcialmente hacia los lados por efecto de difusión.

- Tratamiento con presión

Se emplea en la industria de la madera. Requiere del uso de autoclave, aplicando presiones entre 0,5 y 1,5 Newton sobre milímetro cuadrado (N/mm<sup>2</sup>). Este método da los mejores resultados en cuanto a la penetración del preservante, pero necesita instalaciones especiales y costosas, no es económico para un material de bajo costo como el bambú.



## 2. VARIEDADES DE BAMBÚ ESTUDIADAS EN GUATEMALA

### 2.1. Tipos de bambú en Guatemala

Las características de las especies de bambú encontradas en Guatemala aptas para la construcción son:

- *Bambusa arundinacea*

Bambú de rizoma paquimorfo, nativo de la India, se encuentra en macollas de tallos en crecimiento compacto arqueado, verde pálido. La longitud de culmo alrededor de 16 metros, diámetro exterior en promedio de 4,9 centímetros, los entrenudos de aproximadamente 32 centímetros, con grosor de pared en promedio de 13 milímetros. Los entrenudos de longitud moderada, huecos, los basales poco inflados, semilustrosos y semifinos, nudos prominentes y de pared gruesa.

La hoja caulinar, cúpula beige, ligera cantidad de setas orales exteriormente, lisa en el interior con una fina franja color café oscura en la pared superior con pubescencia fina, lígula triangular, café oscura. Las hojas verdes, lineal-lanceoladas de 12,6 x 1,9 centímetros de largo y ancho respectivamente, ligera pubescencia en el haz y ligera en la cara inferior, venación deprimida en el haz. Las ramas solitarias en la parte baja del tallo, con hojas reducidas a espinas en gran cantidad. En la parte media y apical del tallo se encuentran 3 ramas principales y 2 secundarias, con hojas reducidas a espinas en ángulo de 70 grados, respecto al culmo, filotaxia alterna-opuesta.

- *Bambusa textilis*

Se le considera nativa del sureste de China, son arqueadas apicalmente, verdes, algunas con pelusa blanca en los entrenudos. Alcanzan una altura aproximada de 17 metros y un diámetro exterior de aproximadamente 6,0 centímetros. Los entrenudos aproximadamente 55 centímetros de longitud, las paredes de los culmos hasta 7,0 milímetros. La hoja caulinar angostamente triangular, lígula cónica, sin aurículas, decidua, café claro, ligera cantidad de setas orales en el exterior. Las hojas verdes, lineal-lanceoladas, lisas en el haz, ligeramente pubescentes en el revés. Las ramas en número de 10 a 12 forman un abanico, en ángulo de 45 grados respecto a la caña.

- *Bambusa tulda*

Bambú nativo de la India. Se presenta en macollas compactas, arqueadas apicalmente, verde oscuro, algunas con pelusa verdosa en los entrenudos. Llegan a medir alrededor de 18 metros y con diámetros promedio de 9,0 centímetros. Los entrenudos alrededor de 58 centímetros de longitud, con paredes de hasta 13,0 milímetros. La hoja caulinar triangular, lígula esférica acumulada, aurículas esféricas, decidua, café claro, cubierta de setas orales en la parte exterior. Las hojas verdes, lineal-lanceoladas, ligera pubescencia blanca azulosa en el envés, lisas en el haz. Las ramas desiguales en número de 3 a 5, ángulo de 60 grados respecto a la caña.

- *Bambusa tuldooides*

Considerada nativa del sureste de China. Se presenta en una macolla de cañas semi compactadas, erectas, verde oscuras, pelusilla blanca azulosa en los entrenudos.

Alcanzan una altura de alrededor de 13 metros y un diámetro alrededor de 5,0 centímetros. Los entrenudos alrededor de 44,0 centímetros, poco inflados, las paredes de las cañas hasta de 11,3 milímetros. La hoja caulinar angostamente triangular de setas orales exteriormente. Las hojas verdes, lineal-lanceoladas, lisas en el haz, ligeramente pubescentes en el envés. Las ramas, una principal y dos laterales, en ángulo de 45 grados respecto a la caña.

- *Bambusa vulgaris*

Originaria de India y Madagascar. Se presenta en macollas de cañas abiertas, arqueadas apicalmente, amarillo oscuro con vetas o líneas verdes (1 a 2) en los entrenudos, algunos presentan pelusa café, tiesa, en los entrenudos. Alcanzan una altura alrededor de 10,5 metros y un diámetro promedio de 6,3 centímetros. Entrenudos de alrededor de 44 centímetros. Las paredes de las cañas en promedio de 6,5 milímetros. La hoja caulinar triangular, lígula aguda, aurículas esféricas, bien desarrolladas, decidua, café oscuro, exteriormente fuerte cantidad de setas orales. Las hojas verdes oscuro, lineal-lanceoladas, aproximadamente de 18 x 3 centímetros de largo y ancho respectivamente, lisas en el haz. Las ramas, una principal y de 4 a 5 laterales, en ángulo de 45 grados respecto a la caña.

- *Bambusa gigantochloa verticillata*

Nativo de Java. En Chócola es el cultivador más abundante, crece en macollas de cañas compactas, arqueadas apicalmente, verde oscuro, algunas con pelusa verdosa en los entrenudos, llegan a medir alrededor de 20 metros con diámetro promedio de 12,0 centímetros. Los entrenudos hasta de 53 centímetros de longitud y grosor en promedio de 13,0 milímetros.

La hoja caulinar triangular, lígula convexa y ondulada, aurículas esféricas, desiguales, café claro, fuerte cantidad de setas orales, en ángulo de 45 grados respecto a la caña. Las hojas verdes, lineal-lanceoladas, de 35 x 6,3 centímetros respectivamente de largo y ancho, lisas en el haz, ligeramente pubescencia blanquecina en la cara inferior.

- *Bambusa guadua angustifolia*

Bambú de rizoma paquimorfo, nativo del sureste suramericano, particularmente de Colombia y Ecuador. Se encuentra en grupos de tallos espaciados, arqueados apicalmente; los tallos presentan color verde oscuro a verde claro y una banda blanquecina de 1,0 a 1,5 centímetros de ancho en los nudos. Generalmente llega a medir 25 metros, con un diámetro de 15 centímetros y entrenudos que varían de 20 a 40 centímetros de largo, el espesor de pared de hasta de 30,0 milímetros. La hoja caulinar triangular, lígula cónica, sin aurículas, decidua, café oscuro, fuerte cantidad de setas orales exteriormente. Las ramas basalmente solitarias, en la parte media 2 a 3, anguladas a 60 grados respecto a las cañas. Hojas verde pálido, oblongo-lanceoladas, lisas en el haz, ligeramente pubescentes en el envés. Espinas en gran cantidad, principalmente en las ramas basales.

- *Bambusa melocana baccifera*

De rizoma paquimorfo, nativo de India y Burma. Se encuentra en grupos de tallos delgados y abiertos, arqueados apicalmente, verde pálido. Con longitud alrededor de 12,5 metros, con diámetro promedio de 4,4 centímetros. Los entrenudos alrededor de 57 centímetros, y grosor de pared en promedio de 4 milímetros.

Los entrenudos largos, huecos, lisos, lustrosos, verdes, finos, color naranja en la parte próxima superior al nudo y se presentan algunos tallos con moteado blanco. La hoja caulinar cuneiforme, beige claro, lisa, lancéola. Las hojas verdes, oblongo-lanceoladas, 33,1 x 5,4 centímetros de largo y ancho respectivamente, lisas en el haz, ligera pubescencia azulada en la cara inferior, venación deprimida en el haz. Las ramas, 3 principales y de 12 a 15 secundarias, presentes desde la parte baja del tallo, en ángulo de 30 grados con respecto a la caña y filotaxia alterna-opuesta.

- *Bambusa phyllostachys bambusoides*

De rizoma leptomorfo, nativo de China. Se presentan en grupos de tallos bastante abiertos, erectos, verde oscuro, pelusa blanca en los entrenudos. La longitud del tallo alrededor de 8,6 metros, diámetro promedio de 2,7 centímetros, longitud del entrenudo alrededor de 23,4 centímetros y espesor de pared promedio de 5,0 milímetros. Los entrenudos cortos, huecos, poco inflados, opacos, semi-finos, algunos tallos presentan entrenudos arqueados, nudos poco inflados.

La hoja caulinar triangular café claro, con manchas café oscuro que gradúan cierta simetría, delgada, quebradiza, ninguna pubescencia, la lígula pequeña, triangular y generalmente de color oscuro. Las hojas verdes, oblongo-lanceoladas de 13,5 x 4,0 centímetros de largo y ancho respectivamente, ligera pubescencia en el haz y cara inferior, venación deprimida en el haz. Las ramas en número de 2, presentes en la parte superior de los tallos en ángulo de 40 grados con respecto a la caña y filotaxia alterna-opuesta.

- *Bambusa chusquea pittieri*

Bambú de sombra que tiende a tupir, son erectos o suberectos apicalmente pendulosos o trepadores, rizoma paquimorfo, culmos llegan a medir alrededor de 18 metros, formando macollas relativamente abiertas, con longitud de entrenudos alrededor de 15 a 25 centímetros, con un diámetro alrededor de 3 a 5 centímetros y un espesor de hasta 7,0 milímetros. Compactos, opacos, semilisos, oscuramente surqueados arriba de la intersección de las ramas, nudos ligeramente inflados, todos germiníferos o sin yemas en nudos inferiores. Hoja caulinar decidua, mucho más grande que el entrenudo, parecida a papel fino cuando seca, oblonga triangular, con venación estriada de color café oscura en la parte superior de la vaina, en la base ciliada de color café.

## **2.2. Regiones donde hay disponibilidad de bambú**

Naturalmente, las más de 1 400 especies reconocidas de bambúes, son plantas que habitan las zonas tropicales como se ve en la figura 5, aunque pueden crecer en climas templados, viven silvestres desde el nivel del mar hasta las altas montañas nevadas. La mayoría de los bambúes prefieren habitar en lugares húmedos y conservados, donde la presencia de neblinas es frecuente, o bien en las orillas de arroyos y ríos, también existen especies que viven en lugares secos la mayor parte del año y que solo obtienen el agua en los pocos días de lluvia en determinada región, el bambú es distribuido naturalmente en todo el país.

Figura 5. **Distribución natural del bambú en el mundo**

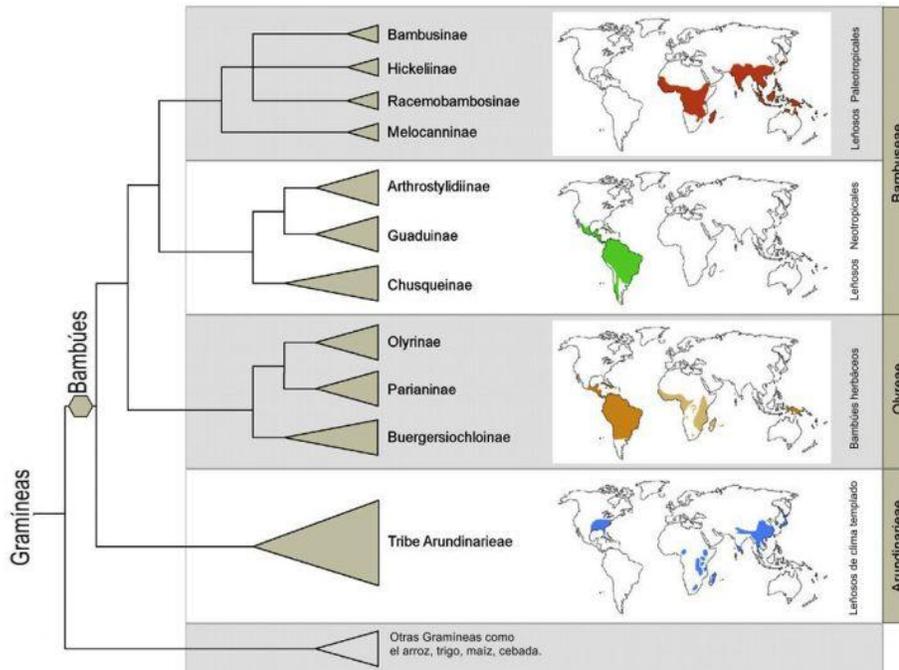


Fuente: <http://www.bambúmex.org>. Consulta: junio de 2013.

En los países de Asia, los bambúes son plantas bien conocidas, pues han sido utilizadas por el hombre desde tiempos remotos. Los hay silvestres en África y en casi todos los países de América. Pueden crecer en extensas poblaciones donde son los únicos vegetales viviendo o bien como individuos solitarios formando parte del bosque o la selva.

Es importante mencionar que los bambúes introducidos en Guatemala, son generalmente cultivados en plantaciones donde el hombre puede controlar sus condiciones de crecimiento. Algunas de estas especies, como cualquier planta cultivada, requieren de agua, suelo, temperatura y otros factores del medio, que son específicos para su ideal crecimiento. Así que no es fácil determinar las áreas o regiones donde estos bambúes crecen, sin embargo, la presencia de agua es un factor esencial, aunado a la riqueza de los suelos donde se suelen plantar, en la figura 6 se observan las distintas especies de bambúes y la región de donde estas son nativas.

Figura 6. **Clasificación del bambú y su origen por especie**



Fuente: <http://www.bambúmex.org/paginas/clasificacion.htm>. Consulta: junio de 2013.

### 2.3. Características físicas de las diversas variedades estudiadas

- Contenido de humedad

Los tallos vivos de bambú, como los árboles, contienen una cantidad considerable de humedad debido a la presencia de savia. En ella se conducen los alimentos de la planta, obtenidos del suelo por medio de los rizomas y es indispensable en el crecimiento y vida del bambú. El contenido de humedad en los bambúes jóvenes es casi igual en diversas partes del tallo, y en cambio, en los tallos maduros, el contenido de humedad decrece con la altura de este.

Los bambúes jóvenes contienen mayor humedad y exigen más tiempo para el secado, sin embargo, su secado es más rápido que el de los tallos maduros. Esto se atribuye a que la estructura de las paredes es diferente.

El contenido de humedad del bambú, como el de la madera, se expresa como un porcentaje de su peso seco al horno. Su determinación puede hacerse por el método de secado al horno o por medio de medidores eléctricos, que aunque estos determinan la humedad de forma rápida, es menos preciso que el método al horno. Se realiza secando las muestras con el horno aproximadamente a una temperatura de 100 grados centígrados.

- Contracción

Conforme se van secando los tallos de bambú, estos empiezan a perder agua en sus paredes trayendo consigo contracciones volumétricas. Cuando la humedad del bambú se equilibra con la del ambiente, la retracción cesa, ya que el efecto de esta es proporcional al contenido de humedad del tallo y del estado higrométrico del ambiente, existe una diversidad de factores que afectan el secado tales como: especie, condiciones de secado, posición de la muestra respecto al tallo, espesor de la pared del tallo y grado de madurez del mismo.

Los cambios volumétricos son mayores en los bambúes jóvenes que en los de mayor edad. Durante el secado, los bambúes jóvenes de paredes delgadas se deforman invariablemente y sus paredes tratan de aplastarse. Los tallos maduros con paredes de espesores grandes tienen la tendencia a presentar fisuras en la superficie, particularmente cuando las condiciones de secado son severas. La contracción se produce desigualmente según el sentido que se considera y su efecto es mayor en los entrenudos del tallo.

- Densidad

Esta característica física resulta muy importante, pues indica el peso del bambú por unidad de volumen. La densidad difiere para cada especie y su valor también varía entre los culmos de una especie, en los diversos tramos de un este, así como en las partes internas y externas del mismo. Tanto el peso como el volumen varían con la cantidad de humedad en la planta y por ende, con el grado de madurez del tallo. El valor de la densidad carece de significado, a menos de que se especifiquen las condiciones para su cálculo.

Tabla I. **Características físicas de cuatro especies de bambú 1**

No.	Especie	( $\rho$ ) (g/cm <sup>3</sup> )	C. H (%)
1	<i>Bambusa textilis</i>	0,77	15,6
2	<i>Bambusa tulda</i>	0,87	14,8
3	<i>Bambusa tuldoides</i>	0,78	14,2
4	<i>Bambusa vulgaris</i>	0,69	16,6

Fuente: URRUTIA, Juan. Propiedades físico-mecánicas del bambú. p. 25.

Tabla II. **Características físicas de cuatro especies de bambú 2**

No.	Especie	( $\rho$ ) (g/cm <sup>3</sup> )	C. H (%)
5	<i>Bambusa arundinacea</i>	0,56	14,9
6	<i>Bambusa melocana baccifera</i>	0,73	14,4
7	<i>Bambusa phyllostachys bambusoides</i>	0,60	14,6
8	<i>Bambusa chusquea pittieri</i>	0,95	15,5

Fuente: MORALES, Hernán. Propiedades físico-mecánicas del bambú. p. 32.

Tabla III. **Características físicas de tres especies de bambú**

No.	Especie	( $\rho$ ) (g/cm <sup>3</sup> )	C. H (%)
9	<i>Giganteus apus</i>	0,96	37,3
10	<i>Bambusa gigantochloa verticillata</i>	0,63	16,2
11	<i>Bambusa guadua angustifolia</i>	0,62	14,3

Fuente: CANO, Ericka. Evaluación tecnológica de 3 especies de bambú. p. 64.

En las tablas I, II y III se muestran las características físicas de las especies estudiadas obtenidas gracias a la recopilación bibliográfica realizada.

#### **2.4. Propiedades mecánicas de las diversas variedades estudiadas**

- Tensión paralela a la fibra

Es la mejor propiedad que posee el bambú. No obstante, es poco común en la práctica ejercer tensión longitudinal a una especie de bambú e incluso madera. Esta radica en la dificultad de ajustar los extremos lo suficiente para desarrollar un esfuerzo puramente de tensión al miembro. Debido a que la resistencia a la tensión supera la resistencia a la compresión y mucho más al esfuerzo cortante, resulta por consiguiente, difícil efectuar ensayos satisfactorios con tensión paralela a la fibra.

- Compresión paralela a la fibra

Mucho del bambú empleado en la construcción está sometido a compresión paralela a la fibra, por ejemplo; en columnas, vigas y otros.

Los cuales están sujetos a cargas que tienden a aplastar y acortar los miembros longitudinalmente. Los ensayos estáticos de compresión pueden ser valiosos para indicar directamente el desempeño de tales partes bajo cargas de servicio.

La resistencia a compresión del bambú es relativamente alta, pero carece de significado si no se especifica el grado de sazónamiento y la relación entre la longitud y el diámetro de la pieza. Es importante definir el grado de sazónamiento puesto que, como en la madera, la humedad disminuye la rigidez de las células fibrosas, trayendo consigo una disminución en las propiedades mecánicas, sobre todo en compresión y flexión. Asimismo, se tiene que considerar la relación entre la longitud y el diámetro. Si la longitud de un tallo es suficientemente grande con respecto a la mínima sección transversal, la resistencia bajo carga compresiva disminuye considerablemente por el efecto de flambeo. Una falla por flambeo lateral o flexión se produce antes que se desarrolle por completo la resistencia a compresión.

- Corte paralelo a la fibra

El esfuerzo cortante es una medida de la capacidad del bambú a resistir fuerzas que tienden a producir deslizamiento de una porción del material con relación a otra porción adyacente. El corte es una fuerza que actúa paralelamente a un plano, en contraste a la tensión y compresión que son normales al área considerada. La fractura por corte es muy diferente de la tensión o compresión, puesto que no hay reducción localizada del área ni alargamiento. El empleo del bambú en la construcción involucra la presencia de esfuerzos cortantes en mayor o menor grado y las fuerzas que los producen pueden actuar a lo largo de la fibra, o a través de la fibra y en forma inclinada o en diagonal a la misma.

Muchos de los detalles de uniones de elementos de bambú están sujetos a corte paralelo a la fibra. Para corte perpendicular a la fibra no ocurre falla directa en el plano de la sección transversal, en vista de que las otras propiedades hacen que la falla ocurra en una u otra forma, causada por aplastamiento a través de la fibra. El efecto del corte oblicuo o en diagonal se puede observar en los planos inclinados de falla en columnas cortas ensayadas a compresión.

- Tensión perpendicular a la fibra

Es la disgregación de las fibras por fuerzas que actúan perpendicularmente a las mismas. Se relaciona estrechamente al clivaje por la actuación de separar el bambú a lo largo de la fibra. También está vinculado al fenómeno del agrietamiento superficial que durante el secado todas las especies de bambú son más o menos propensas. Por lo general, las grietas o rajaduras en la superficie se presentan cuando los esfuerzos que se crean durante el secado exceden a la resistencia del bambú en tensión perpendicular a la fibra. Por esta razón, la tendencia que el bambú tiene de rajarse limita el uso de clavos o pernos para asegurar las uniones.

- Clivaje

Esta se utiliza para denotar la resistencia que ofrece el bambú al desgarramiento. Se expresa como la fuerza necesaria para provocar la falla por unidad de longitud. En esta prueba las fuerzas actúan en forma de cuña para hender el bambú a lo largo de la fibra. Una baja resistencia al clivaje favorece cortar longitudinalmente las cañas de bambú, mientras que una alta resistencia es requerida para uniones con pernos, clavos, clivajes y otros tipos.

La tabla IV muestra las propiedades mecánicas de las diferentes especies de bambú estudiadas anteriormente, estos datos fueron recopilados bibliográficamente.

Tabla IV. **Propiedades mecánicas de las especies de bambú**

No.	Especie		Tensión paralela	Tensión $\perp$	Compresión paralela	Corte paralela	Clivaje
			$\sigma_{\text{máx.}}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{\perp}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{\text{máx.}}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{\text{máx.}}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{\text{máx.}}$ (kg/cm <sup>2</sup> )
1	<i>Textilis</i>	con nudo	1 230,00	27	645,00	124,00	50
		sin nudo	2 844,00		701,00		
2	<i>Tulda</i>	con nudo	1 554,00	40	788,00	126,00	48
		sin nudo	2 280,00		758,00		
3	<i>Tuldoides</i>	con nudo	1 506,00	22	601,00	117,00	46
		sin nudo	2 108,00		554,00		
4	<i>Vulgaris</i>	con nudo	1 323,00	29	394,00	66,00	46
		sin nudo	1 872,00		402,00		
5	<i>Arundinacea</i>	con nudo	xx	xx	829,00	xx	xx
		sin nudo	xx		479,00		
6	<i>Melocana baccifera</i>	con nudo	1 079,00	xx	577,00	xx	xx
		sin nudo	2 469,00		831,00		
7	<i>Phyllostachys bambusoides</i>	con nudo	1 398,00	xx	780,00	xx	xx
		sin nudo	2 001,00		798,00		
8	<i>Chusquea pittieri</i>	con nudo	1 254,00	xx	1 173,00	xx	xx
		sin nudo	1 436,00		1 007,00		
9	<i>Gigantochloa verticillata</i>	con nudo	xx	19.84	xx	118,35	25
		sin nudo	2 551,26		410,27		
10	<i>Guadua angustifolia</i>	con nudo	xx	21.86	xx	109,22	10
		sin nudo	2 522,20		422,76		
11	<i>Giganteus apus</i>	con nudo	xx	18.29	xx	126,84	xx
		sin nudo	1 530,12		410,73		

Fuente: elaboración propia.

### 3. GENERALIDADES PARA EL DISEÑO DE VIGAS *JOIST*

#### 3.1. Definición de viga *joist*

Una viga *joist* es un miembro estructural con un sistema de alma abierta, diseñado como un miembro simplemente apoyado, el cual soporta directamente las cargas de la cubierta o entrepiso, utilizando tanto elementos longitudinales como transversales, dispuestos en ángulos constantes, formando triángulos a lo largo de la luz.

- Ventajas
  - Su peso propio es menor, comparado con las vigas de alma llena.
  - Debido a su sistema de alma abierta, proporcionan espacio útil para las instalaciones como tuberías, ductos o cableado.
  - Puede diseñarse como una estructura en dos planos o tridimensional (estéreo-estructura), para soportar cargas en ambas direcciones y no presentar problemas de torsión.
  - Es posible analizarlo estáticamente como una viga.
  
- Desventajas
  - Debido a la geometría y composición de sus miembros el montaje es un tanto complicado y caro, en comparación con otros elementos.
  - Necesitan de un peralte mayor, en comparación a las vigas de alma llena.

- Poseen gran cantidad de puntos críticos, pues cada unión de triángulo representa un posible punto de falla.

### 3.2. Materiales utilizados para la construcción de vigas *joist*

Los materiales para la construcción de vigas *joist* son muy limitados, pues son pocos los materiales que presentan características físicas adecuadas, además de las propiedades mecánicas necesarias para resistir las cargas a las que serán sometidas, pero más importante en librar satisfactoriamente las luces para las cuales son diseñadas. El material más común para el diseño de estos elementos es el acero, pues presenta las propiedades óptimas para cubrir las necesidades requeridas, debido a esto es posible encontrar códigos de diseño para estos elementos en acero, un variedad de *joist* construidos de este material se presenta en la figura 7.

Figura 7. **Vigas *joist* de acero**



Fuente: <http://www.csn.gob.ve>. Consulta: junio de 2013.

En estos ejemplos, los cordones longitudinales están constituidos por un par de perfiles angulares de acero, mientras que el cordón diagonal con una barra de acero lisa, esta no es la única configuración posible para la construcción de estos elementos con dicho material, ya que es posible encontrar configuraciones donde se utilicen elementos tubulares, así como el uso de los distintos perfiles en acero

También es factible construir estos elementos utilizando madera estructural, utilizando pegamento de distintos tipos para la fijación en las intersecciones entre cordones longitudinales y los diagonales, como se muestra en la figura 8, en los últimos años se ha visto un nuevo diseño de viga *joist* muy innovador, pues toma los materiales acero y madera, observable en la figura 9, y combina sus propiedades, para el ensamble de este tipo de *joist* es necesario el uso de maquinaria especializada, es por ello que su producción se realiza industrialmente, con estos se logra reducir peraltes necesarios para el diseño, haciéndolos de uso común en la construcción de entresijos.

Figura 8. ***Joist* fabricado de madera**



Fuente: <http://www.timberframe.co.uk>. Consulta: junio de 2013.

Figura 9. **Joist fabricado de madera y metal**

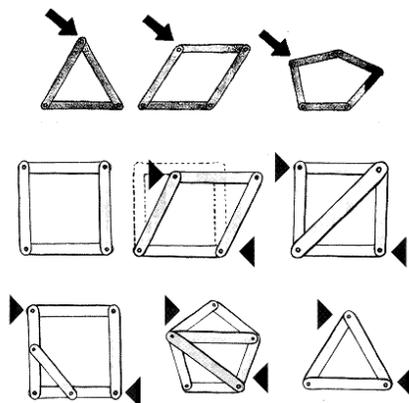


Fuente: <http://www.timberframe.co.uk>. Consulta: junio de 2013.

### 3.3. Geometrías recomendadas para la construcción de vigas *joist*

Para estructuras de gran tamaño como torres, puentes, cubiertas de techos, se utilizan comunmente barras de madera o metal unidas entre sí en un punto llamado nudo, formando triángulos debido a que este es el único polígono que no se deforma cuando se le aplica fuerza y cualquier otra forma geométrica no será lo suficientemente rígida hasta que no se triángule.

Figura 10. **Formas geométricas indeformables**



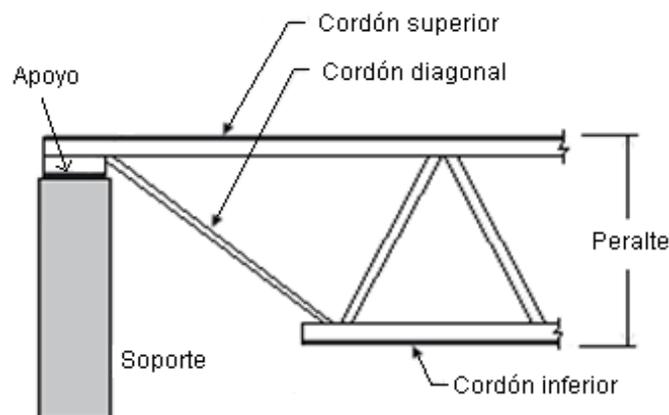
Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Paint.

Como es observable en la figura 10, al empujar dos vértices de un polígono, por la acción de fuerzas, este se deforma. Dicha reacción sucede en todos los polígonos menos en el triángulo pues la acción de las fuerzas en este no modificará su forma. Los otros polígonos pueden hacerse rígidos triangulándolos, es decir, colocando nuevas barras entre sus esquinas formando triángulos, a esto se le conoce con el nombre de arriostrar. Cuando se trata de estructuras metálicas, se hacen necesarios elementos resistentes que faciliten la unión.

### 3.4. Elementos complementarios para la construcción de vigas *joist*

En todas las vigas *joist* la parte longitudinal de arriba es llamado cordón superior, y la parte longitudinal de abajo, cordón inferior. Los elementos de triangulación son llamados diagonales o cordón diagonal. Para el análisis de una viga *joist*, no importando el material del cual está construida, es necesario comprender los elementos fundamentales que la conforman, los cuales se muestran en la figura 11.

Figura 11. Elementos comunes de una viga *joist*

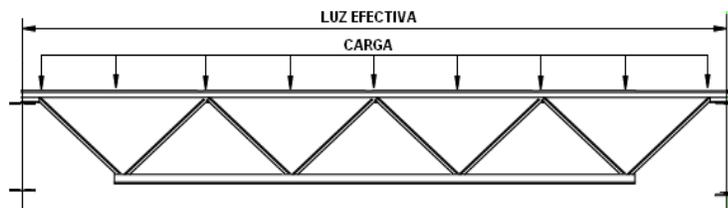


Fuente: elaboración propia, con programa Auto Cad 2010.

Un *joist* es un elemento, simplemente apoyado cuyo comportamiento típico, es trabajar bajo esfuerzos de flexión; dicho esfuerzo provoca tensión y compresión, separados por una línea imaginaria llamada eje neutro, produciéndose las máximas tensiones en las fibras extremas del cordón inferior y en las fibras extremas del cordón superior los máximos esfuerzos de compresión.

De igual forma aparecen los esfuerzos cortantes, estos no pueden ser soportados por el material del cual está fabricada la viga, para ello se colocan los elementos diagonales del alma además de unir los cordones longitudinales y al mismo tiempo aligerar la viga, en la figura 12 se muestra un elemento típico de *joist*, el cual normalmente estará bajo cargas uniformemente distribuidas, con su cordón inferior más corto que el superior y con apoyos simples que no rigidizan el *joist*.

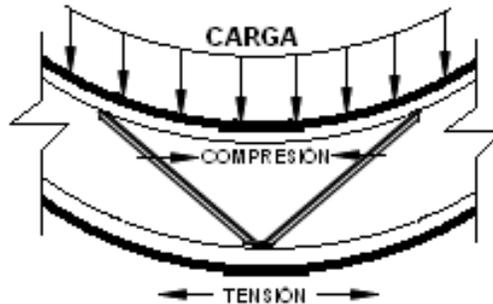
Figura 12. **Esquema de *joist* típico**



Fuente: elaboración propia, con programa Auto Cad 2010.

El efecto que tendrá un *joist* cuando se somete a una solicitud de carga, es de flexión, donde las fibras del cordón superior están bajo el efecto de compresión y las fibras del cordón inferior bajo tensión. En la figura 13 se muestra como la aplicación de una carga uniformemente distribuida inducirá flexión en toda la estructura, provocando el efecto antes mencionado.

Figura 13. **Corte de *joist* bajo solitud de carga**



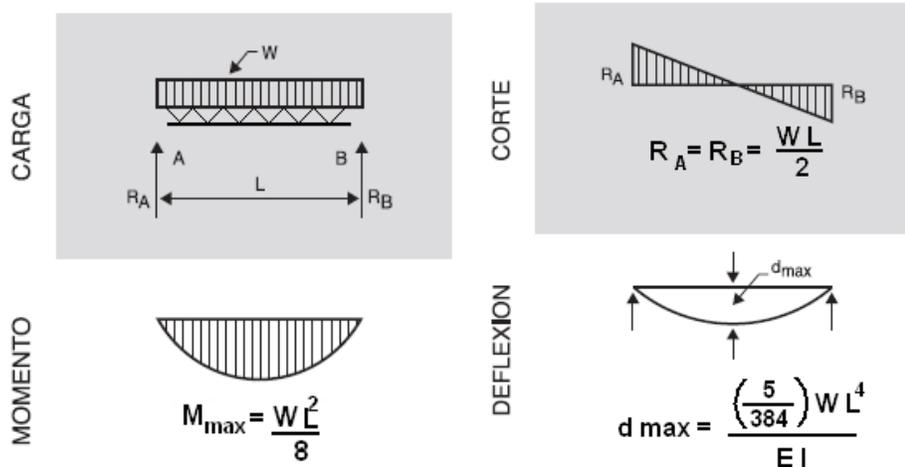
Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Paint.

### **3.5. Teoría o modelo estático, para el cálculo de la resistencia de vigas *joist***

Las limitaciones y esfuerzos admisibles dados, son aplicables a estructuras analizadas por procedimientos convencionales de análisis lineal y elástico. La determinación de los efectos de las cargas (deformaciones, fuerzas y momentos), en los elementos estructurales debe efectuarse con hipótesis consistentes y con los métodos aceptados en la buena práctica de la ingeniería.

Para la determinación de estos efectos existen ecuaciones ya establecidas, que vienen de un extenso análisis matemático, al cual no se hará referencia debido a que excede el alcance de nuestra investigación. En la figura 14 se muestran dichas ecuaciones teóricas y son aplicadas cuando se diseña un elemento simplemente apoyado con idealización de carga uniformemente distribuida, siendo perfectamente aplicables al diseño de vigas *joist* utilizadas en la construcción de techos livianos utilizando materiales dúctiles.

Figura 14. Diagramas teóricos de viga simplemente apoyada



Fuente: Altos hornos de Mexico (AHMSA). Manual de diseño para la construcción con acero. p. 221.

En el diseño de elementos sometidos a flexión, se debe verificar que la resistencia de este sea mayor que la requerida por las cargas aplicadas y que las deflexiones que se producen permitan el uso satisfactorio del elemento para el fin concebido. Tanto las cargas aplicadas sobre la viga, como el peso propio de los elementos que la conforman, producen la flexión en ella, principalmente en su propio plano. Los alargamientos o acortamientos de los elementos, producen deformación en la viga, dando origen en cada cordón a esfuerzos de tracción o compresión, o sea, a esfuerzos axiales o normales; las correspondientes tensiones de las barras se llaman tensiones principales.

En el caso de *joist* fabricado de acero, con uniones soldadas o pernadas, la flexión del conjunto origina también flexión en los diagonales, debido a la rigidez de los nudos; esta flexión da lugar a tensiones adicionales, que se denominan tensiones secundarias.

Sin embargo, si los elementos están convenientemente dispuestos de modo que sus ejes converjan en cada nudo a un punto, la presencia de las tensiones secundarias no afectará prácticamente la magnitud de las tensiones principales; así, en el cálculo se puede prescindir de la rigidez de las uniones y suponerlas articuladas.

Si el constructor puede garantizar que la rigidez de cada uno de los nodos en un *joist* será, no perfectamente igual, semejante, con el fin de poder despreciar el comportamiento donde aparecerán tensiones secundarias en cada una de las barras diagonales. Suponiendo que cada diagonal tendrá la misma tensión o compresión, para así poder idealizar el *joist* y analizarlo como una viga. Con lo anterior se puede realizar el diseño de los cordones de la siguiente forma:

- Peralte

Según códigos de diseño de *joist* en acero se recomienda utilizar las siguientes relaciones con base en la luz efectiva a cubrir.

$$\text{Techos} = \frac{L}{24}$$

$$\text{Entrepiso} = \frac{L}{20}$$

Estos valores son útiles cuando se diseñan *joist* en acero, hay que tener en cuenta que un material como el bambú al no tener antecedentes de referencia se debe diseñar con más precaución, siendo conservadores, por lo que se piensa que los valores para el peralte de un *joist* fabricado con bambú debería estar entre los rangos de 10 a 15 por ciento de la luz efectiva a cubrir.

- Cordón inferior

Debido a que este cordón trabaja solamente a tensión, se necesita conocer la fuerza que está actuando sobre él, para ello es necesario saber el momento máximo al que estará sometido y de ahí un simple despeje dará la fuerza a tensión aplicada, de la siguiente forma:

Ecuación 1

$$M = P (d)$$

Ecuación 2

$$M = \frac{WL^2}{8}$$

Ecuación 3

$$P = \frac{M}{d}$$

Ecuación 4

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Donde:

M: momento máximo aplicado sobre la viga

P: fuerza axial de tensión sobre el cordón inferior

d: peralte efectivo de la viga

L: longitud del vano de la viga

A: área neta transversal del cordón inferior

$\sigma$ : esfuerzo de tensión aplicado al cordón inferior

El valor de este esfuerzo ha de ser comparado con el valor máximo permisible de tensión paralelo a las fibras de bambú dependiendo la especie sobre la cual este actuando dicho esfuerzo.

Debe calcularse también, el esfuerzo de tracción perpendicular a las fibras, el cual será obtenido mediante la relación de la fuerza aplicada y el área de falla, esta no es la misma utilizada para el esfuerzo de tracción paralelo a las fibras, sino que es el doble del espesor promedio de pared multiplicado por la longitud promedio del entrenudo de la especie que está resistiendo dicho esfuerzo.

Ecuación 5

$$\sigma_{\perp} = \frac{P}{2el} \leq \sigma'_{\perp}$$

Donde:

$\sigma_{\perp}$ : esfuerzo de tracción perpendicular a las fibras actuante

P: fuerza aplicada en ensayo

e: espesor promedio de pared

l: longitud media del entrenudo

$\sigma'_{\perp}$ : tracción perpendicular a la fibra permisible, modificada

- Cordón superior

El análisis de este cordón requiere de un cálculo más complejo debido a que trabaja bajo flexión y no solo a tensión o compresión, para ello existen métodos inclusive códigos aprobados de cálculo en acero.

En este caso dichos métodos no son cien por ciento acertados debido a la diferencia significativa que existe entre el acero y el bambú, es por eso que el análisis se hace con base en lo que rige la Norma Técnica Peruana E-100 bambú:

- Flexión

El esfuerzo a flexión actuante ( $f_b$ ) sobre cualquier sección de bambú, no debe exceder el valor del esfuerzo a flexión admisible ( $f'_b$ ) modificado por los coeficientes correspondientes, de acuerdo a la siguiente fórmula:

Ecuación 6

$$f_m = \frac{M}{S} \leq f'_m$$

Donde:

$f_m$ : esfuerzo a flexión actuante

$f'_m$ : esfuerzo admisible modificado

$M$ : momento máximo actuante sobre el elemento

$S$ : módulo de sección

Ecuación 7

$$S = \frac{I}{C}$$

$I$ : Momento de Inercia de la sección analizada

$C$ : Distancia desde el centroide hasta la fibra extrema

Nota: el momento de inercia “I” para una sección compuesta se debe calcular con el teorema de ejes paralelos.

- Esfuerzo cortante paralelo a las fibras

El esfuerzo cortante paralelo a las fibras actuante ( $F_v$ ) sobre cualquier sección de bambú, no debe exceder el valor del esfuerzo cortante paralelo a las fibras, admisible ( $F'_v$ ), modificado por los coeficientes correspondientes, de acuerdo a la siguiente fórmula:

Ecuación 8

$$F_v = \left( \frac{2V}{3A} \right) \left( \frac{3De^2 - 4De^2 + 4t^2}{De^2 - 2De(t) + 2t^2} \right) \leq F'_v$$

Donde:

$F_v$ : esfuerzo cortante paralelo a las fibras actuante.

$A$ : área de la sección transversal del elemento de bambú

$De$ : diámetro externo promedio de la sección de bambú

$t$ : espesor promedio de la sección del bambú

$F'_v$ : esfuerzo admisible para corte paralelo a las fibras, modificado

$V$ : fuerza cortante en la sección considerada.

- Aplastamiento o compresión perpendicular a las fibras

Este esfuerzo de aplastamiento ( $F_c$ ), debe verificarse especialmente en los apoyos y lugares en los que haya cargas concentradas en áreas pequeñas. El esfuerzo de compresión perpendicular a las fibras actuante no debe exceder al admisible modificado por los coeficientes correspondientes.

Ecuación 9

$$F_c = \frac{3RDe}{2t^2l} \leq F'_c$$

Donde:

F'c: esfuerzo compresión perpendicular a la fibra, modificado

Fc: esfuerzo actuante en compresión perpendicular a la fibra

De: diámetro externo promedio de la sección de guadua

t: espesor promedio de la sección de guadua rolliza

l: longitud de apoyo

R: fuerza aplicada en el sentido perpendicular a las fibras

Todos los entrenudos que estén sometidos a esfuerzos de compresión perpendicular a la fibra deben estar llenos de mortero de cemento, tacos de madera u otro material que garantice una rigidez similar. En el caso en que esto no se cumpla el valor del esfuerzo admisible F'c se debe reducir a la cuarta parte F'c/4

- Cordones diagonales

Se sabe que cada uno de los cordones diagonales estará recibiendo diferentes valores de corte dependiendo de su posición dentro de la viga *joist*. Con el fin de unificar el método constructivo, se diseñan todos los cordones diagonales con el valor máximo de corte, debido a que sería muy engorroso diseñar cada uno de estos elementos por separado, por lo tanto este diseño se realizará mediante las siguientes ecuaciones, en la figura 15 se muestra únicamente el extremo de la viga, pues es aquí donde se encuentra el diagonal que recibe mayor esfuerzo.

Ecuación 10

$$R = \frac{WL}{2}$$

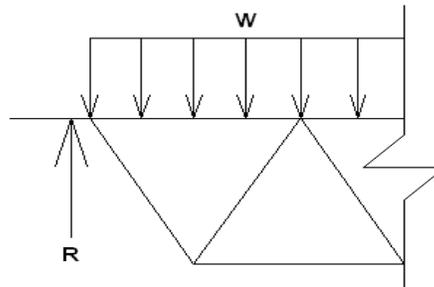
Donde:

W: carga distribuida aplicada

L: longitud total del vano

R: reacción en el apoyo de la viga

Figura 15. **Sección apoyada de viga *joist***



Fuente: elaboración propia, con programa Auto Cad 2010.

La figura 16 muestra todas las fuerzas que son inducidas al diagonal a diseñar como la geometría del tramo, además en la figura 17 se puede analizar por medio de un triángulo rectángulo, cómo obtener la fuerza de compresión sobre este.

Ecuación 11

$$\text{sen } (\beta) = \frac{d}{Ld}$$

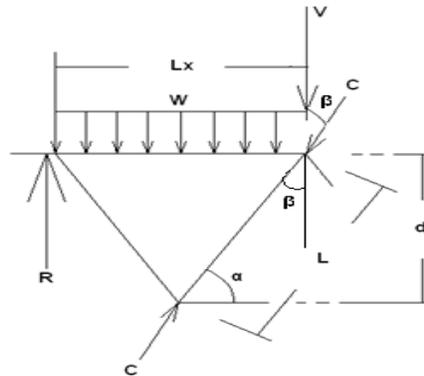
Donde:

d: peralte de la sección seleccionada

L: longitud del cordón diagonal

$\beta$ : ángulo menor formado por el cordón diagonal y uno longitudinal.

Figura 16. **Geometría y fuerzas sobre apoyo de joist**



Fuente: elaboración propia, con programa Auto Cad 2010.

Ecuación 12

$$C = V \text{sen}(\beta)$$

Sustituyendo las ecuaciones 1 en 2 obtenemos la ecuación 3:

Ecuación 13

$$c = v \left( \frac{d}{Ld} \right)$$

Donde:

C: es el valor de compresión en el cordón diagonal de referencia

Ld: longitud del cordón diagonal

d: peralte de la viga

Y los valores faltantes se calcularon con las ecuaciones siguientes:

Ecuación 14

$$V = R - W(Lx)$$

Ecuación 15

$$Ld = \sqrt{d^2 + \left(\frac{Lx}{2}\right)^2}$$

Ecuación 16

$$Lx = \frac{2d}{\tan \alpha}$$

Donde:

V: el valor del cortante en el punto de intersección con el cordón diagonal

R: valor de la reacción en el apoyo de la viga

W: valor de la carga uniformemente distribuida

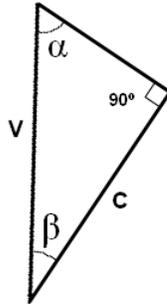
Lx: longitud entre dos cordones diagonales

Ld: longitud del cordón diagonal

d: peralte de la viga

$\alpha$ : ángulo interno del triangulo formado en la viga *joist*

Figura 17. **Triángulo para fuerzas actuantes en diagonal**



Fuente: elaboración propia, con programa Auto Cad 2010.

La posible falla en este tipo de elementos, cuando hay uniones con pernos es de desgarre, que consiste en el desprendimiento del material, cuando el agujero del elemento está muy cercano al borde, en la figura 18, se muestra la acción de este tipo de falla

El esfuerzo cortante debe calcularse como la relación entre la fuerza F y el área total que la soporta, como se muestra en la ecuación 17.

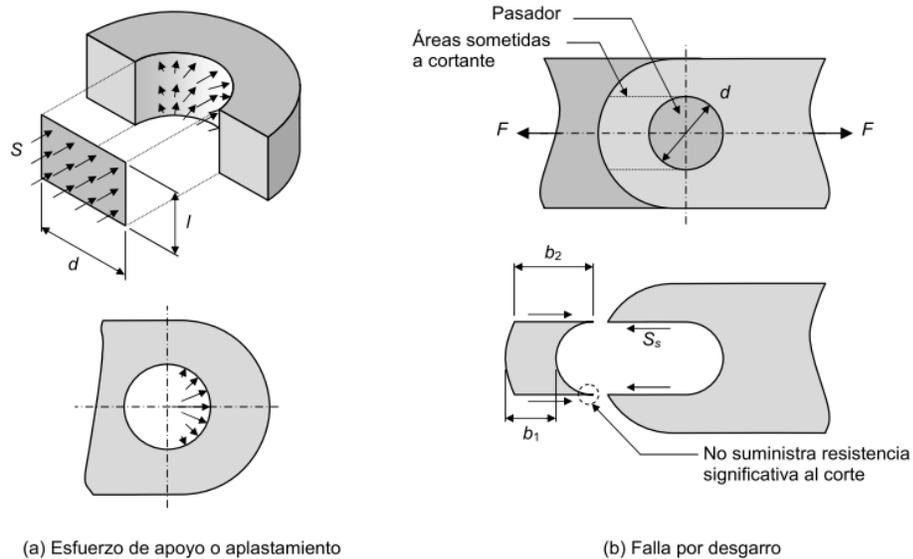
Ecuación 17

$$S_s = \frac{F}{2b_1 * l}$$

Donde:

- Ss: el valor de cortante sobre el elemento
- F: fuerza de tensión o compresión aplicada al elemento
- b1: distancia desde la cresta del agujero hasta el extremo del elemento
- l: espesor de la pared del elemento a estudiar

Figura 18. **Esfuerzos de apoyo y desgarre en uniones con pasadores**



Fuente: BEER, Ferdinand. Conceptos de resistencia de materiales, p. 95.

Este valor de cortante no puede exceder el valor máximo admisible de cortante paralelo a las fibras en el bambú, dependiendo la especie que esté actuando.

- Modificación de esfuerzos permisibles

Con base en los valores de esfuerzos admisibles, afectados por los coeficientes de modificación aplicables, por razón de la duración de carga, esbeltez y cualquier otra condición modificatoria, se determinan los esfuerzos admisibles modificados de todo miembro estructural de acuerdo con la fórmula general siguiente:

### Ecuación 18

$$F_i = f_i (C_D) (C_L) (C_r)$$

Donde:

$F_i$ : esfuerzo admisible modificado para la sollicitación  $i$ .

$f_i$ : esfuerzo admisible en la sollicitación  $i$ .

$C_D$ : coeficiente de modificación por duración de carga (0,9 para carga permanente y 1 para carga viva)

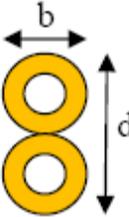
$C_L$ : coeficiente de modificación por estabilidad lateral de vigas.

$C_r$ : coeficiente de modificación por redistribución de cargas, acción conjunta. Para el caso de diseño de viguetas, correas, entrepisos y entramados, donde exista una acción de conjunto garantizada, estos esfuerzos podrán incrementarse en un 10 % ( $C_r=1,1$ ) siempre y cuando la separación entre elementos no sea superior a 0,6 m.

La estabilidad lateral en vigas compuestas por dos o más bambúes se muestra en la figura 19.

Figura 19. **Coeficientes de modificación para estabilidad**

$d/b$	$C_L$
1	1.00
2	0.98
3	0.95
4	0.91
5	0.87



Fuente: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, Perú. Norma técnica, E-100 bambú. p. 11.

- Deflexiones admisibles para elementos en flexión

Las deflexiones deben calcularse para los siguientes casos:

- Combinación más desfavorable de cargas permanentes y sobrecargas de servicio.
- Sobrecargas de servicio actuando solas.

Las deflexiones máximas admisibles deberán limitarse a los siguientes valores:

- Para cargas permanentes más sobrecarga de servicio en edificaciones con cielo raso de yeso:  $L/300$ .
- Sin cielo raso de yeso:  $L/250$ .
- Para techos inclinados y edificaciones industriales:  $L/200$ .
- Para sobrecargas de servicio en todo tipo de edificaciones,  $L/350$ .

Donde  $L$  es el valor efectivo entre apoyos de la viga, o bien la distancia desde el apoyo hasta el extremo en caso de voladizo.

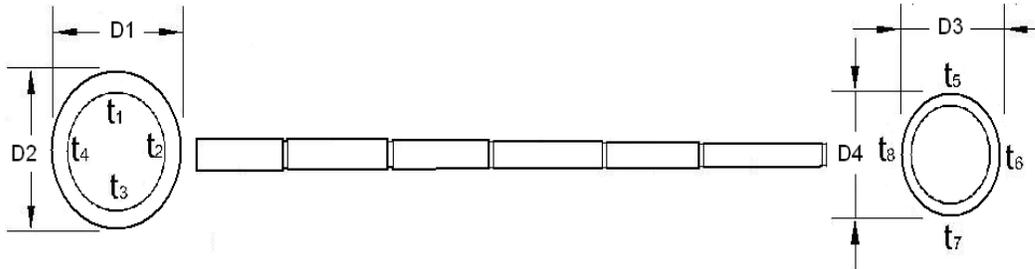


#### **4. METODOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE VIGAS JOIST UTILIZANDO BAMBÚ COMO MATERIA PRIMA**

Los elementos estructurales de bambú deberán diseñarse teniendo en cuenta criterios de resistencia, rigidez y estabilidad. Deberá considerarse en cada caso la condición que resulte más crítica, además de atender las siguientes características fundamentales para que el bambú sea considerado apto para uso estructural:

- La edad de cosecha del bambú estructural debe estar entre los 4 y los 6 años.
- El bambú estructural debe tener una buena durabilidad natural y estar adecuadamente protegido ante agentes externos (humos, humedad, insectos, hongos, etc.).
- Las piezas de bambú estructural no pueden presentar una deformación inicial del eje mayor al 0,33 por ciento de la longitud del elemento. Esta deformación se reconoce al colocar la pieza sobre una superficie plana y observar si existe separación entre la superficie de apoyo y la pieza.
- Las piezas de bambú estructural no deben presentar una conicidad superior al 1,0 por ciento, en la figura 20 se muestra la forma de corroborar dicha conicidad, donde el promedio del diámetro medido en un extremo no debe ser superior ni menor que el medido en el otro.

Figura 20. **Conicidad permisible en culmos de bambú**



Fuente: LÓPEZ, Luis. Norma NSR-10 para construcción en guadua y la importancia del secado en guadua y madera. p. 51.

- Las piezas de bambú estructural no pueden presentar fisuras perimetrales en los nudos, ni longitudinales a lo largo del eje neutro del elemento. En caso de presentarse en un elemento, estas deben estar ubicadas en la fibra externa superior o en la fibra externa inferior.
- Piezas de bambú con agrietamientos superiores o iguales al 20 por ciento de la longitud del tronco no serán consideradas como aptas para uso estructural, en la figura 21 son observables las grietas que se presentan en el material no apto.

Figura 21. **Grietas y picaduras no aceptables en bambú estructural**



Fuente: LÓPEZ, Luis. Norma NSR-10 para construcción en guadua y la importancia del secado en guadua y madera. p. 52.

- Las piezas de bambú estructural no deben presentar perforaciones causadas por ataque de insectos xilófagos antes de ser utilizadas y evitarse una vez esté en servicio, como se puede ver en la figura 22, esta pieza debe ser desechada, pues no es apta para uso estructural.

Figura 22. **Perforaciones por causa de insectos en bambú**



Fuente: LÓPEZ, Luis. Norma NSR-10 para construcción en guadua y la importancia del secado en guadua y madera. p. 52.

- No se aceptan bambúes que presenten algún grado de pudrición como el que se observa en la figura 23.

Figura 23. **Pudrición no aceptable en bambú estructural**



Fuente: LÓPEZ, Luis. Norma NSR-10 para construcción en guadua y la importancia del secado en guadua y madera. p. 53.

#### 4.1. Características físicas y propiedades mecánicas de las variedades de bambú seleccionadas

Para que una especie de bambú sea apta para el uso en la construcción de vigas *joist*, es necesario atender las características físicas y propiedades mecánicas de cada una de ellas, aunque no necesariamente las especies que presenten las mejores serán utilizadas para este fin.

Las especies estudiadas con las mejores propiedades, no se encuentran en diámetros adecuados para poder ser utilizados o no son comunes en nuestro medio, se decide utilizar las especies: *guadua angustifolia* y *gigantochloa verticillata*, ya que en Guatemala existen diversos lugares donde es factible encontrarlas, además las características y propiedades de ambas son relativamente parecidas y los diámetros encontrados, son adecuados para la construcción, en las tablas V y VI se muestran las propiedades mecánicas y características físicas respectivamente, de dichas especies.

- Propiedades mecánicas

Tabla V. **Propiedades mecánicas de especies seleccionadas**

No.	Especie	Tensión paralela $\sigma_{\text{máx.}}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Tensión perpendicular $\sigma_{\perp}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Comp. Paralela F'c. (kg/cm <sup>2</sup> )	Corte Paralelo F'v. (kg/cm <sup>2</sup> )	Flexión F'm. (kg/cm <sup>2</sup> )	Compresión perpendicular F'⊥ (kg/cm <sup>2</sup> )	E (kg/cm <sup>2</sup> )
1	<i>Gigantochloa verticillata</i>	2 551,26	19,84	130	118,35	155	12,5	93 000
2	<i>Guadua angustifolia</i>	2 522,20	21,86	135	109,22	160	13,0	95 000

Fuente: elaboración propia.

- Características físicas

Tabla VI. **Características físicas de especies seleccionadas**

No.	Especie	( $\rho$ ) (g/cm <sup>3</sup> )	C. H (%)
6	<i>Gigantochloa verticillata</i>	0,63	16,2
7	<i>Guadua angustifolia</i>	0,62	14,3

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2. Elementos que conforman la viga *joist* diseñada

Debido a que a nivel regional no se cuenta con ningún tipo de parámetros o especificaciones que indiquen los requerimientos necesarios para el diseño de un *joist* utilizando bambú, atendiendo la necesidad de explotar un recurso renovable tan versátil; al momento de utilizarlo en la construcción, se hace necesario iniciar con el diseño de estos elementos utilizando criterios y suposiciones de personas que cuenten con experiencia suficiente en el manejo y utilización del bambú en la construcción y se apliquen buenas prácticas de ingeniería en la construcción de dichos elementos.

Utilizando como analogía el diseño de *joist* de acero, se puede proponer secciones de los cordones longitudinales, como diagonales, además del método constructivo y el sistema de anclaje entre dichos cordones, de igual forma se pretende construir con peraltes propuestos por el diseñador siendo cuidadosos y con el fin de resguardar ante todo la integridad de las personas, tanto trabajadores en la construcción, como usuarios.

- Cordones longitudinales

Para los cordones superior e inferior se propone usar secciones de *guadua angustifolia*, puesto que es la especie que cuenta con mayores estudios y usos comprobados en la construcción, por lo que brinda mayor confianza en su comportamiento, las secciones que se propone utilizar estarán dentro del rango de 7,62 centímetros (3 pulgadas) a 10,16 centímetros (4 pulgadas) para el diámetro externo del culmo, y espesores que van alrededor de un cuarto de pulgada o bien seis milímetros.

- Cordón transversal o diagonal

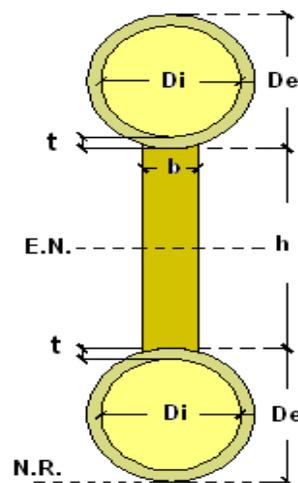
Para el elemento diagonal dispuesto para ser el resistente al cortante, se notó que la especie *gigantochloa verticillata* posee un adecuado valor en las propiedades mecánicas necesarias para ello, y una parte fundamental es que se encuentra en diámetros adecuados, espesores de pared útiles y sobre todo es posible encontrarla en Guatemala. La sección que se propone, varía dentro del rango de dos pulgadas o (5,08 centímetros) a dos pulgadas y media o (6,35 centímetros).

- Método constructivo

La finalidad de utilizar para los elementos diagonales diámetros inferiores se debe a que serán introducidos en los cordones longitudinales, para ello los elementos longitudinales se perforarán utilizando una broca-sierra de diámetro equivalente al diámetro de los elementos diagonales, esto se realizará con el fin de obtener una geometría estable y rígida, en la figura 24 se observa la sección prevista a usar para el diseño de las estructuras.

Realizando pruebas preliminares, se pudo establecer que un ángulo interno de 60 grados es el más adecuado, puesto que presenta mayor facilidad en la perforación, además, se logra crear un triángulo equilátero. Se propone utilizar peraltes mayores de los que establecen códigos, debido a que se está trabajando una aplicación nueva, con este material es necesario ser más conservadores y se propone utilizar peraltes de 10 y 15 por ciento de la luz libre de la viga, además con estos peraltes se logra una muy buena geometría y simetría.

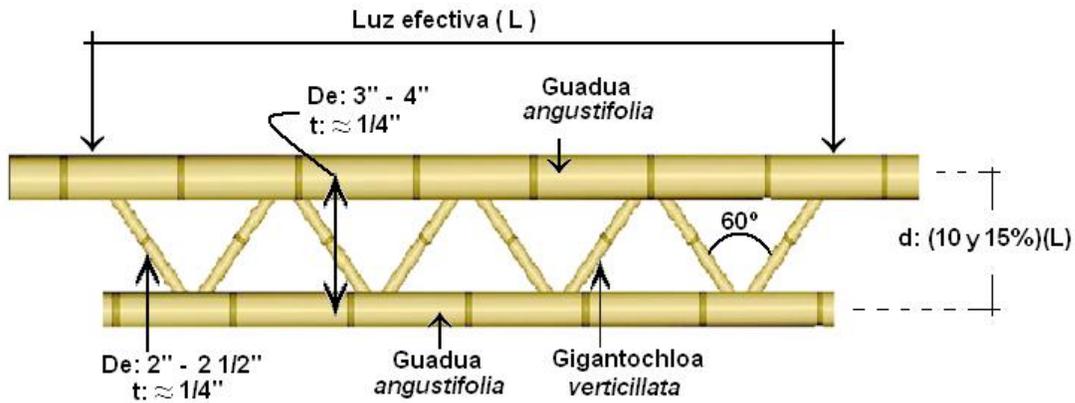
Figura 24. **Sección propuesta de *joist***



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Paint.

Para el desarrollo de la parte experimental, el anclaje se realizó por medio de dos variantes; la primera utilizando acero mediante un perno con diámetro de un cuarto de pulgada y la segunda con perno hecho de bolillo fabricados artesanalmente con bambú de diámetro igual a media pulgada. La figura 25 muestra cada tipo de variación que se pretende establecer en la construcción de las vigas.

Figura 25. Variantes en vigas *joist* a diseñar



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Paint.

#### 4.3. Proceso de fabricación de los elementos

Con el fin de realizar una investigación más extensa y con mejores datos de análisis como resultados comparables, se hicieron variantes en la construcción de las vigas *joist* fabricadas con bambú. Estas variantes, como se indica en el capítulo número cuatro, serán el peralte de la viga y el método de anclaje de ellas, manteniendo constantes entre ellas, el ángulo formado entre los cordones diagonales y los longitudinales, además de la luz efectiva, para hacerlo más comprensible se dejaron establecidas todas las variantes en la construcción de las vigas utilizando códigos de fácil comprensión.

Se decidió en las vigas colocar al inicio de la codificación las letras JB cuyo significado es *joist* de bambú, es así que cada una de las vigas tendrá al inicio estos caracteres. A continuación se mencionan las características de cada una de las variaciones diseñadas.

Las variaciones para cada tipo de viga son:

- Viga tipo A
  - Luz efectiva: 3 metros
  - Peralte efectivo: 10 por ciento de la luz
  - Ángulo interno de triángulos: 60 grados
  - Anclaje: perno de bambú de media pulgada
  
- Viga tipo B
  - Luz efectiva: 3 metros
  - Peralte efectivo: 10 por ciento de la luz
  - Ángulo interno de triángulos: 60 grados
  - Anclaje: perno de acero de un cuarto de pulgada
  
- Viga tipo C
  - Luz efectiva: 3 metros
  - Peralte efectivo: 15 por ciento de la luz
  - Ángulo interno de triángulos: 60 grados
  - Anclaje: perno de bambú de media pulgada
  
- Viga tipo D
  - Luz efectiva: 3 metros
  - Peralte efectivo: 10 por ciento de la luz
  - Ángulo interno de triángulos: 60 grados
  - Anclaje: perno de acero de un cuarto de pulgada

Tabla VII. **Variaciones en vigas joist a construir**

No.	Código	Luz (L) (m)	Peralte		Ángulo interno	Anclaje
			%	m		
1	JB - A1	3,00	10	0,30	60 °	Bambú
2	JB - A2					
3	JB - A3					
4	JB - B1					
5	JB - B2					
6	JB - B3					15
7	JB - C1					
8	JB - C2					
9	JB - C3		Bambú			
10	JB - D1					
11	JB - D2					
12	JB - D3		Acero			

Fuente: elaboración propia.

Se realizaron cuatro variaciones en la construcción de las vigas, para contar con las literales A, B, C y D, además se construyeron tres vigas de cada variación para poder tener resultados que sean realmente comparables y no una sola, en el código aparecerán los números 1,2 o 3, a continuación se da un ejemplo de código para simplificar el entendimiento de este. Se tiene: JB – A1, Este código indica que el la viga número uno de la variación A, la cual a su vez indica que es una viga con peralte de 10 por ciento de la luz efectiva y anclaje mediante perno de bambú, en la tabla VII se da un resumen de los códigos utilizados, y su respectivas variaciones.

## 5. DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL, DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DE LAS VIGAS *JOIST* FABRICADAS, UTILIZANDO BAMBÚ COMO MATERIA PRIMA

Antes de ensayar se anotaron los datos útiles para cálculos matemáticos; teóricos o experimentales, que se realizaron luego de cada ensayo, los valores que se tomaron de cada una de las vigas fue: peso propio de cada elemento y características geométricas de cada uno de los cordones de la viga.

Tabla VIII. **Medidas directas de vigas *joist* fabricadas con bambú**

No.	CÓDIGO	Cordón superior (mm)			Cordón inferior (mm)			Cordón diagonal (mm)		
		De	t	Di	De	t	Di	De	t	Di
		Promedio (mm)	Espesor (mm)	Promedio (mm)	Promedio (mm)	Espesor (mm)	Promedio (mm)	Promedio (mm)	Espesor (mm)	Promedio (mm)
1	JB - A1	99,67	7,80	91,87	87,00	8,00	79,00	62,83	7,20	55,63
2	JB - A2	81,00	6,00	75,00	83,67	5,96	77,71	62,50	5,96	56,54
3	JB - A3	90,00	6,08	83,92	90,00	6,02	83,98	64,17	6,12	58,05
4	JB - B1	89,33	6,06	83,27	81,33	6,00	75,33	59,50	6,02	53,48
5	JB - B2	82,50	6,12	76,38	82,00	6,08	75,92	62,00	6,00	56,00
6	JB - B3	85,50	5,96	79,54	84,50	5,98	78,52	60,67	6,02	54,65
7	JB - C1	91,33	6,04	85,29	83,33	6,04	77,29	61,50	6,04	55,46
8	JB - C2	93,50	6,08	87,42	82,50	6,06	76,44	63,83	6,00	57,83
9	JB - C3	90,17	6,00	84,17	83,33	6,02	77,31	58,33	5,99	52,34
10	JB - D1	98,83	8,74	90,09	91,00	8,00	83,00	65,17	6,12	59,05
11	JB - D2	95,50	6,70	88,80	87,17	7,30	79,87	61,67	6,33	55,33
12	JB - D3	91,67	6,60	85,07	86,67	6,50	80,17	64,33	6,18	58,15

Fuente: elaboración propia.

En la tabla VIII se muestran todos los datos medidos directamente de cada una de las vigas; cabe mencionar que para las medidas de los diámetros exterior, interior y el espesor de cada culmo de bambú se anotaron seis medidas de cada uno, luego se calculó el promedio de cada valor, siendo este el que se tomó como valor real, esto se hizo debido a que el bambú no es un material completamente uniforme en todas sus medidas; pero realizando una selección adecuada de cada culmo, es posible lograr resultados satisfactorios en cuanto a las recomendaciones hechas en el capítulo número cuatro.

### **5.1. Descripción del método de ensayo de vigas *joist***

Se realizó el ensayo a flexión a una viga *joist* fabricada de bambú, para poder determinar su resistencia máxima, medir las deflexiones verticales y así realizar una comparación con los valores máximos permisibles de cada uno. Como se mencionó en el numeral 4.3 se cuenta con tres vigas construidas de cada variación diseñada, esto se hizo con el fin de poder realizar las pruebas en dos ensayos por separado.

En el primero se probó una viga de cada variación, individualmente y en el segundo, se realizó el ensayo a flexión de un sistema compuesto por dos vigas *joist* fabricadas de bambú y así analizar también el comportamiento en sistemas, logrando probar así las tres vigas de cada variante, a continuación se desglosa cada uno de los ensayos.

- Ensayo individual

Este ensayo se realizó con el fin de analizar el comportamiento de la viga trabajando individualmente, puesto que no se cuenta con datos de comparación y con este ensayo se lograría establecer un parámetro, la figura 26 muestra como la viga será apoyada sobre piezas metálicas lo suficientemente resistentes para soportar la aplicación de carga sobre ellas.

Figura 26. **Posición de viga a ensayar**



Fuente: Sección de Materiales Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

La viga es colocada bajo un marco de acero, al cual se le colocó un pistón hidráulico que ejerce la carga sobre una pieza de madera de gran rigidez y que distribuye la carga en dos puntos, en los tercios de la viga, como se observa en la figura 27. Esta carga es medida por un manómetro graduado cada 50 psi (libras por pulgada cuadrada), además con el fin de restringir el momento de torsión en la viga y que esta trabaje bajo las cargas de flexión únicamente, se colocaron piezas de madera que impiden el movimiento lateral de la viga, pero no el movimiento vertical.

Figura 27. **Sistema de ensayo individual de *joist***



Fuente: Sección de Materiales Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Además de lo mencionado anteriormente, se colocaron deformómetros para tomar tanto las deflexiones en el cordón longitudinal inferior al centro del vano, como en sus extremos. Al inicio también se colocaron en sentido horizontal para controlar el desplazamiento lateral, pero al hacer análisis se determinó que no existía dicho desplazamiento, comprobando que las piezas colocadas para restringirlo funcionaban adecuadamente. En la figura 28 se muestra la posición de un deformómetro, en este caso es el central dispuesto para medir las deflexiones máximas que se presentarán al centro de la viga.

Figura 28. **Posición de deformómetro vertical**



Fuente: Sección de Materiales Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Una vez se armó el sistema para cada viga, se procedió a inducirle carga por medio del pistón hidráulico colocado al centro del vano, la velocidad de carga fue de 100 psi cada minuto, medidas en el manómetro de la máquina de aplicación de carga mostrada en la figura 29, tomando las lecturas de deformación en cada intervalo, hasta el momento de la falla. Para este ensayo no se tomó en cuenta la deformación máxima teórica de la viga, puesto que se necesitó la mayor cantidad de datos posible que la máquina y los aparatos podían registrar, con el fin de establecer la resistencia máxima.

Figura 29. **Medidor hidráulico de presión**



Fuente: Sección de Materiales Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

La carga se aplicó mediante el pistón hidráulico de carga RC-1010, mostrado en la figura 30 y RC-102, ambos pistones cuentan con una área efectiva de 14,45 centímetros cuadrados o bien 2.24 pulgadas cuadradas, esta área será útil al momento de obtener las fuerzas aplicadas por cada intervalo de carga y deformación.

Figura 30. Pistón hidráulico RC-1010



Fuente: Sección de Materiales Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Ensayo de sistema de *joist*

El objetivo de la prueba del sistema de *joist* fabricados con bambú, es determinar la resistencia y el comportamiento del sistema para niveles de sollicitación a los cuales podría estar sometido y verificar las condiciones de servicio teóricas asociadas a dichos niveles de carga aplicada. Además, idealmente determinar los niveles de resistencia máxima del sistema y el tipo de comportamiento de colapso.

Para realizar este ensayo se necesitaron dos vigas *joist* de cada variación. El primer paso para la realización de este ensayo fue preparar el área donde se colocaría el sistema, para ello como apoyo se utilizaron elementos de acero a cada extremo suficientemente resistente, con el fin de no afectar el sistema al momento de la aplicación de carga, como se observa en la figura 31, el ancho efectivo que se estableció para este ensayo es de un metro con cuarenta centímetros pues es un ancho bastante común en el diseño de *joist*, y a su equivalente en pulgadas.

Figura 31. **Apoyo de sistema**



Fuente: Sección de Materiales Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Para restringir el movimiento horizontal o lateral en el sistema, se colocaron piezas de bambú, como se muestra en la figura 32, uniendo el cordón longitudinal inferior de cada viga a una distancia de un tercio de la longitud efectiva, esto debido a que será el punto donde podría existir el mayor desplazamiento lateral de las vigas, de igual forma en los extremos se colocaron piezas de madera uniendo una viga a la otra con el fin de mantener el ancho establecido en el sistema.

Figura 32. **Arriostramiento de sistema de *joist***



Fuente: Sección de Materiales Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Al igual que en el ensayo individual de las vigas, es necesario colocar deformómetros al centro del vano de cada elemento en el sistema, observable en la figura 33, pues es necesario medir la deformación por cada incremento de carga que se realice al sistema, es importante hacer ver que para este ensayo, sí se tomará en cuenta la deformación máxima permisible en elementos dispuestos para techo que según la Norma Técnica Peruana E-100 Bambú, la cual establece que la deflexión máxima permisible será: la longitud del vano dividido 200 ( $L/200$ ).

Figura 33. **Posición de deformómetros dentro del sistema**



Fuente: Sección de Materiales Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

La metodología del ensayo consiste en aplicar cargas discretas ubicadas en forma estratégica sobre una superficie horizontal, dispuesta sobre dos piezas transversales que unen las vigas apoyadas sobre ellas, a una longitud de un tercio de la luz efectiva del vano, como se observa en la figura 34, con el objetivo de simular la acción de una carga uniformemente distribuida y obtener información relevante respecto a la resistencia y al comportamiento del sistema.

Se debe tomar en cuenta el peso de la plataforma que se está colocando sobre las piezas transversales como de estas mismas, para no incurrir en error de subestimar dicha carga. Es necesario anotar, en cada incremento de carga, la deformación de cada viga y dar seguimiento detallado para no sobrepasar el valor de la deflexión máxima mencionada anteriormente.

Figura 34. **Colocación de plataforma de aplicación de carga**



Fuente: Sección de Materiales Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

La carga se aplicó, luego de colocar la plataforma, por medio de cilindros de concreto, como se observa en la figura 35, anteriormente medidos para establecer el peso de cada uno, utilizando cuatro cilindros por cada incremento de carga anotando la suma que de estos resulte, al momento de colocar cada intervalo de carga cuidadosamente se tomaron las lecturas de cada deformómetro colocado, atendiendo minuciosamente no pasar de la deflexión máxima para cada viga, una vez se llegue alrededor de este valor se detuvo el incremento de carga.

El ensayo consistió, principalmente en un intervalo de carga-descarga que duró 24 horas entre cada uno, es decir, se aplica la carga hasta llegar aproximadamente a la deflexión máxima permisible, para luego dejar por 24 horas la carga aplicada teniendo cuidado de no mover nada en el sistema, pasado dicho tiempo se anotaron las lecturas de los deformómetros para establecer si hubo deflexión durante el tiempo de carga y luego se retirarán inversamente a como se colocaron todas las piezas sobre el sistema de vigas, anotando de nuevo en cada disminución de carga las lecturas de los deformómetros para tener un seguimiento de la recuperación en la deflexión, luego de retirada toda la carga aplicada es necesario analizar si el sistema sufrió recuperación instantánea o quedó deflexión remanente.

Figura 35. **Aplicación de carga, colocación estratégica**



Fuente: Sección de Materiales Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Al retirar la carga con la que se alcanzó la deflexión máxima es necesario dejar el sistema descargado por 24 horas, como se observa en la figura 36, con el fin de que exista una recuperación máxima en las vigas, pasado dicho tiempo es necesario tomar lecturas iniciales en los diales para establecer si se obtuvo una recuperación total o aún quedó deflexión remanente.

Después de anotar estas lecturas se procedió de igual forma que en la carga inicial, es decir, colocar la plataforma anotando lecturas en los deformómetros al hacerlo, para luego colocar incrementos de cargas utilizando de nuevo cuatro cilindros de concreto por vez, leyendo el valor de la deflexión por cada incremento con la excepción de no dar seguimiento a la deflexión máxima permisible puesto que se quiere llegar el sistema hasta la falla, pero si notando detalladamente el comportamiento del sistema ante esta y no dejar de tomar los datos de deflexiones en cada intervalo de incremento de carga.

Al obtener el fallo en el sistema es necesario retirar cuidadosamente la carga inmediatamente después del colapso, es importante analizar las fallas que se presenten para poder establecer un patrón si es que lo hubiera o determinar analíticamente la razón de estas.

Figura 36. **Sistema descargado, luego de primer ciclo de carga**



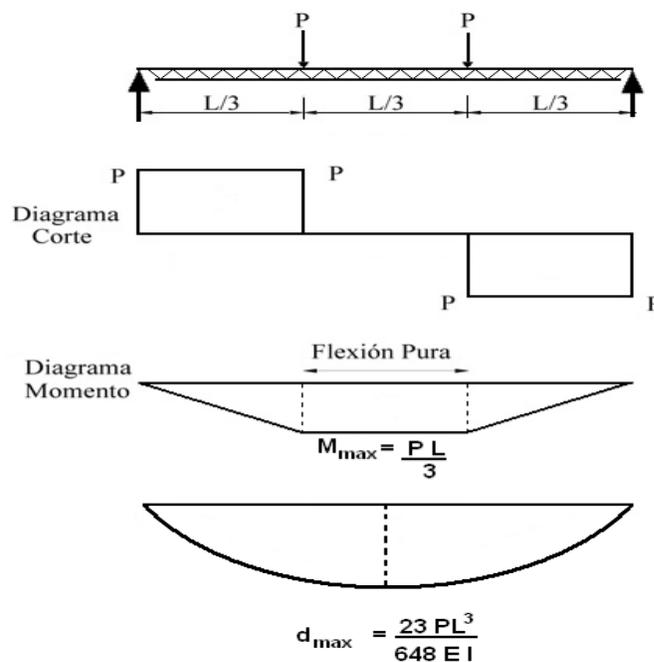
Fuente: Sección de Materiales Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

## 5.2. Ensayo de laboratorio, según requerimientos de la Norma Técnica Peruana E – 100, Bambú

- Ensayos de vigas individuales

La realización de este, se llevó a cabo como se expresó en el numeral 5.1 de este capítulo, los datos a anotar en este ensayo son los valores que marcan los deformómetros por cada aplicación de carga con el pistón hidráulico, para ello se tabularon datos de cada ensayo individual de las vigas, hasta llegar a la carga de falla haciendo todas las anotaciones que fueran necesarias para poder describir e interpretar los motivos de colapso de la viga como patrones de comportamiento si los hubiera.

Figura 37. Diagramas para análisis práctico



Fuente: elaboración propia, con programa Auto Cad 2010.

La carga fue transmitida al *joist* por medio de una pieza de madera suficientemente resistente y rígida la cual a su vez se apoyaba en dos puntos colocados justo a un tercio de la luz de la viga cada uno, esto es con el objetivo de tratar de simular lo mejor posible la acción de una carga uniformemente distribuida, lo que hace que las ecuaciones para los cálculos de corte, momento y deflexión máxima sean otras que en la carga uniformemente distribuida, es así que fue posible comparar las ecuaciones de ambos casos, con el fin de obtener la carga distribuida aproximada que se está aplicando en cada caso, en la figura 37 se muestran las ecuaciones a usar cuando se aplica un par de cargas, en los tercios de una viga simplemente apoyada.

Se pueden comparar las ecuaciones de momento máximo para carga uniformemente distribuida, con la ecuación de momento máximo de la viga con cargas a un tercio de la luz de la siguiente manera:

Ecuación 19

$$\frac{PL}{3} = \frac{WL^2}{8}$$

Despejando la carga distribuida W o P se tendrá:

Ecuación 20

$$W = \frac{8P}{3L}$$

Ecuación 21

$$P = \left( \frac{3WL}{8} \right)$$

Donde:

P: cada una de las cargas aplicadas en los tercios de la viga

L: longitud efectiva del vano a trabajar

W: carga distribuida aplicada a la viga

Los datos fueron anotados en tablas para su mejor interpretación, un ejemplo y la explicación de la tabla se da a continuación.

Tabla IX. **Modelo de tabla a utilizar para tabulación de datos**

$\sigma$ (psi)	Área de pistón		$2P = \sigma \cdot A$	P	P	$W = 8P/3L$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$
	(in <sup>2</sup> )	(cm <sup>2</sup> )	(lbf)	(lbf)	(kg)	(kg/m)	(mm)	(mm)	(mm)

Fuente: elaboración propia.

Donde:

$\sigma$  (psi): esfuerzo transmitido a la viga por medio del pistón de carga RC-102 ó RC-1010 medido de libras por pulgada cuadrada (psi).

Área: área efectiva del pisto hidráulico la cual está dada en centímetros cuadrados o pulgadas cuadradas.

2P: fuerza total que aplica el pistón obtenida de dividir el esfuerzo entre el área efectiva del pistón ambos con las mismas dimensionales.

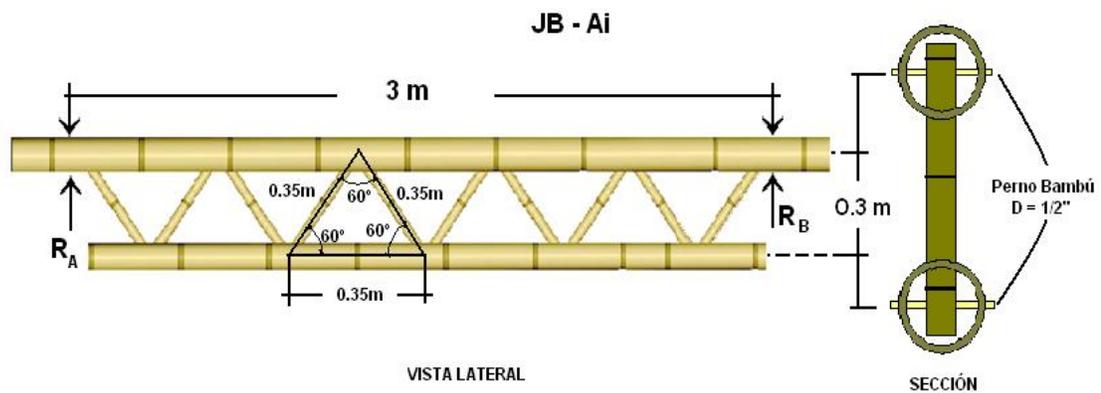
P: carga aplicada en cada punto colocado en los tercios de la luz efectiva.

W: carga uniformemente distribuida que resulta de la utilización de la ecuación No. 20.

- $\gamma_1$ : deflexión acumulada medida al centro de la viga en el cordón longitudinal inferior dada en milímetros.
- $\gamma_2$  y  $\gamma_3$ : deflexión acumulada medida a los extremos de la viga en el cordón longitudinal inferior dada en milímetros.

- Ensayo de JB – A1

Figura 38. Características de JB – A1



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Paint.

Tabla X. Primera aplicación de carga a JB – A1

$\sigma$ (psi)	Área de Pistón		$2P = \sigma \cdot A$ (lbf)	P (lbf)	P (kg)	$W = 8P/3L$ (kg/m)	$\gamma_1$ (mm)	$\gamma_2$ (mm)	$\gamma_3$ (mm)
	(in <sup>2</sup> )	(cm <sup>2</sup> )							
0.00	2,24	14,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
100.00	2,24	14,45	224,00	112,00	50,79	45,15	1,99	0,83	1,32
200.00	2,24	14,45	448,00	224,00	101,59	90,30	2,40	3,23	3,05
300.00	2,24	14,45	672,00	336,00	152,38	135,45	4,74	5,69	6,00

Fuente: elaboración propia.

Se utilizó el pistón hidráulico RC-102, el cual tiene un área efectiva de 14.45 centímetros cuadrados o bien 2.24 pulgadas cuadradas, se aplicó la carga en intervalos de 100 libras sobre pulgadas cuadradas, en la figura 38 se muestran las características más relevantes con las que fueron construidas las tres vigas de esta variación, el ensayo dio como resultado gran cantidad de datos, la primera aplicación de carga se muestra en la tabla X. Debido a que se trató de la primera prueba, se colocaron los deformómetros de manera que no fue posible tomar suficientes lecturas, por lo que se procedió a descargar la viga para mejorar la posición de los diales, para luego aplicarle de nuevo carga.

Tabla XI. **Segunda aplicación de carga-descarga a JB – A1**

$\sigma$ (psi)	Área de pistón		2P = $\sigma \cdot A$ (lbf)	P (lbf)	P (kg)	W = 8P/3L (kg/m)	Y <sub>1</sub> (mm)	Y <sub>2</sub> (mm)	Y <sub>3</sub> (mm)
	(in <sup>2</sup> )	(cm <sup>2</sup> )							
0.00	2,24	14,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
100.00	2,24	14,45	224,00	112,00	50,79	45,15	1,61	5,56	4,70
200.00	2,24	14,45	448,00	224,00	101,59	90,30	1,87	8,07	6,83
300.00	2,24	14,45	672,00	336,00	152,38	135,45	3,34	8,85	8,37
400.00	2,24	14,45	896,00	448,00	203,17	180,60	5,03	11,91	10,13
500.00	2,24	14,45	1 120,00	560,00	253,97	225,75	7,32	14,74	11,45
600.00	2,24	14,45	1 344,00	672,00	304,76	270,90	8,59	17,90	15,24
700.00	2,24	14,45	1 568,00	784,00	355,56	316,05	10,94	20,64	16,84
DESCARGA									
700.00	2,24	14,45	1 568,00	784,00	355,56	316,05	10,94	20,64	16,84
500.00	2,24	14,45	1 120,00	560,00	253,97	225,75	10,92	20,65	16,92
400.00	2,24	14,45	896,00	448,00	203,17	180,60	8,73	19,29	15,70
300.00	2,24	14,45	672,00	336,00	152,38	135,45	7,64	18,01	13,60
200.00	2,24	14,45	448,00	224,00	101,59	90,30	7,17	16,18	13,17
100.00	2,24	14,45	224,00	112,00	50,79	45,15	3,58	12,97	10,48
0.00	2,24	14,45	0,00	0,00	0,00	0,00	xx	xx	8,07

Fuente: elaboración propia.

Como las deflexiones en los extremos de la viga fueron mayores en relación al centro, algo que fue inesperado y con la finalidad de analizar el comportamiento de la viga ante la acción de carga descarga.

Tabla XII. **Tercera aplicación de carga a JB – A1**

$\sigma$ (psi)	Área de Pistón		2P = $\sigma \cdot A$ (lbf)	P (lbf)	P (kg)	W = 8P/3L (kg/m)	Y <sub>1</sub> (mm)	Y <sub>2</sub> (mm)	Y <sub>3</sub> (mm)
	(in <sup>2</sup> )	(cm <sup>2</sup> )							
0,00	2,24	14,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0
100,00	2,24	14,45	224,00	112,00	50,79	45,15	0,66	1,36	0,28
200,00	2,24	14,45	448,00	224,00	101,59	90,30	4,52	1,94	0,56
300,00	2,24	14,45	672,00	336,00	152,38	135,45	9,32	2,60	3,16
400,00	2,24	14,45	896,00	448,00	203,17	180,60	13,30	4,40	4,83
500,00	2,24	14,45	1 120,00	560,00	253,97	225,75	17,40	6,36	5,50
600,00	2,24	14,45	1 344,00	672,00	304,76	270,90	23,11	9,23	8,90
700,00	2,24	14,45	1 568,00	784,00	355,56	316,05	22,83	9,52	9,19
800,00	2,24	14,45	1 792,00	896,00	406,35	361,20	23,03	9,71	9,31
900,00	2,24	14,45	2 016,00	1 008,00	457,14	406,35	23,10	9,75	9,37
1 000,00	2,24	14,45	2 240,00	1 120,00	507,94	451,50	24,15	10,79	9,39
1 100,00	2,24	14,45	2 464,00	1 232,00	558,73	496,65	24,20	10,82	9,41
1 200,00	2,24	14,45	2 688,00	1 344,00	609,52	541,80	24,23	10,84	9,45
1 300,00	2,24	14,45	2 912,00	1 456,00	660,32	586,95	24,25	10,85	9,48
1 400,00	2,24	14,45	3 136,00	1 568,00	711,11	632,10	24,27	10,87	9,49
1 500,00	2,24	14,45	3 360,00	1 680,00	761,90	677,25	24,28	10,88	9,49
1 600,00	2,24	14,45	3 584,00	1 792,00	812,70	722,40	24,28	10,88	9,49

Fuente: elaboración propia.

Se decidió llegar a un punto de carga de 316,05 kilogramos por metro para luego retirarla y analizar si se tuvo recuperación ante la deflexión sufrida, estos datos se pueden observar en la tabla XI.

Una falla en los deformómetros hizo necesario detener el ensayo pues a partir de 1 300 libras sobre pulgada cuadrada (psi) como se ve en la tabla XII, las lecturas no son confiables, pero el ensayo se considera satisfactorio por la magnitud de carga que le fuera aplicada a la viga sin colapsar, de nuevo se descarga y se procede a cargarla minutos después pero esta vez llevando el pistón hidráulico en intervalos de 200 psi, con el fin de llegar a fracturar la viga.

Tabla XIII. **Aplicación de carga hasta ruptura de JB – A1**

$\sigma$ (psi)	Área de pistón		$2P = \sigma \cdot A$ (lbf)	P (lbf)	P (kg)	W = 8P/3L (kg/m)	Y <sub>1</sub> (mm)
	(in <sup>2</sup> )	(cm <sup>2</sup> )					
0,00	2,24	14,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
200,00	2,24	14,45	448,00	224,00	101,59	90,30	8,93
400,00	2,24	14,45	896,00	448,00	203,17	180,60	16,92
600,00	2,24	14,45	1 344,00	672,00	304,76	270,90	25,12
900,00	2,24	14,45	2 016,00	1 008,00	457,14	406,35	33,38
800,00	2,24	14,45	1 792,00	896,00	406,35	361,20	47,57

Fuente: elaboración propia.

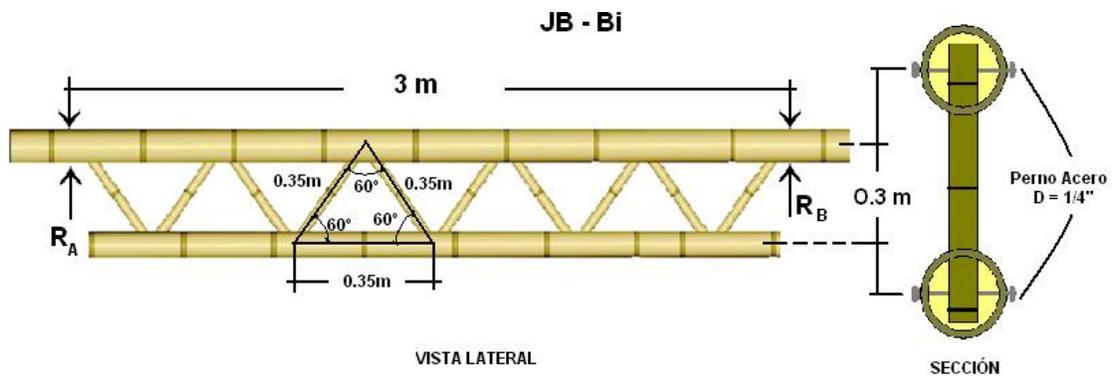
Por último, en la tabla XIII se muestran las lecturas de deflexión al centro de la viga únicamente, pues son las máximas que se presentaron y no se consideró necesario volver a anotar las deflexiones en los extremos pues se cuentan con suficientes datos para realizar los análisis posteriores de ellas.

- Ensayo de JB – B1

Para este ensayo se utilizó el pistón hidráulico RC-1010, el cual tiene un área efectiva de 14,45 centímetros cuadrados o bien 2,24 pulgadas cuadradas, se aplicó la carga en intervalos de 100 libras por pulgada cuadrada (psi o lb/in<sup>2</sup>).

En la figura 39 se muestran las características más relevantes con las que fueron construidas las tres vigas de esta variación, los datos del ensayo son presentados en la tabla XIV. Esta viga se probó en un solo ensayo, y la falla en se presentó cuando la carga distribuida era de 248 kilogramos por metro.

Figura 39. Características de JB – B1



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Paint.

Tabla XIV. Aplicación de carga a JB – B1

$\sigma$ (psi)	Área de Pistón		$2P = \sigma \cdot A$ (lbf)	P (lbf)	P (kg)	$W = 8P/3L$ (kg/m)	$Y_1$ (mm)	$Y_2$ (mm)	$Y_3$ (mm)
	(in <sup>2</sup> )	(cm <sup>2</sup> )							
0,00	2,24	14,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
100,00	2,24	14,45	224,00	112,00	50,79	45,15	3,66	1,31	0,64
200,00	2,24	14,45	448,00	224,00	101,59	90,30	11,26	4,33	2,10
300,00	2,24	14,45	672,00	336,00	152,38	135,45	17,38	6,48	2,42
400,00	2,24	14,45	896,00	448,00	203,17	180,60	27,05	11,75	5,11
500,00	2,24	14,45	1 120,00	560,00	253,97	225,75	37,27	15,57	5,89
550,00	2,24	14,45	1 232,00	616,00	279,37	248,32	44,29	XX	6,47
DESCARGA									
0,00	2,24	14,45	0,00	0,00	0,00	0,00	9,03	XX	0,84

Fuente: elaboración propia.

○ Ensayo de JB – C1

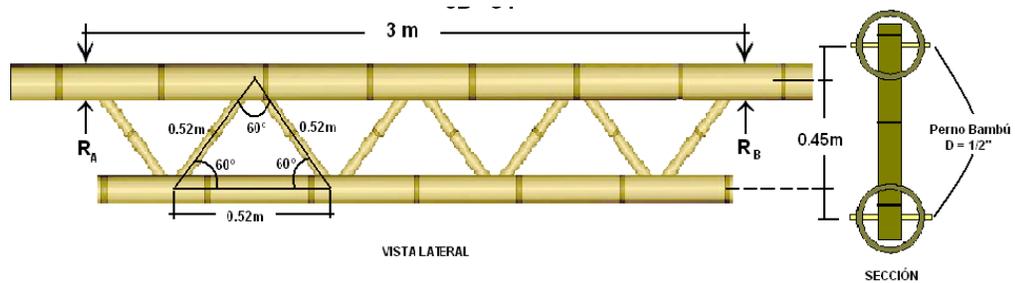
Para este se utilizó el pistón hidráulico RC-1010, el cual tiene un área efectiva de 14,45 centímetros cuadrados o bien 2.24 pulgadas cuadradas, se aplicó la carga en intervalos de 100 libras por pulgada cuadrada (psi o lb/in<sup>2</sup>), en la figura 40 se muestran las características más relevantes con las que fueron construidas las tres vigas de esta variación, los datos del ensayo son presentados en la tabla XV.

Tabla XV. **Aplicación de carga a JB – C1**

$\sigma$ (psi)	Área de pistón		2P = $\sigma \cdot A$ (lbf)	P (lbf)	P (kg)	W = 8P/3L (kg/m)	Y <sub>1</sub> (mm)	Y <sub>2</sub> (mm)	Y <sub>3</sub> (mm)
	(in <sup>2</sup> )	(cm <sup>2</sup> )							
0,00	2,24	14,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
100,00	2,24	14,45	224,00	112,00	50,79	45,15	3,61	3,48	0,85
200,00	2,24	14,45	448,00	224,00	101,59	90,30	7,38	5,29	1,55
300,00	2,24	14,45	672,00	336,00	152,38	135,45	31,02	XX	2,73
400,00	2,24	14,45	896,00	448,00	203,17	180,60	38,92	XX	4,02
450,00	2,24	14,45	1 008,00	504,00	228,57	203,17	48,98	XX	5,09
DESCARGA									
350,00	2,24	14,45	784,00	392,00	177,78	158,02	48,98	XX	5,09
300,00	2,24	14,45	672,00	336,00	152,38	135,45	49,08	XX	5,07
200,00	2,24	14,45	448,00	224,00	101,59	90,30	40,10	XX	4,97
100,00	2,24	14,45	224,00	112,00	50,79	45,15	29,78	XX	3,34
0,00	2,24	14,45	0,00	0,00	0,00	0,00	15,18	XX	2,16

Fuente: elaboración propia.

Figura 40. Características de JB – C1

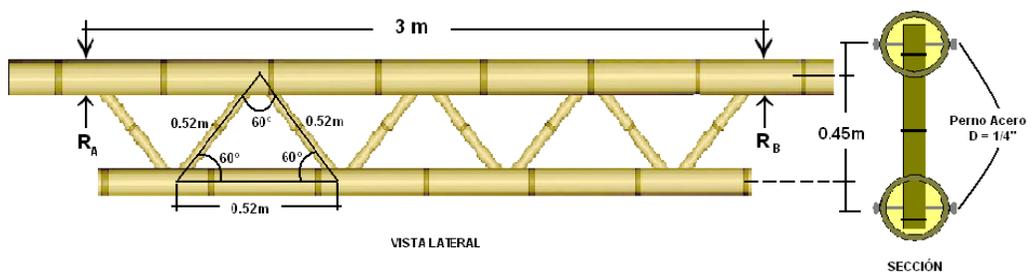


Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Paint.

- Ensayo de JB – D1

Para este se utilizó el pistón hidráulico RC-1010, el cual tiene un área efectiva de 14,45 centímetros cuadrados o bien 2.24 pulgadas cuadradas, se aplicó la carga en intervalos de 100 libras por pulgada cuadrada ( $\text{lb}/\text{in}^2$ ), en la figura 41 se muestran las características más relevantes con las que fueron construidas las tres vigas de esta variación, los datos del ensayo son presentados en la tabla XVI.

Figura 41. Características de JB – D1



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Paint.

Tabla XVI. **Aplicación de carga-descarga a JB – D1**

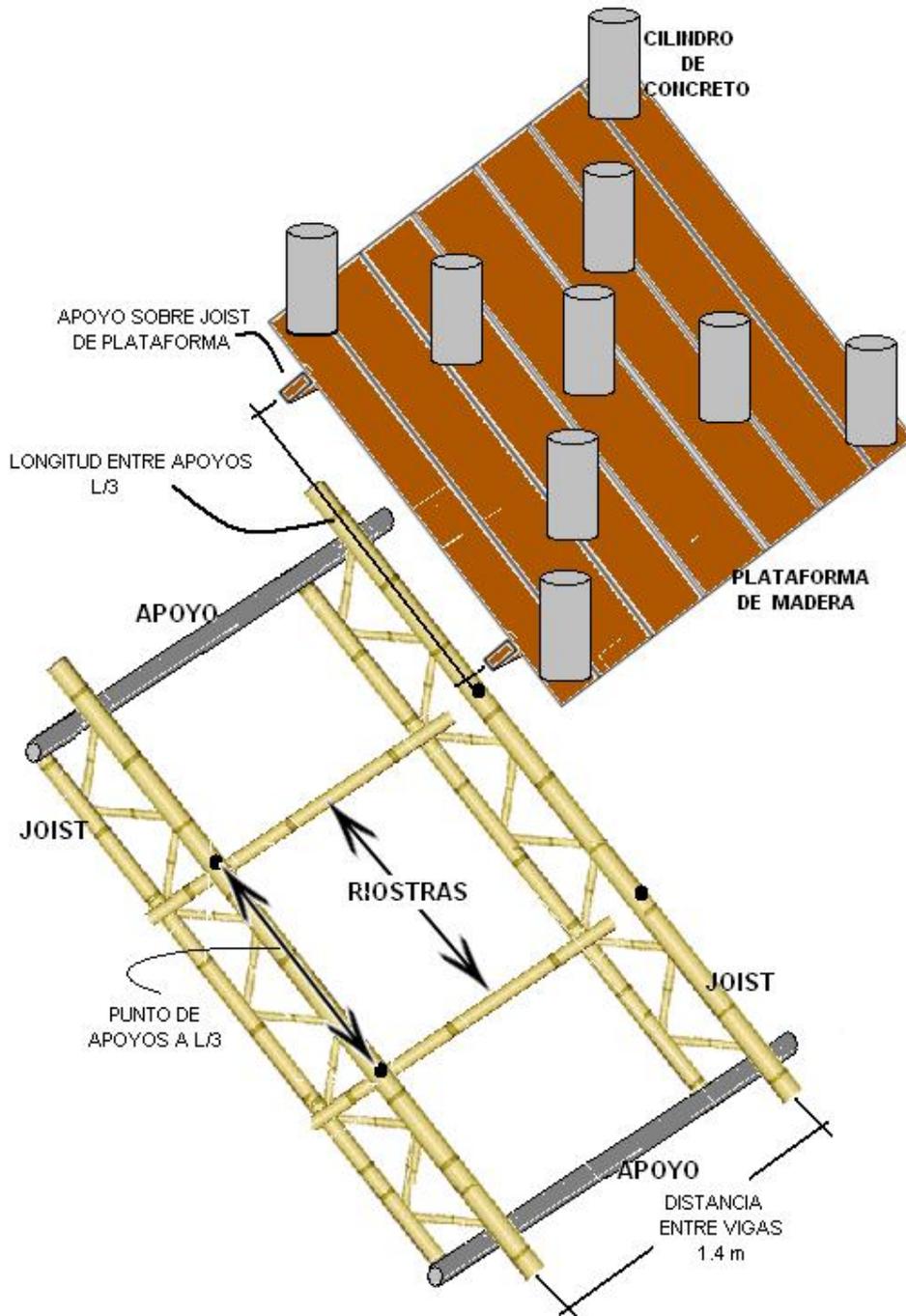
$\sigma$ (psi)	Área de pistón		2P = $\sigma \cdot A$ (lbf)	P (lbf)	P (kg)	W = 8P/3L (kg/m)	Y <sub>1</sub> (mm)	Y <sub>2</sub> (mm)	Y <sub>3</sub> (mm)
	(in <sup>2</sup> )	(cm <sup>2</sup> )							
0,00	2,24	14,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
100,00	2,24	14,45	224,00	112,00	50,79	45,15	2,59	2,03	1,78
200,00	2,24	14,45	448,00	224,00	101,59	90,30	6,05	4,43	2,32
300,00	2,24	14,45	672,00	336,00	152,38	135,45	9,61	6,72	3,36
400,00	2,24	14,45	896,00	448,00	203,17	180,60	16,24	9,51	4,85
500,00	2,24	14,45	1120,00	560,00	253,97	225,75	22,19	11,68	6,64
500,00	2,24	14,45	1120,00	560,00	253,97	225,75	22,19	11,68	6,64
600,00	2,24	14,45	1344,00	672,00	304,76	270,90	29,53	15,64	9,78
DESCARGA									
450,00	2,24	14,45	1008,00	504,00	228,57	203,17	29,53	15,64	9,78
400,00	2,24	14,45	896,00	448,00	203,17	180,60	29,26	14,96	9,51
400,00	2,24	14,45	896,00	448,00	203,17	180,60	29,26	14,96	9,51
300,00	2,24	14,45	672,00	336,00	152,38	135,45	28,36	12,97	9,18
200,00	2,24	14,45	448,00	224,00	101,59	90,30	23,86	11,06	7,28
100,00	2,24	14,45	224,00	112,00	50,79	45,15	19,29	9,49	7,08
0,00	2,24	14,45	0,00	0,00	0,00	0,00	11,51	6,31	6,50
0,00	2,24	14,45	0,00	0,00	0,00	0,00	11,11	4,96	5,42

Fuente: elaboración propia.

- Ensayo de sistema de vigas

La realización de este se llevó a cabo como se expresó en el numeral 5.1 de este capítulo, los datos anotados fueron los valores marcados por los deformómetros en cada aplicación de carga, anotándolos individualmente para cada viga en el sistema, hasta llegar a la carga de falla, haciendo todas las anotaciones necesarias para poder describir e interpretar los motivos de colapso de la viga, como patrones de comportamiento, si los hubiera.

Figura 42. Posición de sistema y método de aplicación de carga



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Paint.

La carga fue transmitida al sistema de *joist* por medio de piezas de madera suficientemente resistentes y rígidas, apoyadas transversalmente en los tercios marcados de la luz de cada viga, sobre estos se colocó un entarimado de madera con su peso propio debidamente registrado, seguidamente se colocaron cilindros estratégicamente sobre el área de la plataforma de madera, con el objetivo de tratar de simular, de la mejor forma posible, la acción de una carga uniformemente distribuida, en la figura 42 se muestra el esquema de lo explicado en este párrafo.

Colocar un par de cargas de igual magnitud en una viga según la literatura, simula eficientemente la acción de una carga uniformemente distribuida, con esto las ecuaciones para los cálculos de corte, momento y deflexión máxima, permiten comparar y obtener la carga distribuida aproximada que se está aplicando en cada caso. En la figura 37 se muestran las ecuaciones a usar cuando se aplica un par de cargas, en los tercios de una viga simplemente apoyada.

Se restringió el desplazamiento lateral del sistema, usando bambúes transversalmente en los tercios, amarrados al cordón inferior, esto con el objetivo de hacer que el sistema trabaje completamente a flexión y que la torsión no sea significativa como para despreocuparla.

Se pueden comparar las ecuaciones de momento máximo para carga uniformemente distribuida, con la ecuación de momento máximo de la viga con cargas a un tercio de la luz de la siguiente manera:

Ecuación 19

$$\frac{PL}{3} = \frac{WL^2}{8}$$

Despejando la carga distribuida  $W$  se tendrá:

Ecuación 20

$$W = \frac{8P}{3L}$$

Donde:

P: cada una de las cargas aplicadas en los tercios de la viga

L: longitud efectiva del vano a trabajar

W: carga distribuida aplicada a la viga

Los datos fueron anotados en tablas para su mejor interpretación, un ejemplo y la explicación de la tabla XVII que se da a continuación.

Tabla XVII. **Modelo de tabla a utilizar para tabulación de datos**

No.	4P (kg)	P (kg)	$W = 8P/3L$ (kg/m)	Deflexión unitaria		Deflexión acumulada	
				JB-A2	JB-A3	JB-A2	JB-A3
				$\delta$ (mm)	$\delta$ (mm)	$\delta$ (mm)	$\delta$ (mm)

Fuente: elaboración propia.

Donde:

4P: fuerza total que aplica sobre la plataforma de madera y el peso de esta.

P: carga aplicada en cada punto colocado en los tercios de la luz efectiva de cada viga.

W: carga uniformemente distribuida que resulta de la utilización de la ecuación No. 16.

- Deflexión unitaria: medida al centro de la viga en el cordón longitudinal inferior dada en milímetros.
  - Deflexión acumulada: medida al centro de la viga en el cordón longitudinal inferior dada en milímetros, obtenida a partir de la suma acumulativa de las deflexiones unitarias.
- Ensayo sistema 1

Para el sistema uno, se utilizaron las vigas tipo A2 y A3, las características de cada viga pueden encontrarse en los numerales 4.3 y 5 de este trabajo.

Tabla XVIII. **Datos de ensayo sistema 1, JB – A2 y 3**

No.	4P (kg)	P (kg)	W = 8P/3L (kg/m)	Deflexión unitaria		Deflexión acumulada	
				JB-A2	JB-A3	JB-A2	JB-A3
				$\delta$ (mm)	$\delta$ (mm)	$\delta$ (mm)	$\delta$ (mm)
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	32,00	8,00	7,11	0,64	0,84	0,64	0,84
3	76,25	19,06	16,94	1,63	1,30	2,26	2,13
4	101,50	25,38	22,56	0,48	1,04	2,74	3,18
5	122,75	30,69	27,28	0,79	1,45	3,53	4,62
5	122,75	30,69	27,28	0,00	0,00	3,53	4,62
6	228,35	57,09	50,74	4,70	10,36	8,23	14,99
7	336,25	84,06	74,72	2,64	2,31	10,87	17,30
8	441,85	110,46	98,19	6,17	8,18	17,04	25,48

Fuente: elaboración propia.

Al sistema se le aplicó una carga de 8 cilindros por vez, pues se esperaban como mínimo 5 datos para realizar análisis posteriores, los datos de la aplicación inicial de carga a este sistema se presentan en la tabla XVIII.

- Ensayo sistema 2

Para el sistema dos, se utilizaron las vigas tipo B2 y B3, las características de cada viga pueden encontrarse en los numerales 4.3 y 5 de este trabajo. Los datos obtenidos de la aplicación de carga inicial al sistema se presentan en la tabla XIX.

Tabla XIX. **Datos de carga inicial de ensayo sistema 2, JB – B2 y 3**

No.	4P (kg)	P (kg)	W = 8P/3L (kg/m)	Deflexión unitaria		Deflexión acumulada	
				JB-B2	JB-B3	JB-B2	JB-B3
				$\delta$ (mm)	$\delta$ (mm)	$\delta$ (mm)	$\delta$ (mm)
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	32,00	8,00	7,11	0,41	0,79	0,41	0,79
3	76,25	19,06	16,94	1,07	1,30	1,47	2,08
4	101,5	25,38	22,56	0,81	0,79	2,29	2,87
5	122,75	30,69	27,28	0,58	1,60	2,87	4,47
6	174,95	43,74	38,88	1,22	1,27	4,09	5,74
7	227,95	56,99	50,66	2,01	2,16	6,10	7,90
8	279,95	69,99	62,21	1,42	1,91	7,52	9,80
9	332,75	83,19	73,94	2,13	2,62	9,65	12,42
10	387,15	96,79	86,03	2,57	3,53	12,22	15,95
11	440,55	110,14	97,90	2,82	2,16	15,04	18,11

Fuente: elaboración propia.

El sistema se dejó cargado 24 horas y luego descargado durante el mismo período, teniendo el suficiente cuidado de no realizar movimientos bruscos más que los naturales por la estructura, para no incurrir en datos erróneos.

Pasadas 24 horas es necesario tomar lecturas iniciales para analizar si el sistema sufrió un aumento en la deflexión instantánea que se logró con la aplicación inicial de carga o recuperación con la descarga, comparando con la última lectura del día anterior. De haber algún incremento en esta deflexión o en la recuperación, en la tabla inmediata anterior, según sea el caso, deberá aparecer una fila al final de esta con la misma carga con la que el sistema se dejó en reposo pero mostrando el incremento o decremento en la deflexión.

Tabla XX. **Descarga de ensayo sistema 2, JB – B2 y 3**

No.	4P (kg)	P (kg)	W = 8P/3L (kg/m)	Deflexión unitaria		Deflexión acumulada	
				JB-B2	JB-B3	JB-B2	JB-B3
				$\delta$ (mm)	$\delta$ (mm)	$\delta$ (mm)	$\delta$ (mm)
1	440,55	110,14	97,90	0,00	0,00	0,00	0,00
2	387,15	96,79	86,03	0,41	0,48	0,41	0,48
3	332,75	83,19	73,94	0,74	0,84	1,14	1,32
4	279,95	69,99	62,21	0,69	0,97	1,83	2,29
5	227,95	56,99	50,66	0,86	1,09	2,69	3,38
6	174,95	43,74	38,88	1,12	1,55	3,81	4,93
7	122,75	30,69	27,28	1,83	2,13	5,64	7,06
8	101,50	25,38	22,56	1,04	1,30	6,68	8,36
9	76,25	19,06	16,94	0,69	1,14	7,37	9,50
10	32,00	8,00	7,11	2,29	2,34	9,65	11,84
11	0,00	0,00	0,00	2,34	2,46	11,99	14,30
12	0,00	0,00	0,00	1,37	3,40	13,36	17,70

Fuente: elaboración propia.

Realizadas todas estas lecturas y anotaciones en el primer ciclo de carga, se descarga el sistema de forma inversa a como se aplicó la carga, hasta lograr la descarga total. Los datos de dicho procedimiento se muestran en la tabla XX y en la tabla XXI se presentan los datos de la aplicación de carga hasta alcanzar la falla en algún elemento del sistema o en ambos.

Tabla XXI. **Carga hasta la falla de ensayo sistema 2, JB – B2 y 3**

No.	4P (kg)	P (kg)	W = 8P/3L (kg/m)	Deflexión unitaria		Deflexión acumulada	
				JB-B2	JB-B3	JB-B2	JB-B3
				$\bar{\delta}$ (mm)	$\bar{\delta}$ (mm)	$\bar{\delta}$ (mm)	$\bar{\delta}$ (mm)
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	32,00	8,00	7,11	0,58	1,60	0,58	1,60
3	76,25	19,06	16,94	1,24	1,40	1,83	3,00
4	101,5	25,38	22,56	0,51	1,40	2,34	4,39
5	122,75	30,69	27,28	1,42	1,73	3,76	6,12
6	175,95	43,99	39,10	3,76	1,83	7,52	7,95
7	227,95	56,99	50,66	0,86	2,54	8,38	10,49
8	281,55	70,39	62,57	0,81	1,52	9,19	12,01
9	333,15	83,29	74,03	1,22	1,47	10,41	13,49
10	384,35	96,09	85,41	1,55	1,78	11,96	15,27
11	435,95	108,99	96,88	1,52	1,57	13,49	16,84
12	489,55	122,39	108,79	2,39	1,91	15,88	18,75
13	543,75	135,94	120,83	3,68	2,54	19,56	21,29
14	595,55	148,89	132,34	FALLA		FALLA	

Fuente: elaboración propia.

○ Ensayo sistema 3

Para el sistema tres, se utilizaron las vigas tipo C2 y C3, las características de cada viga pueden encontrarse en los numerales 4.3 y 5 de este trabajo. Los datos obtenidos de la aplicación de carga inicial al sistema se presentan en la tabla XXII.

Tabla XXII. **Datos de carga inicial de ensayo sistema 3, JB – C2 y 3**

No.	4P (kg)	P (kg)	W = 8P/3L (kg/m)	Deflexión unitaria		Deflexión acumulada	
				JB-C3	JB-C2	JB-C3	JB-C2
				$\delta$ (mm)	$\delta$ (mm)	$\delta$ (mm)	$\delta$ (mm)
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	32,00	8,00	7,11	0,37	1,31	0,37	1,31
3	76,25	19,06	16,94	0,36	0,72	0,73	2,03
4	101,5	25,38	22,56	0,19	0,59	0,92	2,62
5	122,75	30,69	27,28	1,03	0,29	1,95	2,91
6	174,75	43,69	38,83	0,51	1,00	2,46	3,91
7	226,75	56,69	50,39	0,39	0,8	2,85	4,71
8	281,35	70,34	62,52	0,93	0,95	3,78	5,66
9	334,95	83,74	74,43	1,72	0,73	5,50	6,39
10	389,35	97,34	86,52	0,84	0,94	6,34	7,33
11	440,95	110,24	97,99	0,62	0,82	6,96	8,15
12	493,55	123,39	109,68	0,70	0,68	7,66	8,83
13	545,65	136,41	121,26	1,17	0,91	8,83	9,74
LECTURA 24 HORAS DESPUÉS DE LA CARGA INICIAL							
14	545,65	136,41	121,26	3,44	1,59	12,27	11,33

Fuente: elaboración propia.

Realizadas todas las lecturas y anotaciones en el primer ciclo de carga, se descarga el sistema de forma inversa a como se aplicó la carga, hasta lograr la descarga total, los datos de dicho procedimiento se dan en la tabla XXIII y en la tabla XXIV se muestran los datos de la aplicación de carga hasta alcanzar la falla en algún elemento del sistema o en ambos.

**Tabla XXIII. Descarga de ensayo sistema 3, JB – C2 y 3**

No.	4P (kg)	P (kg)	W = 8P/3L (kg/m)	Deflexión unitaria		Deflexión acumulada	
				JB-C3	JB-C3	JB-C3	JB-C3
				$\delta$ (mm)	$\delta$ (mm)	$\delta$ (mm)	$\delta$ (mm)
1	545,65	136,41	121,26	0,00	0,00	0,00	0,00
2	493,55	123,39	109,68	1,02	1,02	1,02	1,02
3	440,95	110,24	97,99	0,43	0,37	1,45	1,39
4	389,35	97,34	86,52	0,36	0,40	1,81	1,79
5	334,95	83,74	74,43	0,66	0,42	2,47	2,21
6	281,35	70,34	62,52	0,41	0,50	2,88	2,71
7	226,75	56,69	50,39	0,91	0,54	3,79	3,25
8	174,75	43,69	38,83	0,86	0,78	4,65	4,03
9	122,75	30,69	27,28	0,06	1,31	4,71	5,34
10	101,5	25,38	22,56	1,84	0,95	6,55	6,29
11	76,25	19,06	16,94	1,35	0,74	7,90	7,03
12	32,00	8,00	7,11	1,88	2,57	9,78	9,60
13	0,00	0,00	0,00	1,42	0,24	11,20	9,84
14	0,00	0,00	0,00	0,59	0,98	11,79	10,82

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Carga hasta la falla de ensayo sistema 3, JB – C2 y 3**

No.	4P (kg)	P (kg)	W = 8P/3L (kg/m)	Deflexión unitaria		Deflexión acumulada	
				JB-C3	JB-C3	JB-C3	JB-C3
				$\delta$ (mm)	$\delta$ (mm)	$\delta$ (mm)	$\delta$ (mm)
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	32,00	8,00	7,11	0,16	0,15	0,16	0,15
3	76,25	19,06	16,94	0,42	0,94	0,58	1,09
4	101,5	25,38	22,56	0,62	0,50	1,20	1,59
5	122,75	30,69	27,28	1,66	0,73	2,86	2,32
6	175,75	43,94	39,06	0,93	1,06	3,79	3,38
7	228,15	57,04	50,70	1,16	1,04	4,95	4,42
8	281,55	70,39	62,57	0,89	1,01	5,84	5,43
9	334,95	83,74	74,43	1,04	0,95	6,88	6,38
10	386,75	96,69	85,94	1,01	0,90	7,89	7,28
11	438,15	109,54	97,37	1,09	0,88	8,98	8,16
12	493,35	123,34	109,63	0,83	0,92	9,81	9,08
13	547,15	136,79	121,59	0,89	0,99	10,7	10,07
14	598,75	149,69	133,06	0,91	0,92	11,61	10,99
15	652,95	163,24	145,10	0,74	0,77	12,35	11,76

Fuente: elaboración propia.

○ Ensayo sistema 4

Para el sistema cuatro, se utilizaron las vigas tipo D2 y D3, las características de cada viga pueden encontrarse en los numerales 4.3 y 5 de este trabajo. Los datos obtenidos de la aplicación de carga inicial al sistema se presentan en la tabla XXV.

Tabla XXV. Datos de carga inicial de ensayo sistema 4, JB – D2 y 3

No.	4P (kg)	P (kg)	W = 8P/3L (kg/m)	Deflexión unitaria		Deflexión acumulada	
				JB-D2	JB-D3	JB-D2	JB-D3
				$\bar{\delta}$ (mm)	$\bar{\delta}$ (mm)	$\bar{\delta}$ (mm)	$\bar{\delta}$ (mm)
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	32,00	8,00	7,11	0,76	0,53	0,76	0,53
3	76,25	19,06	16,94	1,04	1,09	1,80	1,63
4	101,5	25,38	22,56	0,53	0,99	2,34	2,62
5	122,75	30,69	27,28	1,24	2,21	3,58	4,83
6	174,35	43,59	38,74	0,97	1,37	4,55	6,20
7	228,55	57,14	50,79	3,91	3,05	8,46	9,25
8	281,55	70,39	62,57	1,04	2,03	9,50	11,28
9	332,75	83,19	73,94	1,37	2,54	10,87	13,82
10	386,35	96,59	85,86	1,52	3,18	12,40	16,99
11	439,15	109,79	97,59	1,14	2,84	13,54	19,84
12	492,55	123,14	109,46	1,24	2,84	14,78	22,68
13	544,55	136,14	121,01	1,24	2,01	16,03	24,69
LECTURA 24 HORAS DESPUÉS DE LA CARGA INICIAL							
14	544,55	136,14	121,01	3,25	15,70	19,28	40,39

Fuente: elaboración propia.

Realizadas todas estas lecturas y anotaciones en el primer ciclo de carga, se descarga el sistema de forma inversa a como se aplicó la carga, hasta lograr la descarga total, los datos de dicho procedimiento se dan en la tabla XXVI y en la tabla XXVII se muestran los datos de la aplicación de carga hasta alcanzar la falla.

Tabla XXVI. Descarga de ensayo sistema 4, JB – D2 y 3

No.	4P (kg)	P (kg)	W = 8P/3L (kg/m)	Deflexión unitaria		Deflexión acumulada	
				JB-D2	JB-D3	JB-D2	JB-D3
				$\bar{\delta}$ (mm)	$\bar{\delta}$ (mm)	$\bar{\delta}$ (mm)	$\bar{\delta}$ (mm)
1	544,55	136,14	121,01	0,00	0,00	0,00	0,00
2	492,55	123,14	109,46	0,20	0,89	0,20	0,89
3	439,15	109,79	97,59	0,41	0,97	0,61	1,85
4	386,35	96,59	85,86	2,95	0,84	3,56	2,69
5	332,75	83,19	73,94	0,46	3,48	4,01	6,17
6	281,55	70,39	62,57	0,53	1,98	4,55	8,15
7	228,55	57,14	50,79	0,58	6,12	5,13	14,27
7	228,55	57,14	50,79	0,00	0,00	5,13	14,27
8	174,35	43,59	38,74	1,04	2,54	6,17	16,81
9	122,75	30,69	27,28	1,14	2,74	7,32	19,56
10	101,5	25,38	22,56	0,97	1,35	8,28	20,90
11	76,25	19,06	16,94	0,81	1,19	9,09	22,10
12	32,00	8,00	7,11	1,55	2,69	10,64	24,79
13	0,00	0,00	0,00	2,13	2,49	12,78	27,28
14	0,00	0,00	0,00	1,27	4,14	14,05	31,42

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. Carga hasta la falla de ensayo sistema 4, JB – D2 y 3

No.	4P (kg)	P (kg)	W = 8P/3L (kg/m)	Deflexión unitaria		Deflexión acumulada	
				JB-D2	JB-D3	JB-D2	JB-D3
				$\bar{\delta}$ (mm)	$\bar{\delta}$ (mm)	$\bar{\delta}$ (mm)	$\bar{\delta}$ (mm)
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	32,00	8,00	7,11	0,25	1,02	0,25	1,02
3	76,25	19,06	16,94	1,27	1,57	1,52	2,59
4	101,5	25,38	22,56	0,71	1,14	2,24	3,73

Continuación de la tabla XXVII.

No.	4P (kg)	P (kg)	W = 8P/3L (kg/m)	Deflexión unitaria		Deflexión acumulada	
				JB-D2	JB-D3	JB-D2	JB-D3
				$\bar{\delta}$ (mm)	$\bar{\delta}$ (mm)	$\bar{\delta}$ (mm)	$\bar{\delta}$ (mm)
5	122,75	30,69	27,28	1,12	1,70	3,35	5,44
6	174,85	43,71	38,86	1,32	2,31	4,67	7,75
7	227,85	56,96	50,63	1,68	3,20	6,35	10,95
8	280,25	70,06	62,28	1,27	2,64	7,62	13,59
9	330,65	82,66	73,48	3,73	2,39	11,35	15,98
10	384,65	96,16	85,48	1,19	1,93	12,55	17,91
11	436,35	109,09	96,97	0,84	2,06	13,39	19,96
12	490,15	122,54	108,92	0,99	3,07	14,38	23,04
12	490,15	122,54	108,92	0,00	0,00	14,38	23,04
13	543,55	135,89	120,79	1,30	3,07	15,67	26,11
14	595,75	148,94	132,39	1,24	0,56	16,92	26,67

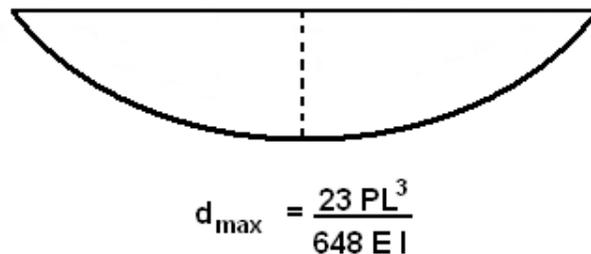
Fuente: elaboración propia.

### 5.3. Diagramas de corte y momento, obtenidos a partir de los ensayos de laboratorio, de los elementos estructurales

Previo a la obtención de los diagramas de corte y momento es necesario realizar los cálculos correspondientes de corte y momento máximo para luego poder dibujarlos. Se utilizaron las ecuaciones mostradas en la figura 37, donde se dan los diagramas para una viga simplemente apoyada con un par de fuerzas de igual magnitud actuando a un tercio de la luz efectiva cada una. El diagrama de corte se obtiene de forma sencilla pues el valor del cortante máximo será el mismo de cada una de las fuerzas P actuantes a un tercio de la luz.

Para encontrar el valor de momento máximo en la viga es necesaria la utilización de una ecuación ya establecida; este valor máximo se presentará en al centro de la viga. La deflexión máxima en este tipo de vigas, con las condiciones de carga y apoyos antes mencionados, se presenta al centro de la misma y está dado por la ecuación mostrada en la figura 43.

Figura 43. **Deflexión típica en viga simplemente apoyada**



Fuente: elaboración propia, con programa Auto Cad 2010.

Al analizar la ecuación de la deflexión máxima, se observa que esta depende de:

- P: fuerza aplicada a cada tercio de la viga
- L: longitud efectiva del vano
- E: módulo de elasticidad del material estudiado
- I: inercia de la sección analizada.

El módulo de elasticidad a utilizar será el de la especie *Guadua angustifolia*, se tomará como constante pues el bambú proviene del mismo lugar de la república, Para la determinación del valor de la inercia de la sección es necesario utilizar el teorema de ejes paralelos, en la ecuación 22 se muestra dicho teorema.

Ecuación 22

$$I = \sum I_i + \sum A_i * d_i^2$$

Donde:

$I_i$ : valor de la inercia de cada elemento en la sección.

$A_i$ : área transversal de cada elemento en la sección.

$d_i$ : distancia desde el centroide de cada elemento hasta el centroide de la sección como tal.

El valor al que se encuentra ubicado el centroide para una sección compuesta es necesario calcularlo también, por métodos matemáticos.

Ecuación 23

$$\bar{Y} = \frac{\sum \bar{y}_i * A_i}{\sum \bar{y}_i}$$

Donde:

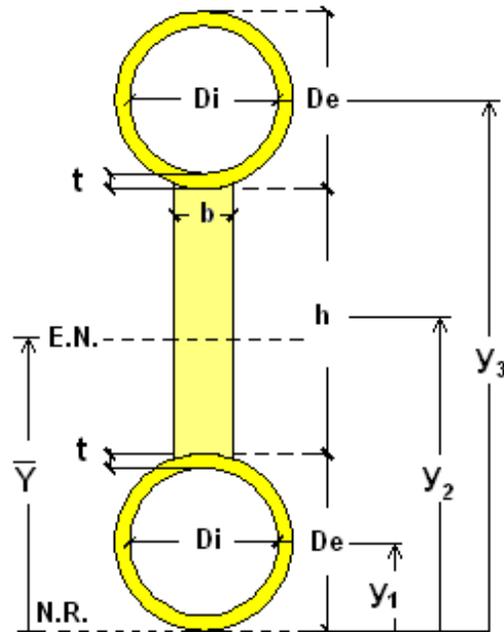
$Y$ : distancia desde la referencia hasta el eje neutro de la sección.

$y_i$ : distancia desde la referencia hasta el centroide de cada elemento en la sección.

$A_i$ : valor del área de cada elemento en la sección.

La sección a trabajar será la que se muestra en la figura 44.

Figura 44. Sección de *joist* compuesto



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Paint.

Donde:

N.R.: punto de referencia a partir del cual se tomarán las distancias

E.N.: eje neutro o centroide de la sección compuesta

Y: distancia hasta el eje neutro

El valor de cada incógnita mostrada en la figura 44, se calculó con las ecuaciones siguientes:

Ecuación 24

$$h = d - \left( \frac{Des}{2} + \frac{Dei}{2} \right)$$

Ecuación 25

$$y_1 = \left(\frac{Dei}{2}\right)$$

Ecuación 26

$$y_2 = Dei + \left(\frac{h}{2}\right)$$

Ecuación 27

$$y_3 = Dei + h + \left(\frac{Des}{2}\right)$$

Donde:

Des: diámetro exterior del cordón superior de la sección

Dei: diámetro exterior del cordón inferior de la sección

d: peralte efectivo de la sección

y<sub>1</sub>: distancia hasta el centroide del elemento 1

y<sub>2</sub>: distancia hasta el centroide del elemento 2

y<sub>3</sub>: distancia hasta el centroide del elemento 3

h: altura interna del elemento diagonal del alma

b: diámetro exterior del elemento diagonal

El centroide queda expresado de la siguiente manera:

$$\bar{Y} = \frac{\sum \bar{y}_i * A_i}{\sum \bar{y}_i}$$

Ecuación 28

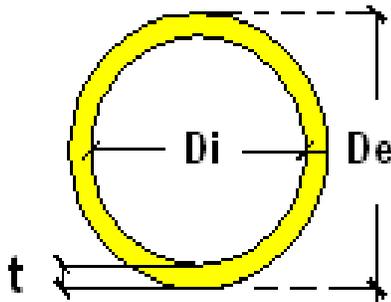
$$\bar{Y} = \frac{(y1 * A1) + (y2 * A2) + (y3 * A3)}{A1 + A2 + A3}$$

El área para una sección tubular, como la mostrada en la figura 45 se calcula de la siguiente forma:

Ecuación 29

$$A (1,3) = \frac{\pi}{4} (De^2 - Di^2)$$

Figura 45. **Sección de bambú**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Paint.

Donde:

De: valor medido del diámetro exterior del bambú analizado

Di: valor medido del diámetro interior del bambú analizado

Con las ecuaciones descritas anteriormente es posible encontrar las distancias Y hasta el centroide de cada viga diseñada, para ello se necesitó de los datos medidos directamente de las vigas, los cuales se dan en la tabla XXVIII, el uso de las ecuaciones, 25 a la 29, dio como resultado la tabla XXIX, donde se anotaron las distancias hasta el centroide de cada sección de las vigas diseñadas.

Tabla XXVIII. **Datos medidos directamente de vigas**

No.	Código	Des (cm)	Dis (cm)	Dei (cm)	Dii (cm)	b (cm)	d (cm)
1	JB - A1	9,97	9,19	8,70	7,90	6,28	30,00
2	JB - A2	8,10	7,50	8,37	7,77	6,25	30,00
3	JB - A3	9,00	8,39	9,00	8,40	6,42	30,00
4	JB - B1	8,93	8,33	8,13	7,53	5,95	30,00
5	JB - B2	8,25	7,64	8,20	7,59	6,20	30,00
6	JB - B3	8,55	7,95	8,45	7,85	6,07	30,00
7	JB - C1	9,13	8,53	8,33	7,73	6,15	45,00
8	JB - C2	9,35	8,74	8,25	7,64	6,38	45,00
9	JB - C3	9,02	8,42	8,33	7,73	5,83	45,00
10	JB - D1	9,88	9,01	9,10	8,30	6,52	45,00
11	JB - D2	9,55	8,88	8,72	7,99	6,17	45,00
12	JB - D3	9,17	8,51	8,67	8,02	6,43	45,00

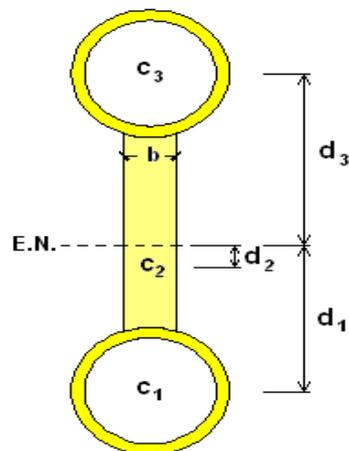
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Distancia al centroide de vigas**

h (cm)	A <sub>1</sub> (cm <sup>2</sup> )	A <sub>2</sub> (cm <sup>2</sup> )	A <sub>3</sub> (cm <sup>2</sup> )	y <sub>1</sub> (cm)	y <sub>2</sub> (cm)	y <sub>3</sub> (cm)	Y (cm)
20,67	10,43	129,85	11,73	4,35	19,03	34,35	19,21
21,77	7,55	136,04	7,35	4,18	19,25	34,18	19,22
21,00	8,23	134,76	8,31	4,50	19,50	34,50	19,51
21,47	7,38	127,73	8,21	4,07	18,87	34,07	18,98
21,78	7,54	135,01	7,64	4,10	19,09	34,10	19,10
21,50	7,66	130,44	7,73	4,23	19,20	34,23	19,21
36,27	7,62	223,04	8,38	4,17	26,47	49,17	26,55
36,20	7,56	231,06	8,64	4,13	26,35	49,13	26,47
36,33	7,60	211,88	8,22	4,17	26,50	49,17	26,57
35,51	10,93	231,41	12,97	4,55	26,85	49,55	27,05
35,87	9,58	221,19	9,70	4,36	26,65	49,36	26,68
36,08	8,52	232,12	9,16	4,33	26,71	49,33	26,78

Fuente: elaboración propia.

Figura 46. **Distancias hasta eje neutro de la sección**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Paint.

Teniendo la posición del eje neutro, es posible encontrar las distancias desde cada uno de los centroides de los elementos hasta la posición del eje neutro de la sección, como se ve en la figura 46.

Donde:

$d_1$ : distancia del eje centroidal de la sección hasta el centroide del cordón inferior

Ecuación 30

$$d_1 = Y - y_1$$

$d_2$ : distancia del eje centroidal de la sección hasta el centroide de diagonal visto en perfil

Ecuación 31

$$d_2 = | Y - y_2 |$$

$d_3$ : distancia del eje centroidal de la sección hasta el centroide del cordón superior

Ecuación 32

$$d_3 = y_3 - Y$$

El valor de la inercia de cada elemento por separado es posible calcularlo, para sección tubular con la ecuación 33:

Ecuación 33

$$I = \frac{\pi}{64} (De^4 - Di^4)$$

Para la inercia del elemento en diagonal mostrado en la figura 46, el perfil de éste se asemeja a un rectángulo con base (b) y altura (h), es así que dicho valor es calculable con la ecuación 34.

Ecuación 34

$$I = \left( \frac{bh^3}{12} \right)$$

Donde:

b: diámetro exterior del elemento diagonal

h: altura vista en perspectiva del elemento en diagonal

El valor de la inercia total del elemento compuesto, mostrado en la figura 46, quedará expresado por la ecuación 35:

Ecuación 35

$$I = (I_1 + I_2 + I_3) + [(A_1*d_1^2) + (A_2*d_2^2) + (A_3*d_3^2)]$$

Utilizando los datos anteriormente tabulados, como área neta de cada elemento y distancias hacia los centroides de cada uno, como se muestra en la tabla XXIX y utilizando las ecuaciones 30 a la 35, en una hoja de cálculo se obtiene el valor de la inercia de cada una de las vigas *joist* fabricadas con bambú.

La tabla XXX muestra la inercia de cada elemento en forma individual como la inercia total.

Tabla XXX. **Cálculo de inercia de la sección de cada viga diseñada**

d <sub>1</sub> (cm)	d <sub>2</sub> (cm)	d <sub>3</sub> (cm)	I <sub>1</sub> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>2</sub> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>3</sub> (cm <sup>4</sup> )	Inercia (cm <sup>4</sup> )	Inercia (m <sup>4</sup> )
14,86	0,17	15,14	90,02	427,16	134,75	5648,81	5,65E-05
15,04	0,03	14,96	61,56	442,84	55,99	3914,49	3,91E-05
15,01	0,01	14,99	77,90	462,42	78,60	4338,39	4,34E-05
14,91	0,11	15,09	56,70	376,83	76,57	4023,42	4,02E-05
15,00	0,01	15,00	58,86	432,47	60,33	3966,68	3,97E-05
14,98	0,01	15,02	63,67	400,11	65,84	3990,63	3,99E-05
22,38	0,08	22,62	61,52	703,00	81,77	8951,03	8,95E-05
22,34	0,12	22,66	59,81	784,52	88,47	9147,32	9,15E-05
22,40	0,07	22,60	61,33	600,76	78,13	8748,45	8,75E-05
22,50	0,20	22,50	103,66	819,02	144,95	13176,34	1,32E-04
22,32	0,03	22,68	83,67	701,02	103,08	10647,64	1,06E-04
22,44	0,07	22,56	74,20	800,50	89,56	9916,97	9,92E-05

Fuente: elaboración propia.

Con los valores de inercia ya calculados, para cada una de las vigas, es posible realizar los diagramas de corte-momento y calcular la deflexión máxima teórica, pero para ello antes es necesario atender lo que dice la Norma Técnica Peruana E-100 Bambú, sobre la deflexión máxima permisible en estructuras de techo, donde se indica que debe tomarse con un valor de: la longitud efectiva del vano a cubrir dividida entre 200 ( $L/200$ ). El diseño se realizó tomando como luz efectiva tres metros, debido a las condiciones de ensayos y método constructivo, con este dato podemos decir que la flecha máxima permisible será de 15 milímetros o bien 1,5 centímetros, esta fue útil para analizar en los ensayos realizados y en las tablas de carga-deflexión, pues se trabajó con el dato de carga P que produjo como máximo una deflexión de 15 milímetros.

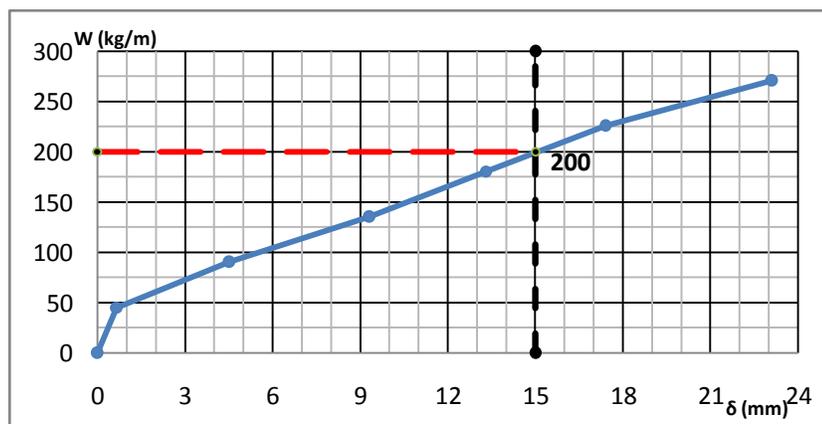
Para obtener el valor de esta fuerza P es necesario elaborar las gráficas de carga-deflexión, y de ahí leer directa y aproximadamente o interpolando el valor de la carga sobre la viga al momento de sufrir la deflexión máxima, luego fue posible realizar una tabla resumen con los datos de cada carga a utilizar.

#### 5.4. Gráficas carga-deflexión de *joist* diseñados

De la aplicación de carga realizada en cada uno de los ensayos se obtuvieron las tablas respectivas, con ellas fue posible realizar gráficas donde se muestra el comportamiento de cada una de las vigas ensayadas ante la solicitud de carga, en las figuras desde la 47 a la 50 se muestran dichas gráficas obtenidas de los ensayos individuales.

- Ensayos individuales
  - JB – A1

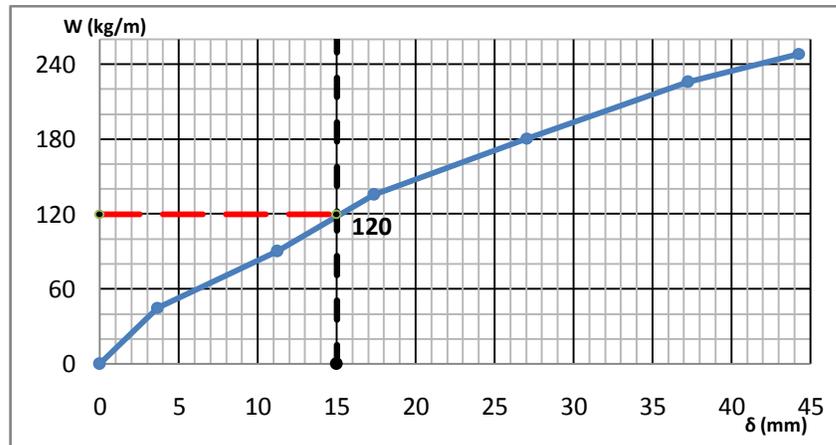
Figura 47. Gráfica carga *versus* deflexión JB – A1



Fuente: elaboración propia.

- JB – B1

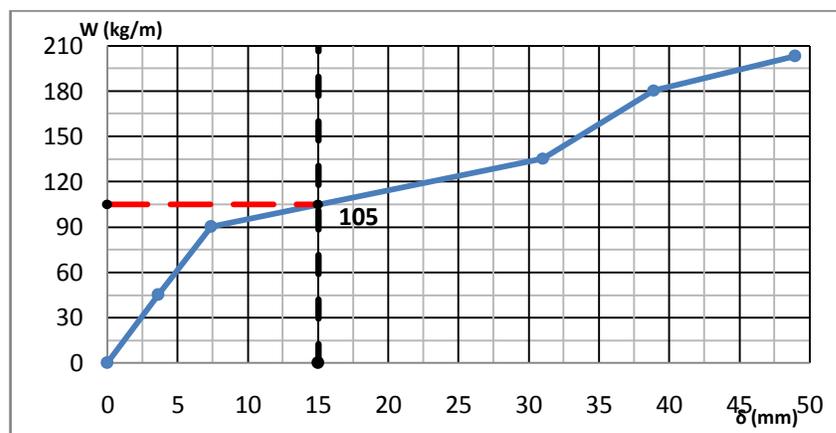
Figura 48. **Gráfica carga *versus* deflexión JB – B1**



Fuente: elaboración propia.

- JB – C1

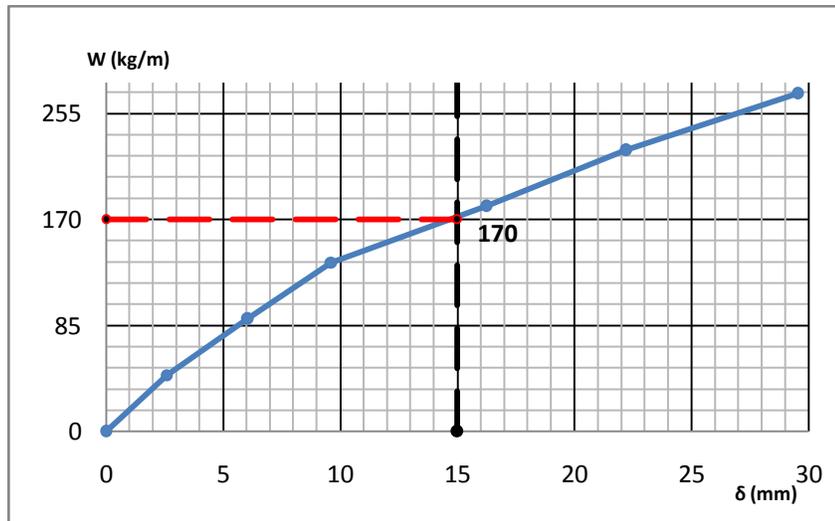
Figura 49. **Gráfica carga *versus* deflexión JB – C1**



Fuente: elaboración propia.

- JB – D1

Figura 50. **Gráfica carga versus deflexión JB – D1**



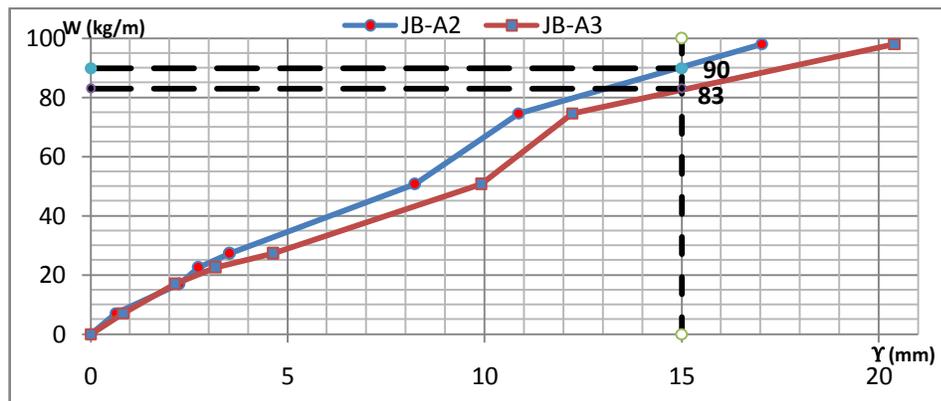
Fuente: elaboración propia.

En las figuras de 51 a la 54 se muestran las gráficas para los ensayos de sistema de vigas, es por eso que se muestran dos líneas en cada gráfica, de estas se puede tomar el dato aproximado de carga cuando se alcanzó aproximadamente la deflexión máxima permisible de 15 milímetros. Este dato será la carga linealmente distribuida sobre la viga y para obtener el valor que se necesita de carga puntual en los tercios solamente se hace una regresión, utilizando la ecuación 21. Estos datos se muestran en la tabla XXXI.

- Ensayos de sistemas

- Sistema 1

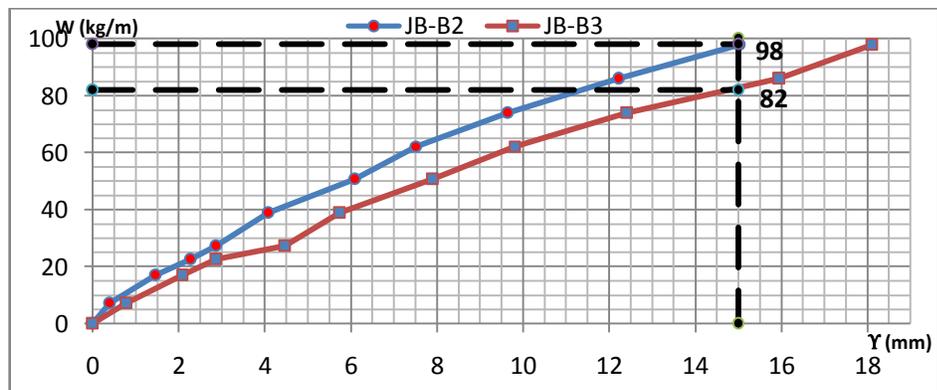
Figura 51. Gráfica W (kg/m) versus  $\gamma$  (mm), sistema 1, JB – A2 y A3



Fuente: elaboración propia.

- Sistema 2

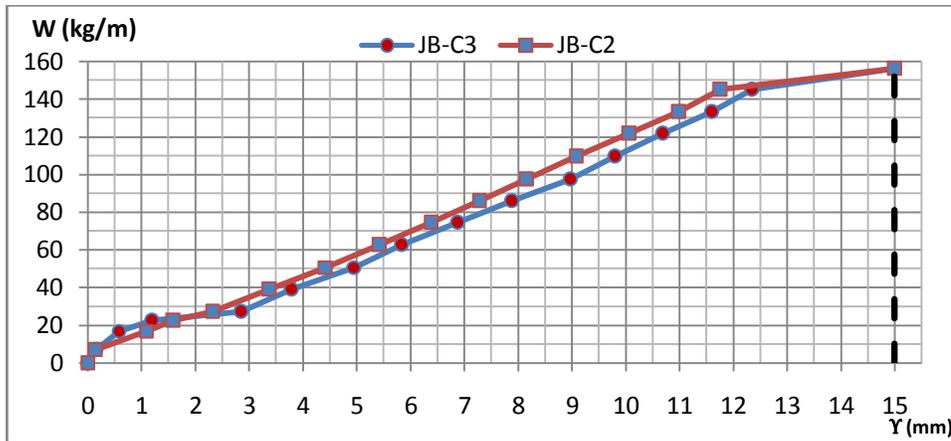
Figura 52. Gráfica W (kg/m) versus  $\gamma$  (mm), sistema 2, JB – B2 y B3



Fuente: elaboración propia.

- Sistema 3

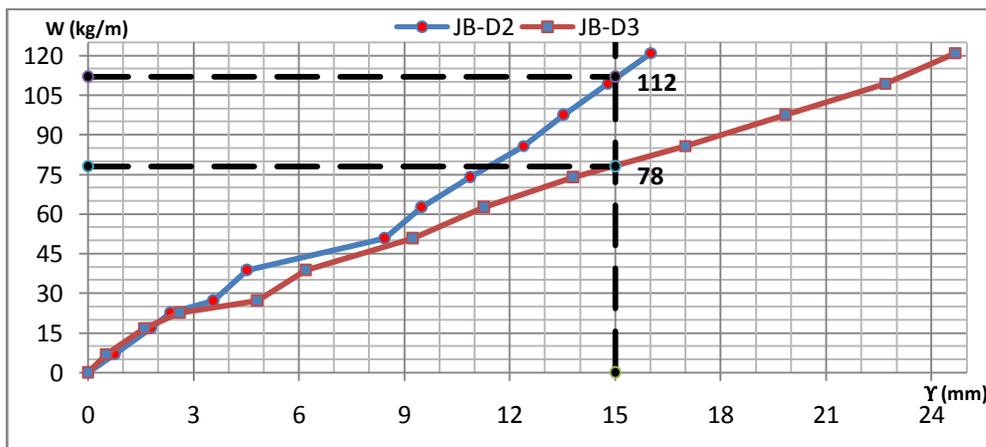
Figura 53. Gráfica W (kg/m) versus  $\gamma$  (mm), sistema 3, JB – C2 y C3



Fuente: elaboración propia.

- Sistema 4

Figura 54. Gráfica W (kg/m) versus  $\gamma$  (mm), sistema 4, JB – D2 y D3



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Datos de carga para diseño de vigas**

No.	Código	$W_{\text{ensayo}}$ (kg/m)	P (kg)
1	JB - A1	200,00	225,00
2	JB - A2	90,00	101,25
3	JB - A3	83,00	93,38
4	JB - B1	120,00	135,00
5	JB - B2	98,00	110,25
6	JB - B3	82,00	92,25
7	JB - C1	105,00	118,13
8	JB - C2	156,00	175,50
9	JB - C3	156,00	175,50
10	JB - D1	170,00	191,25
11	JB - D2	112,00	126,00
12	JB - D3	78,00	87,75

Fuente: elaboración propia.

- Diagramas de corte y momento de vigas evaluadas

Para dibujar los diagramas de corte y momento de cada una de las vigas ensayadas se calcularon los valores de corte máximo y momento máximo, con las ecuaciones que se muestran en la figura 37, pues de esta forma se ensayaron los elementos, la construcción de los diagramas se realizó con el mismo procedimiento para cada una de las vigas ensayadas, por ello se plasman únicamente los diagramas de una viga y el resto de datos se dejan tabulados para la mejor comprensión y construcción de cada uno de ellos, esto se hace, ya que solo es necesario tomar en cuenta los valores de cortante y momento máximo que afectan la viga. Para el diagrama de corte se utilizaron los datos mostrados en la tabla XXXII.

Tabla XXXII. **Datos para diagrama de corte de JB – A1**

No.	Código	P (kg)	V <sub>máx.</sub> (kg)
1	JB - A1	225,00	225,00

Fuente: elaboración propia.

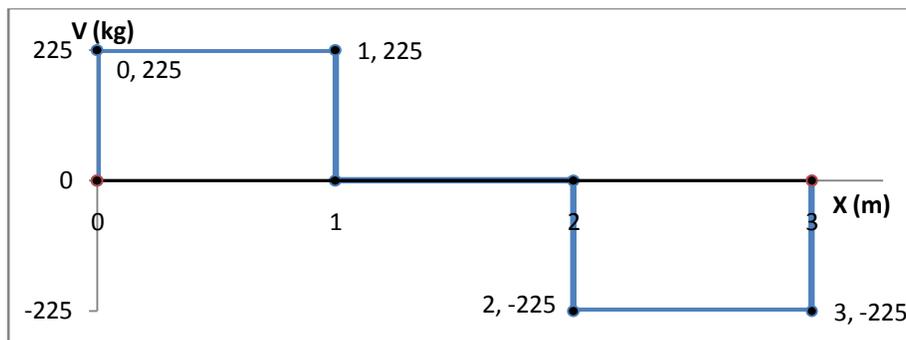
Con los datos de la tabla XXXIII es posible elaborar el diagrama de corte mostrado en la figura 55.

Tabla XXXIII. **Cortante en cada posición de la viga**

No.	Código	Corte en la posición de:		
		0 – 1m	1 – 2m	2 – 3m
1	JB - A1	225,00	0,00	225,00

Fuente: elaboración propia.

Figura 55. **Diagrama de corte JB – A1**



Fuente: elaboración propia.

Para el diagrama de momento se utilizaron los datos mostrados en la tabla XXXIV.

Tabla XXXIV. **Datos para diagrama de momento de JB – A1**

No.	Código	P (kg)	M <sub>máx.</sub> (kg-m)
1	JB - A1	225,00	225,00

Fuente: elaboración propia.

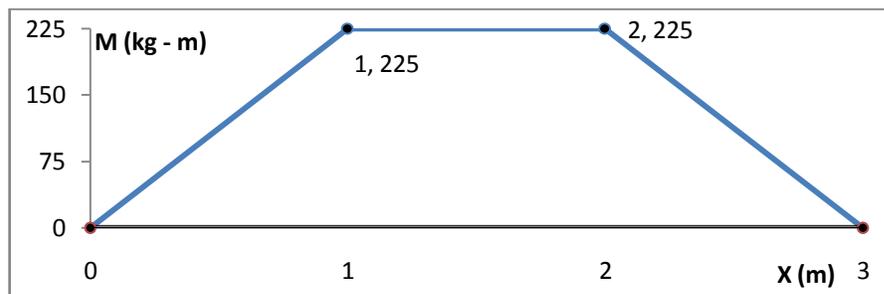
Con los datos de la tabla XXXV es posible elaborar el diagrama de corte mostrado en la figura 56.

Tabla XXXV. **Momento en cada posición de la viga**

No.	Código	Momento en:			
		0m	1m	2m	3m
1	JB – A1	0,00	225,00	225,00	0,00

Fuente: elaboración propia.

Figura 56. **Diagrama de momento JB – A1**



Fuente: elaboración propia.

Una vez se ha explicado la construcción de los diagramas para la viga *joist* JB – A1, la construcción para el resto de vigas ensayadas es idéntica, por ello únicamente se muestran en la tabla XXXVI, los datos más relevantes para construirlos.

Tabla XXXVI. **Datos de cortante y momento máximo en cada viga**

No.	Código	P (kg)	V <sub>máx.</sub> (kg)	M <sub>máx.</sub> (kg-m)
1	JB - A1	225,00	225,00	225,00
2	JB - A2	101,25	101,25	101,25
3	JB - A3	93,38	93,38	93,38
4	JB - B1	135,00	135,00	135,00
5	JB - B2	110,25	110,25	110,25
6	JB - B3	92,25	92,25	92,25
7	JB - C1	118,13	118,13	118,13
8	JB - C2	175,50	175,50	175,50
9	JB - C3	175,50	175,50	175,50
10	JB - D1	191,25	191,25	191,25
11	JB - D2	126,00	126,00	126,00
12	JB - D3	87,75	87,75	87,75

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVII. **Valores de corte en posiciones de cada viga**

No.	Código	Corte (kg) en la posición de:		
		0 – 1 m	1 – 2 m	2 – 3 m
1	JB - A1	225,00	0,00	225,00
2	JB - A2	101,25	0,00	101,25
3	JB - A3	93,38	0,00	93,38
4	JB - B1	135,00	0,00	135,00
5	JB - B2	110,25	0,00	110,25

Continuación de la tabla XXXVII.

No.	Código	CORTE (kg) EN LA POSICIÓN		
		0 – 1 m	1 – 2 m	2 – 3 m
6	JB - B3	92,25	0,00	92,25
7	JB - C1	118,13	0,00	118,13
8	JB - C2	175,50	0,00	175,50
9	JB - C3	175,50	0,00	175,50
10	JB - D1	191,25	0,00	191,25
11	JB - D2	126,00	0,00	126,00
12	JB - D3	87,75	0,00	87,75

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII. **Valores de momento en posiciones de cada viga**

No.	Código	Momento (kg-m) en:			
		0 m	1 m	2 m	3 m
1	JB - A1	0,00	225,00	225,00	0,00
2	JB - A2	0,00	101,00	101,00	0,00
3	JB - A3	0,00	93,00	93,00	0,00
4	JB - B1	0,00	135,00	135,00	0,00
5	JB - B2	0,00	110,00	110,00	0,00
6	JB - B3	0,00	92,00	92,00	0,00
7	JB - C1	0,00	118,00	118,00	0,00
8	JB - C2	0,00	176,00	176,00	0,00
9	JB - C3	0,00	176,00	176,00	0,00
10	JB - D1	0,00	191,00	191,00	0,00
11	JB - D2	0,00	126,00	126,00	0,00
12	JB - D3	0,00	88,00	88,00	0,00

Fuente: elaboración propia.

Para construir los diagramas de corte, estará bien con la comprensión de la tabla XXXVII, donde se tienen los valores de cortante en las posiciones relevantes de la viga y para construir los diagramas de momento bastará con la comprensión de la tabla XXXVIII, donde se tienen los valores más relevantes en las posiciones de cada viga. Con dos datos de corte máximo y momento podemos realizar los cálculos para cada uno de los cordones de la viga y así analizar si el diseño propuesto cumple con las especificaciones mínimas necesarias para el bambú estructural.

### 5.5. Análisis de cordón inferior

Para calcular los valores necesarios y analizar el cordón inferior en cada una de las vigas se utilizarán las ecuaciones 3, 4 y 5

Ecuación 3

$$P = \frac{M}{d}$$

Ecuación 4

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Donde:

- M: momento máximo aplicado sobre la viga
- P: fuerza axial de tensión sobre el cordón inferior
- d: peralte efectivo de la viga
- L: longitud del vano de la viga
- A: área neta transversal del cordón inferior
- $\sigma$ : esfuerzo de tensión aplicado al cordón inferior

Ecuación 5

$$\sigma_{tp} = \frac{P}{2el} \leq \sigma'_{tp}$$

Donde:

$\sigma_{\perp}$ : esfuerzo de tracción perpendicular a las fibras actuante

P: fuerza perpendicular aplicada en ensayo

e: espesor promedio de pared

l: longitud media del entrenudo

$\sigma'_{\perp}$ : esfuerzo de tracción perpendicular a las fibras permisible, modificado por los coeficientes que sean necesarios.

Parta fines prácticos se muestra el procedimiento de cálculo únicamente para la primera viga, pues luego se dejaron los resultados de todos los cálculos utilizando las ecuaciones respectivas en la tabla XXXIX.

- JB – A1, esfuerzo de tensión paralelo a la fibra

Datos:

$$M_{\text{máx.}} = 225 \text{ kg-m}$$

$$d = 30 \text{ cm} = 0,3 \text{ m}$$

$$A_{\text{neta}} = 10,43 \text{ cm}^2$$

$$P = \frac{M}{d}$$

$$P = \frac{225 \text{ kg-m}}{0,3\text{m}} = 750 \text{ kg}$$

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

$$\sigma = \frac{750 \text{ kg}}{10,43 \text{ cm}^2} = 71,91 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

El esfuerzo permisible para la tensión paralela a la fibra es de 2 551,26 kg/cm<sup>2</sup>

- JB –A1, esfuerzo de tracción perpendicular a la fibra

Datos:

$$P_{\perp} = 225 \text{ kg}$$

$$e = t = 8,70 \text{ cm} - 7,90 \text{ cm} = 0,80 \text{ cm}$$

$$l = 40 \text{ cm}$$

$$\sigma_{tp} = \frac{P}{2el}$$

$$\sigma_{tp} = \frac{225 \text{ kg}}{2(0,80 \text{ cm})(40 \text{ cm})} = 3,52 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

El esfuerzo permisible para la tensión perpendicular a la fibra es de 19,84 kilogramos por centímetro cuadrado.

Como lo establece la Norma Técnica Peruana E-100 Bambú, los esfuerzos obtenidos deben ser comparados con los esfuerzos máximos permisibles modificados por los coeficientes de acuerdo a la ecuación No. 18

Ecuación 18

$$F_i = f_i (C_D) (C_L) (C_T)$$

Donde:

$C_D = 1$  pues se diseña para carga viva

$C_L = 0,95$  pues la relación  $d/b = 3$  según la figura 19

$C_T = 1$  pues la separación entre vigas es mayor que 0,6 m

Tabla XXXIX. **Esfuerzos sobre cordón inferior de vigas diseñadas**

No.	Código	$M_{\text{máx.}}$ (kg-m)	$P_{\perp}$ (kg)	d (m)	A (cm <sup>2</sup> )	e (cm)	l (cm)	P (kg)	$\sigma$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{\perp}$ (kg/cm <sup>2</sup> )
1	JB - A1	225,00	225,00	0,30	10,43	0,80	40	750,00	71,91	3,52
2	JB - A2	101,25	101,25	0,30	7,55	0,60	40	337,50	44,68	2,12
3	JB - A3	93,38	93,38	0,30	8,23	0,60	40	311,25	37,84	1,94
4	JB - B1	135,00	135,00	0,30	7,38	0,60	40	450,00	60,96	2,81
5	JB - B2	110,25	110,25	0,30	7,54	0,61	40	367,50	48,73	2,27
6	JB - B3	92,25	92,25	0,30	7,66	0,60	40	307,50	40,16	1,93
7	JB - C1	118,13	118,13	0,45	7,62	0,60	40	262,50	34,45	2,44
8	JB - C2	175,50	175,50	0,45	7,56	0,61	40	390,00	51,55	3,62
9	JB - C3	175,50	175,50	0,45	7,60	0,60	40	390,00	51,35	3,64
10	JB - D1	191,25	191,25	0,45	10,93	0,80	40	425,00	38,87	2,99
11	JB - D2	126,00	126,00	0,45	9,58	0,73	40	280,00	29,24	2,16
12	JB - D3	87,75	87,75	0,45	8,52	0,65	40	195,00	22,89	1,69

Fuente: elaboración propia.

El esfuerzo permisible de tensión paralelo a la fibra:

$$\sigma' = 2551,26 \text{ kg/cm}^2 (1) (0,95) (1) = 2\,423,70 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

El esfuerzo permisible de tensión perpendicular a la fibra:

$$\sigma'^{\perp} = 19,84 \text{ kg/cm}^2 (1) (0,95) (1) = 18,85 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

En la tabla XXXIX se presentan los valores calculados para el cordón inferior de cada una de las vigas.

## 5.6. Análisis de cordón superior

Para calcular los valores necesarios para analizar el cordón inferior en cada una de las vigas se utilizarán las ecuaciones 6, 7, 8 y 9. Debido a que es muy extenso dejar la constancia de todos los cálculos para cada una de las vigas, se dejó plasmada únicamente el de la viga JB – A1, el resto de datos calculados se podrán analizar en las tablas XL, XLI y XLII.

- Flexión

Ecuación 6

$$f_m = \frac{M}{S} \leq f'_m$$

Ecuación 7

$$S = \frac{I}{C}$$

Donde:

$f_m$ : esfuerzo a flexión actuante

$f'_m$ : esfuerzo admisible modificado

$M$ : momento máximo actuante sobre el elemento

$S$ : módulo de sección

$I$ : momento de Inercia de la sección analizada

$C$ : distancia desde el centroide hasta la fibra extrema

$\sigma_f$ : esfuerzo de flexión

Datos:

$$M_{\max} = 225 \text{ kg-m} * 100 \text{ (cm/m)} = 22\,500 \text{ kg - cm}$$

$$I = 5\,648,81 \text{ cm}^4$$

$$C = 15,14 \text{ cm}$$

$$S = \frac{5\,648,81 \text{ cm}^4}{15,14 \text{ cm}} = 375,48 \text{ cm}^3$$

$$f_m = \frac{22\,500 \text{ kg - cm}}{375,48 \text{ cm}^3} = 59,92 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

- Flexión permisible:  $f'_m = 160(1) (0,95) (1) = 152 \text{ kg/cm}^2$

Tabla XL. **Esfuerzo de flexión sobre cordón superior**

No.	Código	M máx. (kg-m)	I (cm <sup>4</sup> )	C (cm)	S (cm)	fm (kg/cm <sup>2</sup> )
1	JB - A1	225,00	5 648,81	15,14	373,06	60,31
2	JB - A2	101,25	3 914,49	14,96	261,66	38,69
3	JB - A3	93,38	4 338,39	14,99	289,38	32,27
4	JB - B1	135,00	4 023,42	15,09	266,61	50,64
5	JB - B2	110,25	3 966,68	15,00	264,42	41,70
6	JB - B3	92,25	3 990,63	15,02	265,77	34,71
7	JB - C1	118,13	8 951,03	22,62	395,80	29,84
8	JB - C2	175,50	9 147,32	22,66	403,69	43,47
9	JB - C3	175,50	8 748,45	22,60	387,14	45,33
10	JB - D1	191,25	13 176,34	22,50	585,67	32,66
11	JB - D2	126,00	10 647,64	22,68	469,47	26,84
12	JB - D3	87,75	9 916,97	22,56	439,62	19,96

Fuente: elaboración propia.

- Esfuerzo cortante paralelo a las fibras

Ecuación 8

$$F_v = \left( \frac{2V}{3A} \right) \left( \frac{3De^2 - 4De^2 + 4t^2}{De^2 - 2De(t) + 2t^2} \right) \leq F_v$$

Dónde:

F<sub>v</sub>: esfuerzo cortante paralelo a las fibras actuante.

A: área de la sección transversal del elemento de bambú.

De: diámetro externo promedio de la sección de bambú.

t: espesor promedio de la sección del bambú.

F'v: esfuerzo admisible para corte paralelo a las fibras, modificado por los coeficientes adecuados.

V: fuerza cortante en la sección considerada.

Datos:

$$V = 225 \text{ kg}$$

$$A = 11,73 \text{ cm}^2$$

$$D_e = 9,97 \text{ cm}$$

$$t = 997 \text{ cm} - 9,19 \text{ cm} = 0,78 \text{ cm}$$

$$F_v = \left( \frac{2 * 225 \text{ kg}}{3 * 10,43 \text{ cm}^2} \right) \left( \frac{3(9,97 \text{ cm})^2 - 4(9,97 \text{ cm})^2 + 4(0,78 \text{ cm})^2}{(9,97 \text{ cm})^2 - (2 * 9,97 \text{ cm} * 0,78 \text{ cm}) + (2 * (0,78 \text{ cm})^2)} \right)$$

$$F_v = -14,57 \text{ kg/cm}^2 = 14,57 \text{ kg/cm}^2$$

Cortante paralelo a las fibras permisible: F'v = 109,22 kg/cm<sup>2</sup> (1) (0,95) (1) = 103,76 kg/cm<sup>2</sup>

Tabla XLI. **Cortante paralelo a las fibras sobre cordón superior**

No.	Código	V <sub>max</sub> (kg)	A (cm <sup>2</sup> )	D <sub>es</sub> (cm)	t (cm)	Fv (kg/cm <sup>2</sup> )
1	JB - A1	225,00	11,73	9,97	0,78	14,57
2	JB - A2	101,25	7,35	8,10	0,60	10,41
3	JB - A3	93,38	8,31	9,00	0,61	8,42
4	JB - B1	135,00	8,21	8,93	0,61	12,31
5	JB - B2	110,25	7,64	8,25	0,61	10,91

Continuación de la tabla XLI.

No.	Código	V <sub>max</sub> (kg)	A (cm <sup>2</sup> )	D <sub>es</sub> (cm)	t (cm)	Fv (kg/cm <sup>2</sup> )
6	JB - B3	92,25	7,73	8,55	0,60	8,97
7	JB - C1	118,13	8,38	9,13	0,60	10,54
8	JB - C2	175,50	8,64	9,35	0,61	15,16
9	JB - C3	175,50	8,22	9,02	0,60	15,97
10	JB - D1	191,25	12,97	9,88	0,87	11,35
11	JB - D2	126,00	9,70	9,55	0,67	9,76
12	JB - D3	87,75	9,16	9,17	0,66	7,22

Fuente: elaboración propia.

- Aplastamiento o compresión perpendicular a las fibras

Ecuación 9

$$F_c = \frac{3RDe}{2t^2l} \leq F'c$$

Donde:

F'p: esfuerzo admisible en compresión perpendicular a la fibra, modificado por los coeficientes a que haya lugar.

f'c: esfuerzo actuante en compresión perpendicular a la fibra.

De: diámetro externo promedio de la sección de guadua rolliza.

t: espesor promedio de la sección de guadua rolliza.

l: longitud de apoyo

R: fuerza aplicada en el sentido perpendicular a las fibras.

Datos:

R = 225 kg

De = 9,97 cm

t = 0,78 cm

l = 40 cm

$$F_c = \frac{3(225 \text{ kg})(9,97 \text{ cm})}{2(0,78 \text{ cm})^2(40 \text{ cm})} = 138,27 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Compresión perpendicular a las fibras permisible:  $F'_c = 130 \text{ kg/cm}^2$  (1) (0,95)  
(1) =  $123,50 \text{ kg/cm}^2$

Tabla XLII. **Compresión perpendicular en cordón superior**

No.	Código	R (kg)	D <sub>es</sub> (cm)	t (cm)	l (cm)	F <sub>c</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )
1	JB - A1	225,00	9,97	0,78	40,00	138,23
2	JB - A2	101,25	8,10	0,60	40,00	85,43
3	JB - A3	93,38	9,00	0,61	40,00	85,25
4	JB - B1	135,00	8,93	0,61	40,00	123,15
5	JB - B2	110,25	8,25	0,61	40,00	91,07
6	JB - B3	92,25	8,55	0,60	40,00	83,27
7	JB - C1	118,13	9,13	0,60	40,00	110,90
8	JB - C2	175,50	9,35	0,61	40,00	166,46
9	JB - C3	175,50	9,02	0,60	40,00	164,84
10	JB - D1	191,25	9,88	0,87	40,00	92,79
11	JB - D2	126,00	9,55	0,67	40,00	100,52
12	JB - D3	87,75	9,17	0,66	40,00	69,25

Fuente: elaboración propia.

## 5.7. Análisis de cordón diagonal

Para calcular los valores necesarios y analizar el cordón diagonal que resiste el mayor esfuerzo en cada una de las vigas, se utilizaron las ecuaciones 10, 13, 14, 15, 16 y 17. Debido a que es muy extenso dejar la constancia de todos los cálculos para cada una de las vigas, se dejó plasmada únicamente el de la viga JB – A1, el resto de datos calculados se podrá analizar en las tablas XLIII y XLIV.

Ecuación 20:

$$W = \frac{8P}{3L}$$

Ecuación 10

$$R = \frac{WL}{2}$$

Ecuación 14

$$V = R - W(Lx)$$

Ecuación 15

$$Ld = \sqrt{d^2 + \left(\frac{Lx}{2}\right)^2}$$

Ecuación 16

$$Lx = \frac{2d}{\tan \alpha}$$

Donde:

L: longitud del vano.

V: valor del cortante en el punto de intersección con el cordón diagonal a diseñar.

R: valor de la reacción en el apoyo de la viga.

W: valor de la carga uniformemente distribuida.

Lx: longitud entre dos cordones diagonales.

Ld: longitud del cordón diagonal.

d: peralte de la viga.

$\alpha$ : ángulo interno del triángulo formado en la viga *joist*.

Datos:

$$P = 225 \text{ kg}$$

$$L = 3 \text{ m}$$

$$d = 0,3 \text{ m}$$

$$\alpha = 60^\circ$$

Ecuación 20:

$$W = \frac{8(225 \text{ kg})}{3(3 \text{ m})} = 200 \text{ kg/m}$$

Ecuación 10

$$R = \frac{200 \text{ kg/m}(3 \text{ m})}{2} = 300 \text{ kg}$$

Ecuación 16

$$Lx = \frac{2(0,3 \text{ m})}{\tan 60^\circ} = 0,35 \text{ m}$$

Ecuación 14

$$V = 300 \text{ kg} - (200 \text{ kg/m})(0,35 \text{ m}) = 230 \text{ kg}$$

Ecuación 15

$$Ld = \sqrt{(0,3 \text{ m})^2 + \left(\frac{0,35 \text{ m}}{2}\right)^2} = 0,35 \text{ m}$$

Ecuación 13

$$C = V \left( \frac{d}{Ld} \right)$$

Donde:

C: valor de compresión que se presenta en el cordón diagonal de referencia

Ld: longitud del cordón diagonal

d: peralte de la viga

$$C = 230 \text{ kg} \left( \frac{0,3 \text{ m}}{0,35 \text{ m}} \right) = 197,14 \text{ kg}$$

Tabla XLIII. **Compresión aplicada sobre el cordón diagonal**

No.	Código	P (kg)	L (m)	d (m)	$\alpha^\circ$	W (kg/m)	R (kg)	Lx (m)	V (kg)	Ld (m)	C (kg)
1	JB - A1	225,00	3	0,3	60	200	300,0	0,35	230,72	0,35	199,81
2	JB - A2	101,25	3	0,3	60	90	135,0	0,35	103,82	0,35	89,91
3	JB - A3	93,38	3	0,3	60	83	124,5	0,35	95,75	0,35	82,92
4	JB - B1	135,00	3	0,3	60	120	180,0	0,35	138,43	0,35	119,88
5	JB - B2	110,25	3	0,3	60	98	147,0	0,35	113,05	0,35	97,91
6	JB - B3	92,25	3	0,3	60	82	123,0	0,35	94,59	0,35	81,92
7	JB - C1	118,13	3	0,45	60	105	157,5	0,52	102,94	0,52	89,15
8	JB - C2	175,50	3	0,45	60	156	234,0	0,52	152,94	0,52	132,45
9	JB - C3	175,50	3	0,45	60	156	234,0	0,52	152,94	0,52	132,45
10	JB - D1	191,25	3	0,45	60	170	255,0	0,52	166,67	0,52	144,34
11	JB - D2	126,00	3	0,45	60	112	168,0	0,52	109,80	0,52	95,09
12	JB - D3	87,75	3	0,45	60	78	117,0	0,52	76,47	0,52	66,22

Fuente: elaboración propia.

El valor de esfuerzo ante el desgarre es:

Ecuación 17

$$S_s = \frac{C}{2b_1 * l}$$

Donde:

Ss: valor de desgarre sobre el elemento

C: fuerza de tensión o compresión aplicada al elemento

b1: distancia desde la cresta del agujero hasta el extremo del elemento

l: espesor de la pared del elemento a estudiar

Datos:

$$C = 197,14 \text{ kg}$$

$$b1 = 4 \text{ cm}$$

$$l = 0,72 \text{ cm}$$

Ecuación 17

$$Ss = \frac{197,14 \text{ kg}}{2(4 \text{ cm}) * (0,72 \text{ cm})} = 34,22 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Cortante paralelo a la fibra permisible:  $Ss' = 118,35 \text{ kg/cm}^2 (1) (0,95) (1) = 112,43 \text{ kg/cm}^2$

Tabla XLIV. **Cortante paralelo a las fibras sobre el cordón diagonal**

No.	Código	P (kg)	C (kg)	b1 (cm)	l (cm)	Ss (kg/cm <sup>2</sup> )
1	JB - A1	225,00	199,81	4,00	0,72	34,69
2	JB - A2	101,25	89,91	4,00	0,60	18,86
3	JB - A3	93,38	82,92	4,00	0,61	16,94
4	JB - B1	135,00	119,88	4,00	0,60	24,89
5	JB - B2	110,25	97,91	4,00	0,60	20,40
6	JB - B3	92,25	81,92	4,00	0,60	17,01
7	JB - C1	118,13	89,15	4,00	0,60	18,45
8	JB - C2	175,50	132,45	4,00	0,60	27,59
9	JB - C3	175,50	132,45	4,00	0,60	27,64
10	JB - D1	191,25	144,34	4,00	0,61	29,48
11	JB - D2	126,00	95,09	4,00	0,63	18,78
12	JB - D3	87,75	66,22	4,00	0,62	13,40

Fuente: elaboración propia.

## 5.8. Diseño de sistemas

Para obtener una separación máxima entre vigas *joist* de bambú atendiendo los datos obtenidos de los ensayos, es necesario establecer condiciones de carga mínima según la Norma Técnica Peruana E-100 Bambú. Las cargas a las que el sistema puede ser sometido son: sismo, viento y lluvia, dejando a un lado la carga ocupacional, pues se pretende que el diseño sea para estructuras de techos livianos y no un entrepiso.

- Sismo: 16,1 kg/m<sup>2</sup> por área techada
- Viento: 21 kg/m<sup>2</sup> por área proyectada
- Lluvia: 21 kg/m<sup>2</sup> por área proyectada

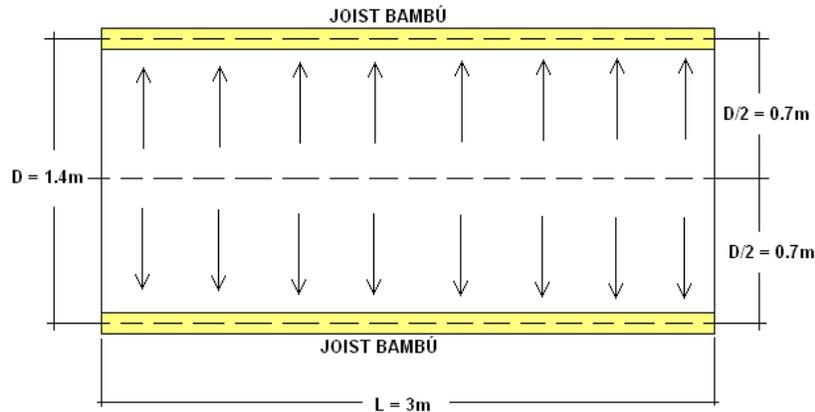
Estos datos son válidos cuando se utiliza una cubierta de techo liviana cuando el peso propio de esta no exceda de 5 kg/m<sup>2</sup>. Teniendo estos datos se puede decir que la carga distribuida por metro cuadrado mínima a diseñar para el sistema de techo utilizando *joist* fabricados de bambú será la condición más crítica, es decir la suma de los valores de sismo, viento, lluvia y peso propio.

$$W_d = \text{sismo} + \text{viento} + \text{lluvia} + \text{peso propio}$$

$$W_d = 16,1 \text{ kg/m}^2 + 21 \text{ kg/m}^2 + 21 \text{ kg/m}^2 + 5 \text{ kg/m}^2 = 63,1 \text{ kg/m}^2$$

Con este valor mínimo se puede comparar con la solicitud de carga soportada por cada una de las variaciones de vigas ensayadas, para ello se tomó el valor de carga puntual, colocada a cada tercio de la viga y con las ecuaciones ya expuestas se pasó a carga distribuida linealmente sobre las vigas.

Figura 57. **Planta típica de sistema ensayado**



Fuente: elaboración propia, con programa Auto Cad 2010.

Para poder comparar realmente es necesario convertir esta carga por metro lineal a carga por metro cuadrado, para ello tenemos la separación propuesta de un metro con cuarenta centímetros entre vigas, se sabe que el sistema trabajará en un solo sentido, es decir la mitad de cada área tributará hacia cada viga, como se muestra en la figura 57.

Con lo anterior se puede calcular la carga distribuida por metro cuadrado aplicada a cada promedio a cada variación de vigas, con tan solo dividir la carga distribuida por metro lineal promedio entre la distancia media de separación del sistema. Haciendo un rápido análisis se nota que satisfactoriamente se cumple con el mínimo de carga uniformemente distribuida de 63,1 kilogramos por centímetro cuadrado.

Tabla XLV. **Carga distribuida aplicada a cada sistema**

No.	Código	P (kg)	L (m)	W (kg/m)	W <sub>med</sub> (kg/m)	D/2 (m)	W (kg/m)	W <sub>min</sub> (kg/m)
1	JB - A1	225,00	3,00	200,00	114,32	0,70	163,31	63,10
2	JB - A2	101,25	3,00	90,00				
3	JB - A3	93,38	3,00	83,00				
4	JB - B1	135,00	3,00	120,00	98,80	0,70	141,14	
5	JB - B2	110,25	3,00	98,00				
6	JB - B3	92,25	3,00	82,00				
7	JB - C1	118,13	3,00	105,00	136,71	0,70	195,31	
8	JB - C2	175,50	3,00	156,00				
9	JB - C3	175,50	3,00	156,00				
10	JB - D1	191,25	3,00	170,00	114,09	0,70	162,99	
11	JB - D2	126,00	3,00	112,00				
12	JB - D3	87,75	3,00	78,00				

Fuente: elaboración propia.

Ya que existen posibles fuentes de fallas en el material o procedimientos de construcción no adecuados para poder establecer una separación adecuada entre vigas se propone utilizar un factor de seguridad igual a dos, y así estar cubiertos por cualquier caso fortuito tanto en el diseño como en irregularidades del material.

Atendiendo el factor de seguridad se puede invertir el procedimiento de cálculo y así obtener una separación óptima aproximada entre vigas de cada variación, en la tabla XLVI se dan los datos obtenidos con la ayuda de una hoja de cálculo.

Tabla XLVI. **Separaciones máximas aplicando F.S.**

No.	Código	L (m)	$W_{aplicada}$ (kg/m <sup>2</sup> )	$W_{min}$ (kg/m <sup>2</sup> )	F.S	$W_{efectiva}$ (kg/m <sup>2</sup> )	D/2 (m)	D máx. (m)
1	JB - A	3,00	114,32	63,10	2,00	81,66	0,91	1,82
2	JB - B		98,80			70,57	0,78	1,56
3	JB - C		136,71			97,65	1,08	2,16
4	JB - D		114,09			81,49	0,9	1,80

Fuente: elaboración propia.

## 6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO

### 6.1. Diseño de cordones

El análisis de los cordones que conforman cada una de las vigas consiste en la comparación de los esfuerzos actuantes en el material debido a la aplicación de carga contra los esfuerzos máximos resistentes del material.

- Cordón longitudinal inferior

Tabla XLVII. **Comparación de esfuerzos en cordón a tensión**

No.	Código	$\sigma$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{\text{mínimo}}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{\perp}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{\perp \text{mínimo}}$ (kg/cm <sup>2</sup> )
1	JB - A1	71,91	2 423,70	3,52	18,85
2	JB - A2	44,68		2,12	
3	JB - A3	37,84		1,94	
4	JB - B1	60,96		2,81	
5	JB - B2	48,73		2,27	
6	JB - B3	40,16		1,93	
7	JB - C1	34,45		2,44	
8	JB - C2	51,55		3,62	
9	JB - C3	51,35		3,64	
10	JB - D1	38,87		2,99	
11	JB - D2	29,24		2,16	
12	JB - D3	22,89		1,69	

Fuente: elaboración propia.

En la tabla XLVII se encuentran los valores de esfuerzo de tracción paralelo ( $\sigma$ ) y perpendicular a las fibras ( $\sigma_{\perp}$ ) inducidos en el elemento longitudinal inferior de cada viga, estos son comparados con los esfuerzos máximos que soportaría el material según la bibliografía consultada. Se puede ver claramente que ningún esfuerzo inducido al material sobrepasa el esfuerzo máximo resistente, por lo que se creería que no debiera fallar bajo la acción de estos esfuerzos.

- Cordón longitudinal superior

Tabla XLVIII. **Comparación de esfuerzos en cordón superior**

No.	Código	$f_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f'_{m_{\text{maximo}}}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$F_v$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f'_{v_{\text{maximo}}}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$F_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$F'_{c_{\text{maximo}}}$ (kg/cm <sup>2</sup> )
1	JB - A1	60,31	152,00	14,57	103,76	138,23	123,50
2	JB - A2	38,69		10,41		85,43	
3	JB - A3	32,27		8,42		85,25	
4	JB - B1	50,64		12,31		123,15	
5	JB - B2	41,70		10,91		91,07	
6	JB - B3	34,71		8,97		83,27	
7	JB - C1	29,84		10,54		110,90	
8	JB - C2	43,47		15,16		166,46	
9	JB - C3	45,33		15,97		164,84	
10	JB - D1	32,66		11,35		92,79	
11	JB - D2	26,84		9,76		100,52	
12	JB - D3	19,96		7,22		69,25	

Fuente: elaboración propia.

En la tabla XLVIII se encuentran los valores de esfuerzo de flexión ( $f_m$ ), cortante paralelo a las fibras ( $F_v$ ) y de compresión perpendicular a las fibras ( $F_c$ ) en ese orden, inducidos en el elemento longitudinal superior de cada viga.

Fueron comparados con los esfuerzos máximos que soportaría el material, según la bibliografía, de datos obtenidos en laboratorios para estas especies analizadas, se evidencia que únicamente el esfuerzo de compresión perpendicular a las fibras inducido al material sobrepasa el esfuerzo máximo resistente en las vigas JB - A1, JB - C2 y JB - C3, en el resto de esfuerzos no se detecta ningún problema.

- Cordón diagonal

Tabla XLIX. **Comparación de esfuerzos en cordón diagonal**

No.	Código	Ss (kg/cm <sup>2</sup> )	Ss' (kg/cm <sup>2</sup> )
1	JB - A1	34,69	112,4
2	JB - A2	18,86	
3	JB - A3	16,94	
4	JB - B1	24,89	
5	JB - B2	20,40	
6	JB - B3	17,01	
7	JB - C1	18,45	
8	JB - C2	27,59	
9	JB - C3	27,64	
10	JB - D1	29,48	
11	JB - D2	18,78	
12	JB - D3	13,40	

Fuente: elaboración propia.

En la tabla XLIX se encuentran los valores de esfuerzo de desgarre inducidos en el elemento diagonal que recibirá mayor esfuerzo de corte de cada viga, estos son comparados con el valor de esfuerzo máximo que soportaría el material según la bibliografía consultada. Es notable que ninguno sobrepasó el esfuerzo máximo resistente, por lo que se creería que no debiera fallar por la acción de este esfuerzo.

## **6.2. Fallas presentadas en cada viga**

Tanto las fallas suscitadas en las vigas ensayadas individualmente como las que fueron parte de sistemas, fueron estudiadas con la finalidad de establecer un potencial patrón de comportamiento de ellas, y así emitir recomendaciones de gran utilidad para eficiencia en la aplicación de este método constructivo y mejoras al mismo, con la finalidad de elevar su resistencia de carga. Para ilustrar de mejor forma la falla, que se presentó en cada viga, se muestran fotografías tomadas de las que se consideran más relevantes.

- Ensayos individuales

Se ensayaron cuatro vigas, identificadas con los siguientes códigos: JB – A1, JB –B1, JB – C1 y JB – D1, se obtuvo gran cantidad de datos de ellas, fue posible aplicarles carga hasta llevarlas a la falla, pues se necesitaba establecer un ritmo adecuado de ensayo, únicamente se efectúan las lecturas de carga aplicada y deflexión de ella, sin considerar la flecha máxima permisible pues se pretendió tener la mayor cantidad de datos para luego aplicarlos de correcta forma al diseño de sistemas a ensayar.

- JB – A1

Al momento de la falla, la viga estuvo bajo la acción de carga-descarga por cuatro ocasiones en el mismo ensayo, al presentarse la ruptura, la deflexión registrada al centro de la viga fue de 47,57 milímetros, con una carga aplicada de 361.20 kg/m, en la figura 58 se observa como en uno de los extremos de la viga, el cordón inferior sufrió un desprendimiento en el material, a esto se le conoce como falla por tracción perpendicular a las fibras, la cual se detuvo en cierta medida por la existencia de un nudo en el extremo de este.

Figura 58. **Falla por tracción perpendicular en JB – A1**



Fuente: Sección de Materiales Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

El colapso ocurrió en uno de los extremos inferiores de la viga y se esperaba que el punto crítico fuera al centro de esta, donde se presentaron las deflexiones mayores o bien en los cordones diagonales. Es notable que el valor de cortante máximo, apareció desde un extremo hasta el punto de apoyo de la fuerza aplicada, en ambos lados de la viga, por lo que se concluye que, debido a la flexión conjunta de la viga, el valor de corte excedió el valor resistente del material.

- JB – B1

Al presentarse la falla, la deflexión registrada al centro de la viga fue de 44,29 milímetros, con una carga aplicada de 248,32 kilogramos por metro, en la figura 59 se observa como en uno de los extremos de la viga, el cordón inferior sufrió un desprendimiento en el material, a esto se le conoce como falla por tracción perpendicular a las fibras, esta vez no existía nudo al final de este por lo que la abertura fue completa, caso contrario de la viga JB – A1, lo que se tomará en cuenta para las recomendaciones.

Figura 59. **Falla por tracción perpendicular en JB – B1**



Fuente: Sección de Materiales Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

De igual forma que la viga JB –A1 el colapso ocurrió en uno de los extremos inferiores de la viga, por lo que de nueva cuenta la conclusión es que, debido a la flexión inducida a la viga, esta falló, ya que el valor de corte aplicado, excedió el valor resistente del material.

- JB – C1

Al presentarse la falla, la deflexión registrada al centro de la viga fue de 48,98 milímetros, con una carga aplicada de 203,17 kilogramos por metro, en la figura 60 se observa como uno de los cordones diagonales fue tensionado hacia arriba hasta que el perno de bambú logro arrancar el material en el extremo de dicho cordón, a esto se le conoce como falla por desgarre en el material, además, en la figura 61 se observa que justo a un tercio de la viga en su cordón inferior ocurrió una falla por tracción perpendicular a las fibras.

Figura 60. **Falla por desgarre en JB – C1**



Fuente: Sección de Materiales Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 61. **Falla por tracción perpendicular en JB – C1**



Fuente: Sección de Materiales Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

- JB – D1

Al presentarse la falla, la deflexión registrada al centro de la viga fue de 29.53 mm, con una carga aplicada de 270.90 kg/m, en la figura 62 se observa como en uno de los extremos de la viga, el cordón inferior sufrió un desprendimiento en el material, a esto se le conoce como falla por tracción perpendicular a las fibras, al igual que la viga JB – A1 al final del extremo fallado existía un nudo del bambú por lo que la falla no fue completamente abierta como en dicha viga.

También, de igual forma que la viga JB –A1 y JB – B1 el colapso ocurrió en uno de los extremos inferiores de la viga, por lo que de nueva cuenta concluye que, debido a la flexión inducida a la viga, el valor de corte aplicado excedió el valor resistente del material.

Figura 62. **Falla por tracción perpendicular en JB – D1**



Fuente: Sección de Materiales Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Ensayos a sistema de dos vigas

En los sistemas se propuso, y ensayó, a una distancia de un metro con cuarenta centímetros de separación entre cada una de las vigas, las fallas en algunos casos se presentaron en ambas vigas del sistema y en otros solamente en una.

- Sistema 1

Se realizó con las vigas JB – A, utilizando JB – A2 y JB – A3, una vez aplicada la carga inicial, se presentó una falla imprevista la cual provocó el colapso total en la viga JB – A2 y múltiples grietas en JB – A3 como se muestra en la figura 63, por lo que no fue posible recolectar los datos de descarga del sistema y carga de falla controlada.

Figura 63. **Aplastamiento y tensión perpendicular en sistema 1**



Fuente: Sección de Materiales Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

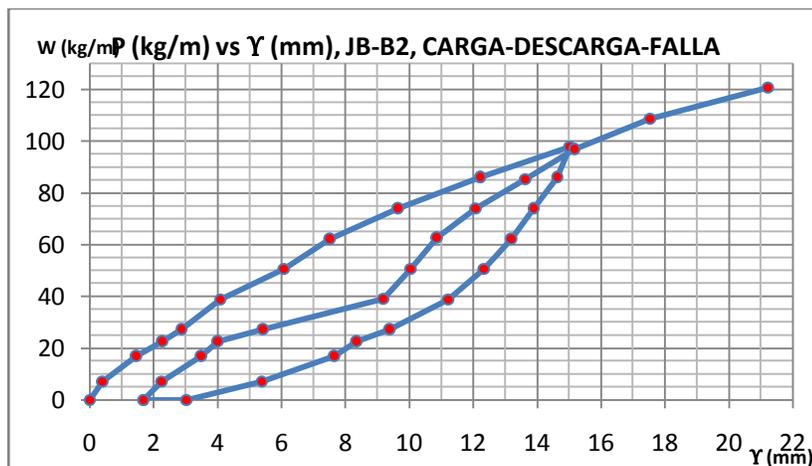
Cuando se analizaron las vigas a mayor detalle se logró establecer que esta presentaba un grado no detectado de pudrición debido al ataque de insectos y humedad, lo que provocó el debilitamiento en la viga JB – A2.

La viga mencionada colapsó de forma abrupta, además de lo anterior en este sistema se aplicó carga colocando por cada lectura de deflexión una cantidad de 8 cilindros de concreto es decir un promedio de 100 kilogramos por vez. Se analiza que la velocidad rápida de carga y el debilitamiento por pudrición provocaron el colapso total, con lo que en los ensayos posteriores se disminuyó a la mitad dicho valor de carga, dando lugar a que el sistema pueda asimilar de mejor manera las deflexiones.

- Sistema 2

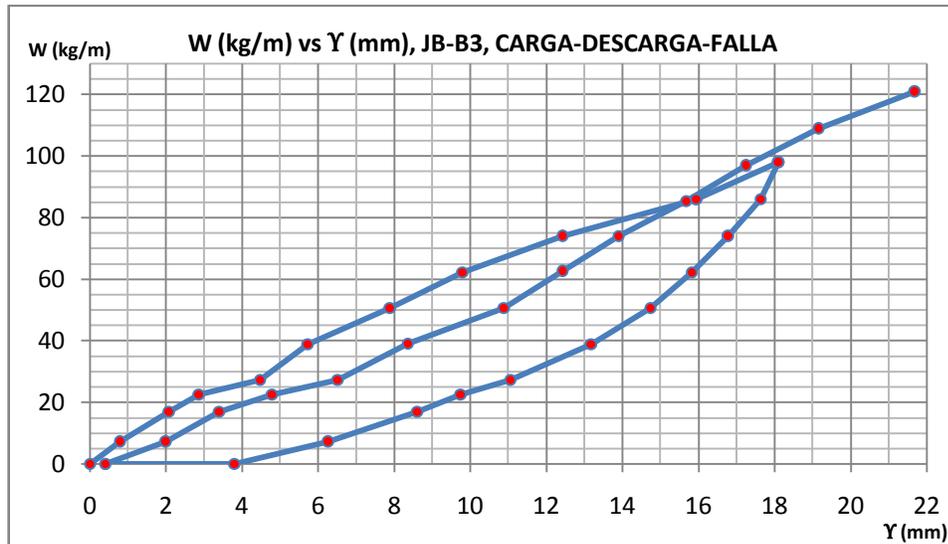
Se realizó con las vigas JB – B, utilizando JB – B2 y JB – B3, disminuyendo la velocidad de carga a únicamente cuatro cilindros por aplicación se logró que el ensayo fuera mucho más aprovechable que en el sistema número uno, pues fue exitosa la aplicación de carga-descarga-carga a falla, en las graficas 64 y 65 se muestra la secuencia total del comportamiento de las vigas ante esta acción.

Figura 64. **Gráfica de comportamiento de JB – B2**



Fuente: elaboración propia.

Figura 65. Gráfica de comportamiento de JB – B3



Fuente: elaboración propia.

Analizando las gráficas es notable que este sistema se comporta de una forma uniforme en todos sus elementos, pues cada una de las vigas sufrió aproximadamente la misma deflexión al momento de la falla, únicamente la viga JB – B3 presenta un valor mayor alcanzado, en la carga inicial, pero en la recuperación posterior logró hacerlo casi por completo mientras que la JB – B2 tuvo una deflexión remanente mayor.

La falla principal fue de aplastamiento en los cordones superiores de cada viga, llamado compresión perpendicular a las fibras, como se muestra en la figura 66, la viga que sufrió mayor daño fue, JB – B3, este tipo de fallo generalmente se da por cargas puntuales sobre el elemento, lo recomendable es rellenar con mortero o algún otro material liviano para poder soportar estas cargas.

Figura 66. **Falla por compresión perpendicular en sistema 2**



Fuente: Sección de Materiales Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Además, apareció otro tipo de fallas en este sistema, en la figura 67 se muestran, una de ellas ocurrió desgarrando el material entre el cordón diagonal y el perno, en otra sección de la viga se dieron agrietamientos por tracción perpendicular en los nudos, las cuales aparecieron hasta después de que el material había fallado por aplastamiento.

Figura 67. **Falla por desgarre y tracción perpendicular en JB – B**

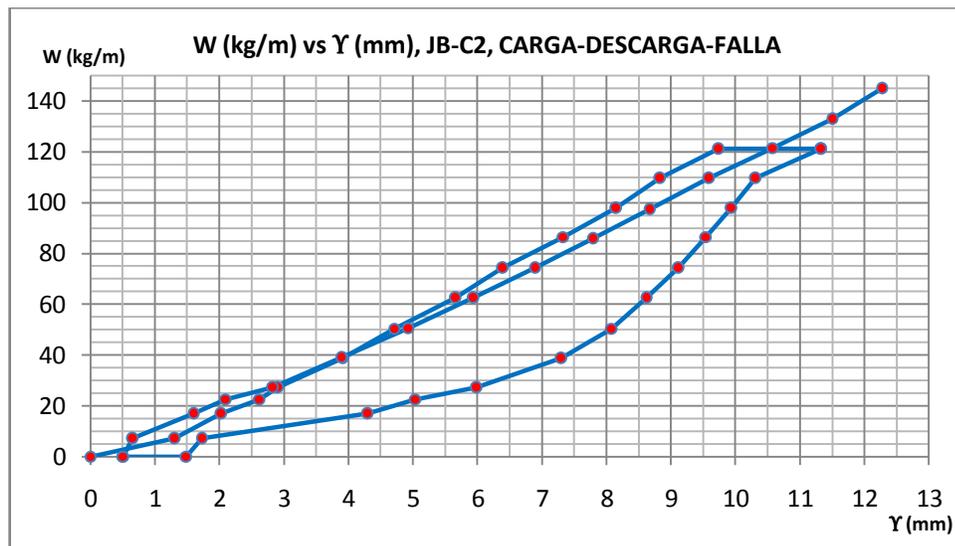


Fuente: Sección de Materiales Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Sistema 3

Se realizó con las vigas nombradas como JB – C y utilizando JB – C2 y JB –C3, la velocidad de carga fue de cuatro cilindros por aplicación y fue exitosa la aplicación de carga-descarga-carga a falla, en las figuras 68 y 69, se muestra la secuencia total del comportamiento de las vigas ante esta acción.

Figura 68. **Gráfica de comportamiento de JB – C2**

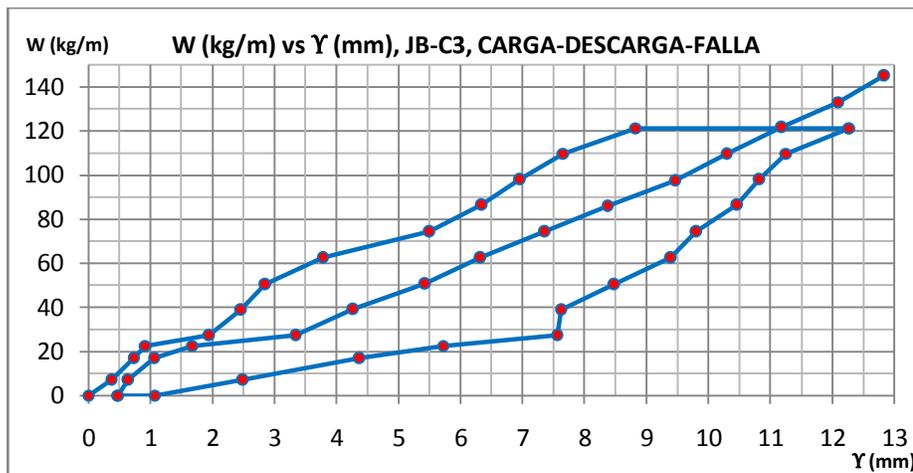


Fuente: elaboración propia.

Se puede observar, que en este elemento al momento de la descarga, se mantuvo cierta deflexión remanente; de medio milímetro en ambas vigas, lo que prácticamente es despreciable, lo curioso de estos elementos es que la falla se alcanzó aun antes de sufrir la deflexión máxima, no como ocurriría en un material elástico como lo es el bambú.

La falla se presenta como ya se mencionó, antes de que las vigas alcanzaran su deflexión máxima permisible de 15 milímetros. El modo de falla esta vez se dio en una sola viga, en JB – C3, y fue principalmente por tensión perpendicular a las fibras como se ve en la figura 70 el bambú en el cordón longitudinal inferior, sufrió una abertura completa del material, esto debido a que no existía un nudo que la evitara o detuviera en cierta medida.

Figura 69. **Gráfica de comportamiento de JB – C3**



Fuente: elaboración propia.

Además, uno de los cordones diagonales de JB – C2, falló por cortante paralelo a las fibras que hizo una grieta a lo largo de casi todo el cordón y además, en la parte intermedia del triángulo del cual era parte este diagonal fallado, se presentó una flexión diferencial que causó que el material se separara en ese punto, como se puede observar en la figura 71.

Figura 70. **Falla por tensión perpendicular en JB – C3**



Fuente: Sección de Materiales Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 71. **Fallas secundarias en sistema 3**

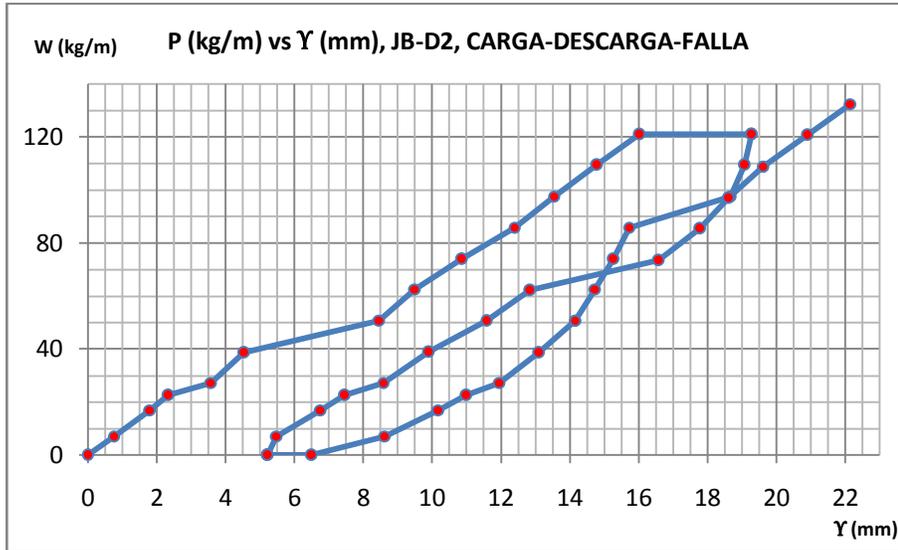


Fuente: Sección de Materiales Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

○ Sistema 4

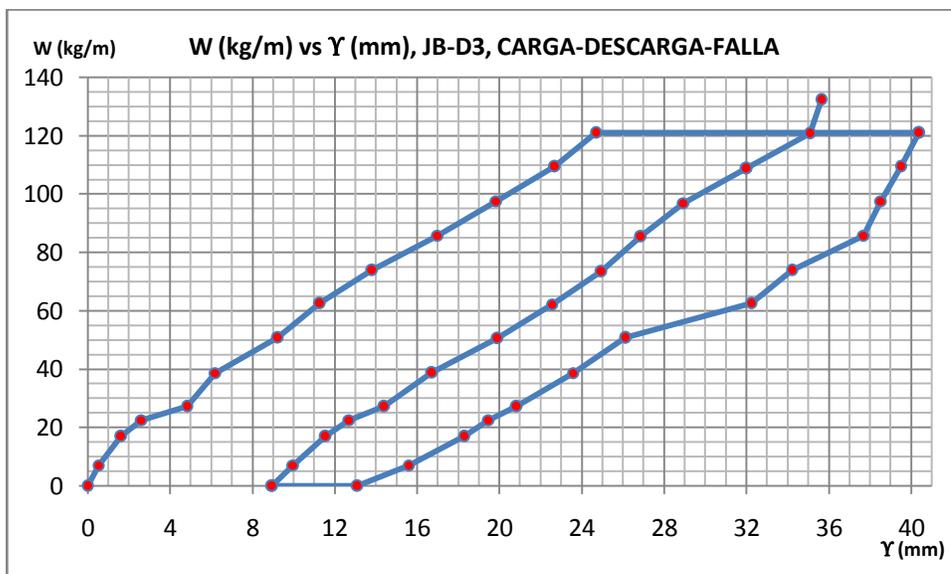
Se realizó con las vigas nombradas como JB – D y utilizando a JB – D2 y JB – D3, la velocidad de carga fue de cuatro cilindros por aplicación, fue exitosa la aplicación de carga-descarga-carga a falla, en las figuras 72 y 73, se muestra la secuencia total del comportamiento de las vigas ante esta acción.

Figura 72. Gráfica de comportamiento de JB – D2



Fuente: elaboración propia.

Figura 73. Gráfica de comportamiento de JB – D3



Fuente: elaboración propia.

La deflexión remanente en este sistema fue mayor, como también las máximas alcanzadas por el mismo; esto debido a la forma de falla que se presentó, pues el primer cordón diagonal de la viga JB – D3 cercano al apoyo, sufrió un desgarre en el anclaje, lo que provocó que las flechas fueran excesivas, como se observa en la gráfica de comportamiento de la figura 73 de esta viga. En la figura 74 se observa cómo el desgarre mencionado provocó que la viga dejara de trabajar adecuadamente.

Figura 74. **Falla por desgarre en JB – D3 sistema 3**



Fuente: Sección de Materiales Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Tomando en cuenta todas las fallas dadas y analizando los esfuerzos que fueron aplicados, es notable que las fallas no fueron inducidas por los mismos, sino por desperfectos en el material, es decir por pudriciones no detectadas, debilitamiento de sección por insectos, u otras no contempladas. Hay que recordar que el bambú es un material que no puede ser estandarizado por su misma naturaleza y es necesario tener en cuenta factores de seguridad necesarios que cubran esta particularidad del material.

### 6.3. Análisis de separación entre vigas

Con las fallas que se presentaron durante los ensayos, se hace necesario tomar las precauciones debidas, para evitar posibles accidentes, por ello se optó por utilizar un factor de seguridad igual a dos, es decir disminuir al 50 por ciento el ancho efectivo al que podría trabajar el sistema con el fin de evitar cualquier fortuito cuando el sistema esté en uso. Para cada tipo de vigas la separación adecuada sería las que se presentan en la tabla L.

Tabla L. Separación máxima de sistema de *joist*

No.	Código	D <sub>max</sub> (m)
1	JB - A	1,82
2	JB - B	1,56
3	JB - C	2,16
4	JB - D	1,80

Fuente: elaboración propia.

Dentro de las cuatro variaciones diseñadas y ensayadas, la más efectiva para trabajar es; JB – C, que podría utilizarse con separación de hasta 2,15 m aproximadamente, la cual consta con un peralte de 15 por ciento de la luz efectiva del vano, con método de anclaje de bambú de media pulgada de diámetro.

#### 6.4. Método de anclaje

Los anclajes utilizados cumplieron satisfactoriamente su cometido, pues luego de los ensayos no se encontró ningún elemento destruido por la aplicación de esfuerzos sobre el mismo.

Los anclajes utilizados son:

- Utilizando perno de acero tipo esparrago como se observa en la figura 75, con un diámetro de un cuarto de pulgada, colocándole a cada extremo de este, una roldana de apriete y su respectiva tuerca.

Figura 75. **Perno de acero utilizado**



Fuente: Sección de Materiales Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Utilizando perno tipo bolillo fabricado manualmente a partir de tiras de bambú como se muestra en la figura 76, con un diámetro de media pulgada aproximadamente. A este anclaje no será necesario colocarle tuerca, ya que al ser el mismo material utilizado para las vigas este se fija de mejor manera.

Figura 76. **Perno de bambú torneado**



Fuente: Sección de Materiales Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Según observaciones realizadas, se puede concluir que el mejor método de anclaje es el perno de bambú, ya que presenta una mejor trabajabilidad al ajustarse firmemente a las vigas, pues no será un material extraño para el resto de ella, su costo es mucho menor en comparación al acero, la desventaja sería únicamente que podría presentar defectos en el material y al hacerlo en volúmenes grandes, la elaboración artesanal se hace dificultosa.

## **7. GUÍA PARA LA FABRICACIÓN DE VIGAS *JOIST* UTILIZANDO BAMBÚ COMO MATERIA PRIMA**

Con el objetivo que, cualquier persona o comunidad que cuente con la materia prima y las herramientas necesarias para la aplicación de este método, se elaboró una guía de fácil entendimiento para el lector y poder así, paso a paso comprender el método con que fueron construidas las vigas *joist* utilizando bambú. Cabe mencionar que lo presentado en esta guía, no es el único método de fabricación, pero para poder utilizar los datos y cálculos presentados anteriormente es necesario fabricarlas como aquí se recomienda.

### **7.1. Preliminares**

Antes de iniciar cualquier actividad referente a la construcción o diseño de los elementos es necesario tomar en cuenta la herramienta y equipo indispensable que se necesita para la elaboración de los mismos, con esto cubierto se deben seguir las recomendaciones que se dan en el numeral cuatro donde se dan las recomendaciones y características que debe tener un bambú para ser considerado estructuralmente apto.

- Herramienta y equipo necesario

El equipo necesario para la elaboración de las vigas *joist* fabricadas con bambú es el siguiente:

- Sierra ingletadora

Esta como se ve en la figura 77 , consiste en una sierra circular instalada en un marco de fábrica con sus protecciones respectivas, la cual puede ser ajustada a diferentes ángulos de corte, en cualquier dirección; tanto vertical como horizontal, esta será utilizada para realizar todos los cortes para los cordones longitudinales como diagonales.

Figura 77. **Sierra ingletadora**



Fuente: Sección de Materiales Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Barreno de pedestal

Como cualquier otro barreno sirve para perforar agujeros en el material elegido, cuenta con un mandril para sujetar las brocas, cualquiera que sea el tipo, en la figura 78, se puede observar que además cuenta con un tablero de soporte metálico el cual puede ser inclinado según sea el ángulo al que se necesite hacer la perforación.

Figura 78. Barreno de pedestal



Fuente: Sección de Materiales Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Herramienta común

Figura 79. Herramienta usada



Fuente: Sección de Materiales Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Dentro de la herramienta necesaria, como se muestra en la figura 79, se encuentra: martillo, metro, tiralíneas, sierra de mano, barreno de mano, broca sierra, mandril para broca sierra, vernier, sargentos de apriete rápido, sargentos de tornillo, cepillo para madera, cangrejo, brocas de paleta de 12 pulgadas y perno de un cuarto de pulgada.

## 7.2. Selección de materia prima

Es necesario hacer una selección de la materia prima a utilizar atendiendo lo que establece el numeral cuatro de esta investigación. Lo ideal es colocar todas los culmos de bambú sobre un espacio amplio, como se muestra en la figura 80, para realizar todas las observaciones indispensables, por ejemplo: que en el bambú no se encuentre con perforación por insectos, no tenga pudrición, los culmos de bambú sean lo suficientemente rectos para que no afecte su curvatura. Además de lo anterior, la selección incluye la medida de los diámetros exteriores, interiores y espesores de pared de cada uno como se observa en la figura 81, y así seleccionar los más aptos para la construcción de vigas *joist* con lo recomendado anteriormente.

Figura 80. **Materia prima para elaboración de vigas**



Fuente: Sección de Materiales Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 81. **Medidas realizadas en la selección del bambú**



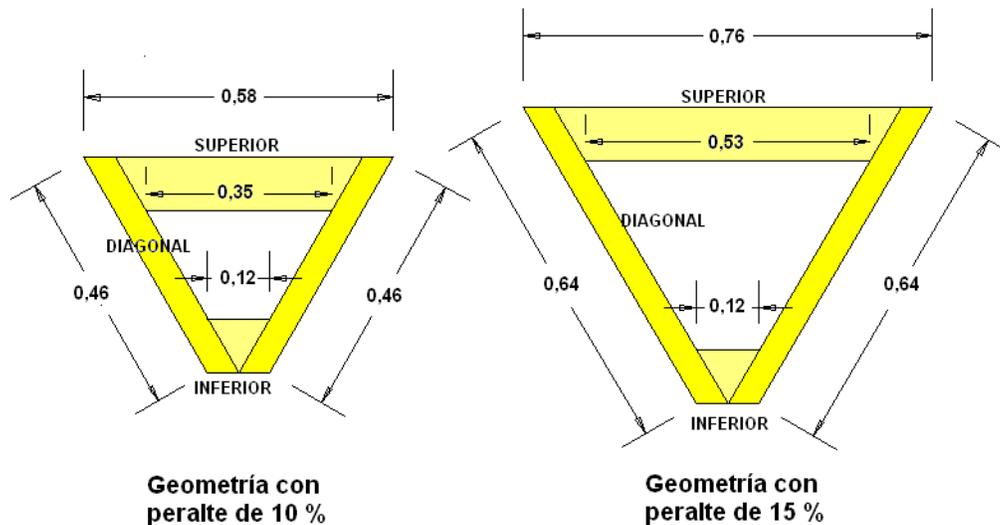
Fuente: Sección de Materiales Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Geometría básica

Para establecer correctamente el espacio necesario requerido para la construcción de una viga utilizando bambú, se tomó muy en cuenta el diámetro de los elementos a utilizar, pues este no puede ser despreciado, en la figura 82 se muestran los triángulos que se formarían si se idealizan los elementos a utilizar de la siguiente manera: cordón superior e inferior con un diámetro exterior promedio de 10 centímetros, y el cordón diagonal con un diámetro exterior promedio de 5 centímetros, utilizando estas distancias será posible cerrar correctamente los triángulos para hacer la viga lo más rígida y estable.

Si se utiliza de buena forma la geometría cuando se diseñan los elementos se facilitará en gran manera la construcción, pues esta podrá llevarse a cabo por medio de una secuencia rutinaria, que hará un trabajo mucho más eficiente y rápido, además con esta geometría tendremos la distancia total necesaria para cada triángulo.

Figura 82. **Geometría necesaria para triangulación de *joist***



Fuente: elaboración propia, con programa Auto Cad 2010.

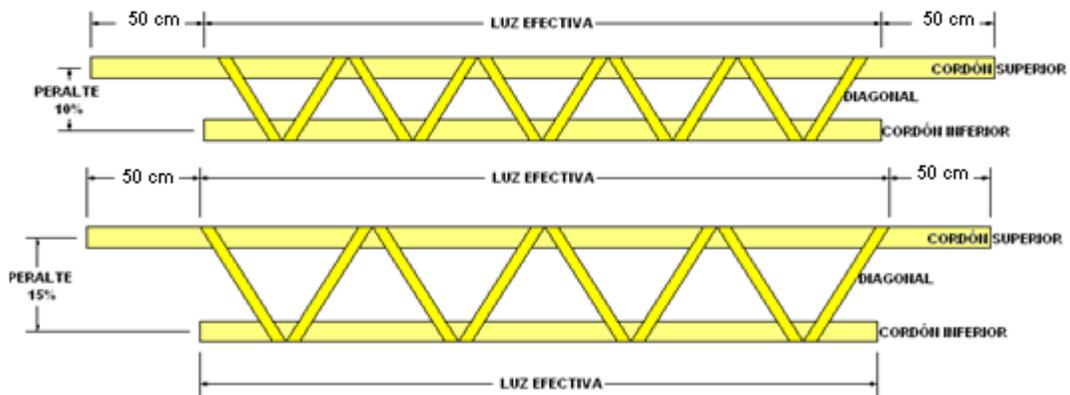
Los triángulos mostrados en la figura 82 obedecen a la longitud de vano utilizado para el diseño de las vigas ensayadas en esta investigación, es decir tres metros, conociendo estas medidas geométricas, en la construcción podrá jugarse con estas, para hacer simétrica la viga. Para poder cubrir distancias diferentes a las estudiadas en esta investigación, es necesario construir dibujos de triángulos dependiendo el peralte que se necesite utilizar. Para establecer el número de estos que podrán colocarse y no perder la simetría total de la viga.

- Corte de cordones longitudinales

Para proceder a la perforación de los cordones y luego de seleccionar cuales serán utilizados para estos, es necesario realizar el corte de cada uno dependiendo de la luz efectiva que se necesite cubrir. Para el cordón longitudinal inferior bastó cortar los elementos exactamente igual en longitud que la del vano.

Para el cordón longitudinal superior, debido a que estos van apoyados, lo recomendable es cortarlos a la longitud del vano más un metro, es decir 50 centímetros de apoyo a cada lado, como se observa en la figura 83.

Figura 83. **Simetría de vigas utilizando bambú**



Fuente: elaboración propia, con programa Auto Cad 2010.

Figura 84. **Corte adecuado de culmos de bambú**



Fuente: Sección de Materiales Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Para realizar el corte de los elementos de bambú se debe tomar todas las precauciones necesarias de seguridad para el uso de las sierras, indispensablemente: lentes protectores, guantes de cuero que no impidan la movilidad en las manos, playera o camisa manga larga para evitar alergias debido al bambú y zapatos con punta de acero, como se observa en la figura 84, esta es la forma correcta de realizar el corte de los culmos de bambú.

### **7.3. Cordón superior**

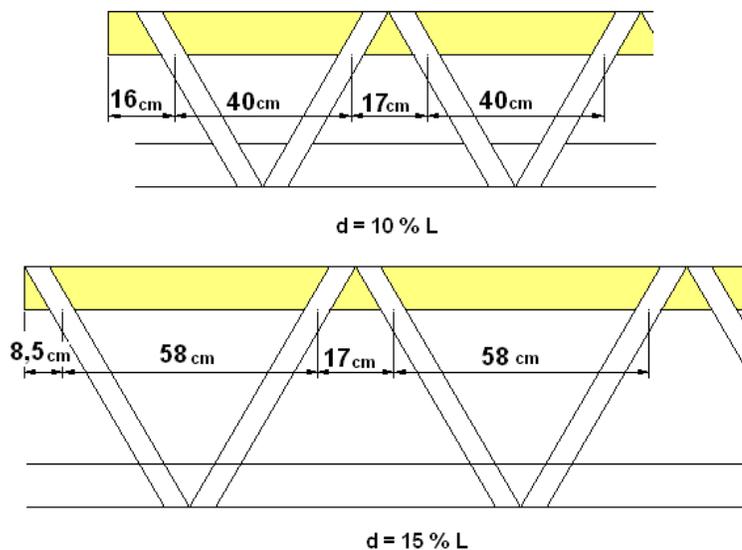
Como primer paso se debe medir cuidadosamente la distancia de los entrenudos, esto es quizá la parte más importante, porque si no se tiene pleno conocimiento de las distancias a las que se va a perforar cada uno de los agujeros, puede suceder que alguno de ellos sea interrumpido por un nudo, y eso sería inaceptable, pues son los que le dan estabilidad y resistencia a el bambú como tal y no podrán ser perforados debilitando la estructura. A continuación se enlista la secuencia de pasos necesarios para la elaboración de este cordón:

- a) Para evitar que pase lo anteriormente descrito, lo ideal es tomar una cinta o lazo de la misma longitud o más largo que la luz del vano a diseñar, previamente se deben hacer los cálculos matemáticos necesarios para conocer las distancias requeridas de los agujeros, con estas distancias bien establecidas se puede realizar un pequeño nudo en el lazo, para luego hacer coincidir todos los nudos con el culmo de bambú y así queden todos dentro del entrenudo.

Cuando se diseña para un vano de tres metros las distancias necesarias se mostraron en la figura 82, los datos importantes a tomar son las medidas de la parte interna en el triángulo.

Cuando se usa peralte de 10 por ciento de la luz, las medidas básicas para la perforación se muestran en la figura 85, siendo:  $L = 16 \text{ cm} + 40 \text{ cm} + 17 \text{ cm} + 40 \text{ cm} + 17 \text{ cm} + 40 \text{ cm} + 17 \text{ cm} + 40 \text{ cm} + 16 \text{ cm} = 300 \text{ cm} = 3 \text{ m}$ . Cuando se usa peralte de 15 por ciento de la luz, las medidas básicas para la perforación se muestran en la figura 85, siendo:  $L = 8,5 \text{ cm} + 58 \text{ cm} + 17 \text{ cm} + 58 \text{ cm} + 17 \text{ cm} + 58 \text{ cm} + 8,5 \text{ cm} = 300 \text{ cm} = 3 \text{ m}$

Figura 85. **Medidas para perforación de cordón superior**



Fuente: elaboración propia, con programa Auto Cad 2010.

Estas medidas, son validas únicamente cuando se diseña con un vano de tres metros de longitud. Y el peralte con 10 por ciento es: 30 centímetros y con 15 por ciento es: 45 centímetros, es indispensable que a la primera medida en cada uno de los peraltes, en el cordón superior, se le sume también la longitud necesaria para el apoyo, es decir las medidas iniciales en lugar de ser 16 centímetros y 8.5 centímetros, son ellas mismas, más 50 centímetros.

- b) Una vez se logró seleccionar los culmos de bambú a utilizar que conjugan en los entrenudos perfectamente con las medidas necesarias, con el tiralíneas se debe marcar un eje longitudinal con el fin de que las perforaciones sean todas en el mismo plano. Con un sargento de apriete rápido se fija una punta del tiralíneas como se ve en la figura 86 y se extiende a lo largo del bambú en cuestión, luego se fija el otro extremo de la cuerda y se levanta la misma en el centro de ella, dejándola caer de golpe, para poder dejar una marca visible a lo largo del eje y finalmente marcar los puntos donde se va a perforar cada agujero.

Figura 86. **Marca en eje de culmo**



Fuente: Sección de Materiales Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

- c) Con las marcas realizadas se puede empezar la perforación, para ello es necesario preparar el barreno de pedestal, inclinando la mesa de este a 30 grados con la horizontal porque así el ángulo con la vertical; que será el de interés sea de 60 grados. Es necesario, para la óptima perforación y disminuir accidentes, que se construya un dispositivo que fije a la mesa de trabajo los culmos de bambú, este puede ser de diferentes formas, la que sea más efectiva, en esta investigación se diseñaron dos piezas de madera en forma de T como se muestra en la figura 87 que fueron muy efectivas en la sujeción.

Figura 87. **Método de sujeción de varas de bambú**



Fuente: Sección de Materiales Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

- d) Se coloca al mandril del barreno de pedestal, la broca-sierra del diámetro adecuado. Para seleccionarla, se miden las varas que a usar para los cordones diagonales, tomando el diámetro mayor de ellas con el fin de asegurarse que luego no exista problema en el ensamblaje de la viga. Si se desea ser más meticulosos, se puede realizar el corte de todas las piezas diagonales y establecer diámetros diferentes de broca-sierra según sea cada diagonal, pero este procedimiento es muy engorroso y conlleva demasiado tiempo.
  
- e) Con los culmos de bambú medidos, marcados y colocados a la pieza que las asegura al banco de trabajo en el barreno, se puede perforar los agujeros, para ello se necesita un previo análisis, debido a que no todos las perforaciones serán hacia la misma dirección, en el cordón superior se inicia con un agujero que va hacia el extremo más cercado de la vara, pero sería muy tedioso estar moviendo la mesa de trabajo en cada agujero que se haga, por lo que se procede de la siguiente forma:

- Se coloca el culmo de bambú con la mesa del barreno inclinada hacia una dirección fija, y se perforan únicamente los agujeros pares, es decir el número 2, 4, 6, 8, si se trabajó con peralte de 15 por ciento y 2, 4, 6, 8, 10 si se trabajó con peralte de 10 por ciento.
- Sin mover la mesa del lugar, se gira 360 grados horizontalmente el culmo de bambú y en la misma dirección se perforan los agujeros impares, es decir 1, 3, 5, 7 si se trabaja con peralte de 15 por ciento y 1, 3, 5, 7, 9 si se trabaja con peralte de 10 por ciento.

En la figura 88 se puede observar claramente la posición de las varas de bambú al momento de su perforación, y en la figura 89 se muestra como queda el elemento una vez perforados todos los agujeros.

**Figura 88. Perforación de cordón longitudinal**



Fuente: Sección de Materiales Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 89. **Vista de cordón longitudinal perforado**



Fuente: Sección de Materiales Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

- f) El último paso de la preparación de estos elementos, es limpiar todo aserrín o restos que puedan estorbar para el ensamble de los elementos.

#### **7.4. Cordón inferior**

Como primer paso se debe medir cuidadosamente la distancia de los entrenudos, esto es quizá la parte más importante, porque si no se tiene pleno conocimiento de las distancias a las que se va a perforar cada uno de los agujeros, puede suceder que alguno de ellos sea interrumpido por un nudo, y eso sería inaceptable, pues son los que le dan estabilidad y resistencia a el bambú como tal y no podrán ser perforados debilitando la estructura.

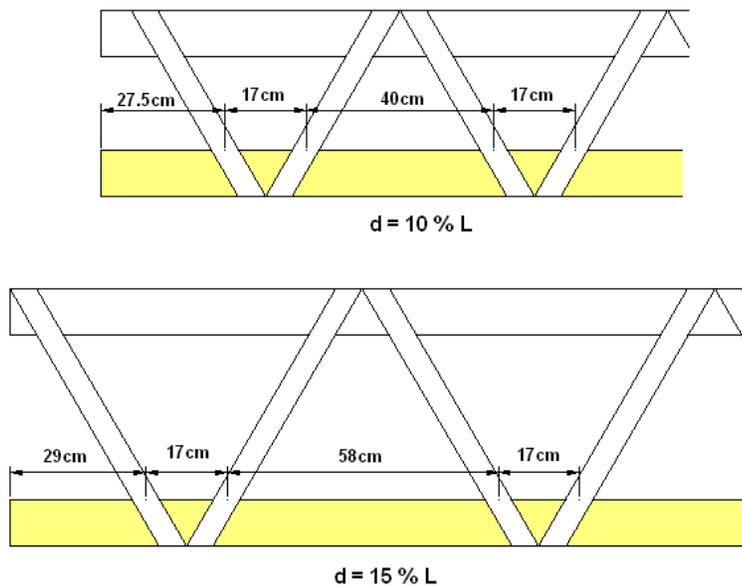
- a) Para evitar que pase lo anteriormente descrito, lo ideal es tomar una cinta o lazo de la misma longitud o más largo que la luz del vano a diseñar, previamente se deben hacer los cálculos matemáticos necesarios para conocer las distancias requeridas de los agujeros, con estas distancias bien establecidas se puede realizar un pequeño nudo en el lazo, para luego hacer coincidir todos los nudos con el culmo de bambú y así queden todos dentro del entrenudo.

Cuando se diseña para un vano de tres metros las distancias necesarias se mostraron en la figura 82, los datos importantes a tomar son las medidas de la parte interna en el triángulo.

Cuando se usa peralte de 10 por ciento de la luz, las medidas básicas para la perforación se muestran en la figura 90, siendo:  $L = 27,5 \text{ cm} + 17 \text{ cm} + 40 \text{ cm} + 17 \text{ cm} + 40 \text{ cm} + 17 \text{ cm} + 40 \text{ cm} + 17 \text{ cm} + 27,5 \text{ cm} = 300 \text{ cm} = 3 \text{ m}$

Cuando se usa peralte de 15 por ciento de la luz, las medidas básicas para la perforación se muestran en la figura 90, siendo:  $L = 29 \text{ cm} + 17 \text{ cm} + 58 \text{ cm} + 17 \text{ cm} + 58 \text{ cm} + 17 \text{ cm} + 58 \text{ cm} + 17 \text{ cm} + 29 \text{ cm} = 300 \text{ cm} = 3 \text{ m}$

Figura 90. **Medidas para perforación de cordón inferior**



Fuente: elaboración propia, con programa Auto Cad 2010.

Estas medidas son validas únicamente cuando se diseña con un vano de tres metros de longitud efectiva. Cuando el peralte con 10 por ciento es igual a 30 centímetros y el peralte con 15 por ciento es igual a 45 centímetros.

Tanto el cordón inferior como el superior, para elaborarlos comparten muchas similitudes, luego de tener las medidas del paso a), se repiten los pasos b), c), d) realizados para el cordón superior, mostrados en las páginas 166 y 167.

- e) Con los culmos de bambú medidos, marcados y colocados a la pieza que los asegura al banco de trabajo en el barreno, se puede perforar los agujeros, para ello se necesita un previo análisis, debido a que no todos los agujeros serán hacia la misma dirección, en este cordón se inicia con un agujero que va hacia el extremo más alejado de la vara, pero sería muy tedioso estar moviendo la mesa de trabajo en cada agujero que se haga, por lo que se procede de la siguiente forma:
  - Se coloca el culmo de bambú con la mesa del barreno inclinada hacia una dirección fija, y se perforan únicamente los agujeros impares, es decir el 1, 3, 5, 7, si se trabaja con peralte de 15 por ciento y 1, 3, 5, 7, 9 si se trabaja con peralte de 10 por ciento.
  - Sin mover la mesa del lugar, se gira 360 grados horizontalmente el culmo de bambú y en la misma dirección se perforan los agujeros impares, es decir 2, 4, 6, 8 si se trabaja con peralte de 15 por ciento y 2, 4, 6, 8, 10 si se trabaja con peralte de 10 por ciento.

Figura 91. **Elemento longitudinal perforado**



Fuente: Sección de Materiales Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

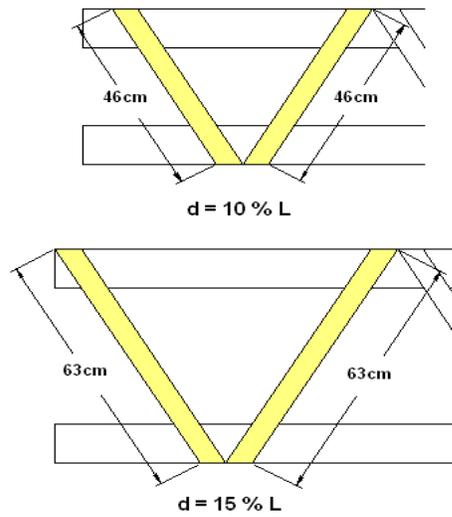
- f) El último paso de la preparación de estos elementos es limpiar todo aserrín o restos que puedan estorbar para el ensamble de todos los elementos, en la figura 91 se puede observar cómo debe quedar el elemento longitudinal cuando se ha perforado de manera correcta.

### **7.5. Elementos de corte**

La fabricación de estos elementos se puede hacer seguido de la selección del materia a utilizar, y no necesariamente antes o después de la elaboración de los cordones longitudinales, la parte más importante es el análisis de la geometría a utilizar, pues de aquí se obtendrá la longitud aproximada de cada una de las diagonales como se puede ver en la figura 92.

El corte se hace con la sierra ingletadora, esta puede hacer cortes de forma angulada, como se mostró en la figura 77, según se necesite, para este caso el ángulo a utilizar es de 30 grados con respecto a la horizontal, en la figura 93 se muestra la forma correcta en que debe quedar el corte al elemento diagonal. Se cortan los extremos de este en ángulo para que al ensamblarse con los elementos longitudinales pueda unirse internamente al triángulo tan necesario para rigidizar la estructura.

Figura 92. **Medidas para cordones diagonales**



Fuente: elaboración propia, con programa Auto Cad 2010.

Figura 93. **Elemento diagonal**



Fuente: Sección de Materiales Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Parte importante al cortar los elementos diagonales es no atravesar ningún nudo para no debilitar el material, además inspeccionar cada uno de los elementos a colocar observando que no presenten defectos internamente, que puedan ser factor de falla al momento de estar la estructura en servicio, de encontrarse estos defectos el elemento debe ser desechado y separado del resto.

## **7.6. Uniones y anclajes**

- Ensamble de elementos

Con todos los elementos a utilizar perforados y cortados, se procede a ensamblar los cordones longitudinales a los diagonales. Dependiendo de la viga que se construirá, por ejemplo una cuyo peralte es del 10 por ciento de la luz efectiva, se debe utilizar, un cordón superior y uno inferior que estén perforados como se indica para cada uno de ellos, junto a estos se necesitan 10 elementos diagonales cortados específicamente para el peralte en cuestión. La mejor forma de unirlos, es colocar todos los diagonales dentro de cualquier longitudinal sea superior o inferior recostados en el suelo, seguido de esto colocar el cordón faltante en posición e ir introduciendo los diagonales en su respectivo agujero.

Este paso no llevará más de 5 minutos por viga, cuando se logre el ensamble de los elementos, se deberá tener cuidado al manipular la viga, para que esta no se desarme; puesto que aun no está pernada, la solución más sencilla es amarrar en los extremos un lazo uniendo los dos elementos longitudinales, para que sirva de sujeción hasta que se realicen los anclajes respectivos.

- Anclajes

Se proponen dos métodos de anclaje para las vigas con el fin de evaluar cual genera mejores resultados en todos los aspectos, por medio de perno utilizando tornillo sin fin de diámetro igual a un cuarto de pulgada, el segundo fue elaborado artesanalmente, utilizando el mismo bambú, logrando aproximadamente diámetros de media pulgada.

- Anclaje con acero

Este método es bastante sencillo de utilizar, únicamente consiste en la obtención; en cualquier ferretería del tornillo sin fin de diámetro requerido, el cual tiene un precio bajo; alrededor de tres quetzales el metro lineal, dos roldanas y dos tuercas para el perno, cortarlo es bastante sencillo con la práctica adecuada, para ello basta con una sierra para metal de marco como la que se muestra en la figura 94.

Figura 94. **Corte de perno metálico**



Fuente: Sección de Materiales Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Para conocer la longitud necesaria para cada perno, bastará con tomar la medida del diámetro exterior de los cordones longitudinales y agregarle dos centímetros, esto se hace para colocar la roldana y la tuerca de sujeción, en la figura 94 se muestra el dispositivo de sencilla elaboración utilizado para poder cortar el perno y darle la misma longitud a cada uno agilizando este proceso.

Figura 95. **Perforación y colocación de pernos metálicos**



Fuente: Sección de Materiales Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Luego se sujeta la viga con sargentos de apriete rápido, para ajustar firmemente y conseguir que se cierre la geometría en cada uno de los triángulos; en la parte interna del bambú, luego al barreno de mano se le coloca una broca lo suficientemente larga para atravesar el bambú y del mismo diámetro que el perno.

Se perfora uno a uno los agujeros para los pernos atendiendo varias recomendaciones; una de ellas es que los agujeros atraviesen las dos piezas tanto longitudinal como diagonal, asimismo, el barreno debe estar lo más vertical posible y al momento de cortar el perno se debe dejar el corte limpio, pues un corte mal hecho evitará que la tuerca pueda ser colocada, en la figura 95 se muestra la forma correcta de fijar con sargento al momento de perforar y la manera de colocar el perno dentro del agujero realizado, sin quitar la sujeción hasta que esté instalado.

- Anclaje con bambú

Los pernos son elaborados manualmente a partir de tiras de bambú, dando la forma de bolillo con un cepillo para madera, este proceso necesita práctica en el uso de las herramientas de carpintería y el cuidado necesario para no sufrir algún accidente, en la figura 96 se muestra la forma de los elementos ya torneados para su posterior corte.

Figura 96. **Bolillo de bambú para perno**



Fuente: Sección de Materiales Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

La sujeción y perforación utilizando este método son exactamente iguales que en el anterior, la diferencia únicamente es que el perno se corta hasta que fue introducido en el agujero como se muestra en la figura 96, para facilitar el trabajo.

## CONCLUSIONES

1. De la recopilación bibliográfica, aunada a los datos experimentales; las especies que presentan mayor ventaja para uso en la fabricación de vigas *joist* son: *Guadua angustifolia* y *Gigantochloa verticillata*, ya que presentan propiedades óptimas para ser utilizadas en la construcción de dichos elementos estructurales, además de ser especies de amplia diseminación en varias las regiones del país.
2. La especie de bambú *Guadua angustifolia* se utilizó en el diseño de vigas *joist*, para conformar los cordones longitudinales, tanto superior como inferior, debido a que es la especie con mayor investigación, siendo apta para uso en miembros estructurales sometidos a flexión, tensión paralela a la fibra, tensión y compresión perpendicular a las fibras y ser la especie con dichas propiedades de mayor presencia en Guatemala.
3. La especie de bambú *Gigantochloa verticillata*, se utilizó, en el diseño de vigas *joist*, para conformar los cordones diagonales, debido a que presenta gran facilidad de encontrarse en diámetros y espesores de pared adecuados, para resistir el esfuerzo cortante inducido al material cuando la viga este en servicio.
4. Se diseñaron las vigas, realizando variación en el método de anclaje, para ello se dispuso de perno acero con diámetro de un cuarto de pulgada y perno de bambú con diámetro de media pulgada. Además el peralte presentó dos variaciones siendo de: 10 por ciento y 15 por ciento, de la luz efectiva del vano.

5. Las condiciones que se mantuvieron constantes en la construcción de las vigas ensayadas fueron: la luz efectiva de tres metros, las especies utilizadas antes mencionadas para cada uno de los cordones y el ángulo interno entre cordones diagonales de 60 grados. Debido a condiciones de prefabricación y como parte del desarrollo de un método constructivo efectivo.
6. Según las gráficas de carga-deflexión mostradas en las figuras 51 a la 54, cada viga del mismo sistema ensayada bajo las mismas condiciones de carga se observa que los elementos presentan un comportamiento bastante similar, esto indica que el sistema trabajó en conjunto, aún cuando fallara solo una viga, como lo ocurrido en el sistema 1 y 4.
7. La resistencia mecánica de las vigas *joist* obtenida experimentalmente por medio de ensayos de laboratorio y mediante el uso de la Norma Técnica Peruana E-100 Bambú, antes de alcanzar la deflexión máxima permisible de 15 milímetros es:
  - JB – A: [83,00 kg/m – 200,00 kg/m]  $\pm$  50 kg/m
  - JB – B: [82,00 kg/m – 120,00 kg/m]  $\pm$  50 kg/m
  - JB – C: [105,00 kg/m – 156,00 kg/m]  $\pm$  50 kg/m
  - JB – D: [78,00 kg/m – 170,00 kg/m]  $\pm$  50 kg/m
8. De las variaciones realizadas no existen diferencias significativas entre una y otra, tanto en la utilización del método de anclaje, como en el peralte utilizado, y se deja a criterio del lector el uso de los mismo teniendo en cuenta las ventajas y desventajas que cada una de las variantes conlleva, las cuales se plasmaron en el punto 4,3 de este documento.

## RECOMENDACIONES

1. Una de las cosas más importantes para la utilización de bambú en la construcción de elementos estructurales, es el tratamiento preventivo, pues este material es sumamente vulnerable al ataque de hongos e insectos; por lo que el uso de vigas *joist* fabricadas con este material sin su previa inmunización y tratamiento no se recomienda, pues afectará tanto en su vida útil como en su resistencia presentando el riesgo de colapso de la estructura puesta en servicio.
2. Es importante utilizar bambúes en edad de cosecha y no demasiado jóvenes ni de edad avanzada, pues los culmos jóvenes sufren cambios volumétricos mayores durante el secado, deformando la sección y presentando rajaduras, mientras que los culmos con mayor edad a la adecuada para el corte, tendrán espesores de pared bastante gruesas provocando fisuras en la superficie debilitando así el material. Para las especies seleccionadas se recomiendan edades entre 4 y 5 años.
3. Para obtener resultados consistentes, en la construcción de vigas *joist* utilizando bambú, es importante contar con una metodología correcta de fabricación, para lograr que todas las vigas cuenten con características similares y disminuir así factores de falla por malas prácticas en su elaboración.

4. Es importante analizar el comportamiento de los sistemas de *joist* fabricados con bambú, ensayándolos cuando la carga es aplicada directamente en toda la luz del vano y no apoyándose sobre los tercios de cada viga, para lograr así un mejor resultado en la interpretación de resultados, además de disminuir el riesgo de que las piezas fallen por aplastamiento, como se muestra en la figura 66 del sistema número dos.
  
5. Debido a que la falla más crítica se presentó por tracción perpendicular a las fibras en la mayoría de los casos, como se muestra en la figura 58, esta fue frenada en alguna medida por la existencia de un confinamiento natural por medio del nudo, caso contrario de la figura 59 donde se observa como la ausencia de nudo en el extremo hizo que la falla fuera completamente abierta. Por lo anterior se hace necesario que todos los culmos a utilizar, cuenten en su extremo con un confinamiento y de no ser posible debido a la naturaleza del material, es recomendable que mecánicamente se confinen estos por medio del método que el lector considere más eficiente, pudiendo ser; abrazaderas metálicas, alambre de amarre u otros. Lo anterior debe realizarse aun cuando exista un nudo en los extremos.
  
6. Cuando el sistema esté en uso, es importante el control constante de las deflexiones a partir de que estas alcancen el 2 por ciento del peralte efectivo por estar fabricado de diversos elementos, pues antes de esto la viga se comporta de forma arbitraria, ya que esta sufre un acomodo en su estructura y después de este valor las deflexiones se comportan de manera constante, logrando incluso obtener una curva de histéresis lo que refleja que se comportan como un elemento dúctil

## BIBLIOGRAFÍA

1. Altos hornos de México. *Manual de diseño para la construcción con acero*. México, 2013. 420 p.
2. ARMIRA ATZ. Pedro. *Evaluación de seis tipos de esquejes para la propagación de, Bambusa vulgaris var striata schrad ex wendl y Gigantochloa verticillata (willd) munro*. Trabajo de graduación de Agronomía. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía, 1989. 98 p.
3. CASTRILLÓN VALDEZ, Brigitte; MALAVER ZAPATA, Diego. *Procedimientos de ensayo para la determinación de las propiedades físico mecánicas de la guadua*. Trabajo de graduación de Ing. Civil y Agrícola. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, 2004. 94 p.
4. ESTRADA ORELLANA, Yuri Estuardo. *Análisis y diseño del sistema compuesto losa – joist*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1990. 116 p.
5. *Evaluación tecnológica de 3 especies de bambú (guadua angustifolia, gigantochloa verticillata, giganteus apus) para determinar su potencia industrial*. Proyecto FODECYT 04-2011, 2011. 234 p.

6. GARCÍA CELAYA, Eddy Alexander. *Cálculo y diseño en acero de vigas de celosía*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2001. 120 p.
7. IXCOLÍN OROXOM, Carlos Armando. *Estado actual del bambú como material de construcción en Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1999. 189 p.
8. MACCIONI QUEZADA, Alberto. *Manual de diseño sistema constructivo joístec*. Santiago de Chile. 2012. 130 p.
9. MENÉNDEZ CAHUEQUE, Raúl. *Caracterización de 11 cultivares de bambú en la finca Chocolá, Suchitepéquez*. Trabajo de graduación de Agronomía. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía, 1983. 122 p.
10. MERCEDES, José Ramón. *Guía técnica cultivo del bambú, Santo Domingo. República Dominicana: CEDAF, 2006. 38 p.*
11. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento de Perú. *Norma Técnica Peruana E-100, Bambú*. Lima, 2000. 38 p.
12. MONROY GALICIA, Elia Melina. *Tratamiento químico de cuatro especies de bambú para su preservación, utilizando ácido bórico bórax-dicromato de sodio por el método de inmersión y baño caliente-frío*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2006. 99 p.

13. OLIVA MAYORGA, Gustavo Adolfo. *Evaluación de las propiedades físico-mecánicas de cuatro especies de bambú*. Trabajo de graduación de Agronomía. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía, 1989. 97 p.
14. TEJADA VÁSQUEZ. Julio Héctor. *Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de cuatro especies de bambú*. Trabajo de graduación de Agronomía. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía, 1990. 84 p.
15. VALIENTE NAVARRO. María de los Ángeles. *Utilización del bambú en el diseño de viviendas para la región sur-oriente de Guatemala*. Trabajo de graduación de Arquitectura. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Arquitectura, 1985. 192 p.