



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

**PROPUESTA DE TECHO DE BAMBÚ CON FERROCEMENTO  
PARA VIVIENDAS UNIFAMILIARES**

**Gerson Daniel Ac Ruiz**

Asesorado por el Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila

Guatemala, enero de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA DE TECHO DE BAMBÚ CON FERROCEMENTO  
PARA VIVIENDAS UNIFAMILIARES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**GERSON DANIEL AC RUIZ**

ASESORADO POR EL ING. MARIO RODOLFO CORZO ÁVILA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

GUATEMALA, ENERO DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Rafael Enrique Morales Ochoa
EXAMINADOR	Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera
EXAMINADOR	Ing. Nicolás de Jesús Guzmán Sáenz
SECRETARIO	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez

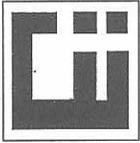
## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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:

### **PROPUESTA DE TECHO DE BAMBÚ CON FERROCEMENTO PARA VIVIENDAS UNIFAMILIARES**

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

**Gerson Daniel Ac Ruiz**



Guatemala, 10 de septiembre de 2015

Ingeniero José Gabriel Ordoñez Morales  
Coordinador del Área de Construcciones Civiles y Materiales de  
Construcción  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

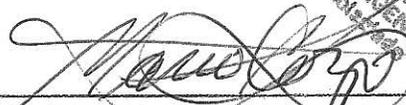
Señor Coordinador,

Informo a usted que he revisado el trabajo de tesis titulado  
**PROPUESTA DE TECHO DE BAMBÚ CON FERROCEMENTO PARA  
VIVIENDAS UNIFAMILIARES**, realizado por el estudiante universitario  
**Gerson Daniel Ac Ruiz**, quien contó con la asesoría del suscrito.

El trabajo cumple con los objetivos para los cuales fue planteado y  
aporta valiosa información para la Ingeniería Nacional, por lo que  
recomiendo su aprobación.

Atentamente,

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

(f)   
Ingeniero Civil Mario Rodolfo Gorzo Avila

Asesor



FACULTAD DE INGENIERIA  
AREA DE MATERIALES Y  
CONSTRUCCIONES CIVILES

USAC



**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,  
06 de noviembre de 2015

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 **PROPUESTA DE TECHO DE BAMBÚ CON FERROCEMENTO PARA VIVIENDAS UNIFAMILIARES**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Gerson Daniel Ac Ruiz, quien contó con la asesoría del Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila.

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 José Gabriel Ordoñez Morales  
Coordinador del Área de Materiales y  
Construcciones Civiles



FACULTAD DE INGENIERIA  
AREA DE MATERIALES Y  
CONSTRUCCIONES CIVILES

USAC

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





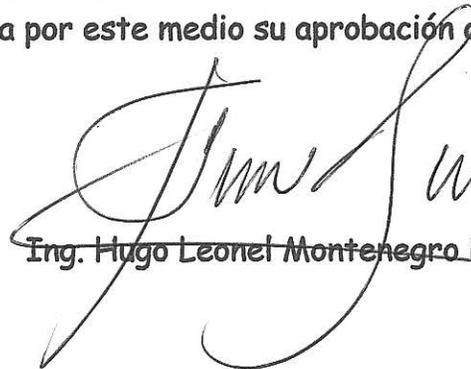
**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala

<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. Mario Rodolfo Corzo Ávila y Coordinador del Departamento de Materiales y Construcciones Civiles Ing. José Gabriel Ordóñez Morales, al trabajo de graduación del estudiante Gerson Daniel Ac Ruiz, titulado PROPUESTA DE TECHO DE BAMBÚ CON FERROCEMENTO PARA VIVIENDAS UNIFAMILIARES, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

  
Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, enero 2016  
/mrrm.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua

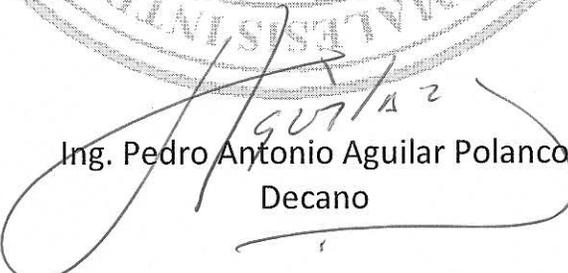




DTG. 027.2016

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: **PROPUESTA DE TECHO DE BAMBÚ CON FERROCEMENTO PARA VIVIENDAS UNIFAMILIARES**, presentado por el estudiante universitario: **Gerson Daniel Ac Ruiz**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano

Guatemala, enero de 2016

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Jehová, mi Dios**

Por ser bendición para mis padres y en mi vida, por no desampararnos y estar siempre a nuestro lado en cada momento.

### **Mis padres**

Héctor Ac y Josefina Ruiz de Ac, por proveerme de su apoyo, paciencia y amor incondicional en todos estos años de mi carrera.

### **Mi hermano**

Josué Ac, por ser una persona muy importante en cada etapa de mi vida brindándome de su apoyo, cariño y compañía.

### **Mis hermanas**

Rosemary y Gabriela Ac, por brindarme su amistad, amor y paciencia.

### **Mi abuela**

Juliana Xitumul, por ser una importante influencia en mi vida, por estar pendiente siempre de mí con su cuidado y disciplina.

### **Mi novia**

Flor Rivas, por estar siempre conmigo en las buenas y en las malas y darme de su apoyo y comprensión

Todas las personas que siempre creyeron en mí.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por darme la oportunidad de abrirme sus puertas y cursar mi carrera profesionalmente.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por darme las herramientas necesarias para formarme como profesional.
<b>Mi asesor</b>	Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila, por su conocimiento, consejos, ayuda y tiempo para supervisar el trabajo de graduación presente.
<b>Señor Fabio Sánchez</b>	Por haber tomado parte en la realización de los ensayos y por el apoyo en la construcción del sistema.
<b>Sección de estructuras</b>	Al grupo de compañeros practicantes que me otorgaron su ayuda en la elaboración del sistema, así como en los ensayos a la misma.
<b>Sección de maderas</b>	Por los compañeros de esta sección que colaboraron en la guía, préstamo de herramientas y construcción del sistema.
<b>Amigos</b>	Por la motivación brindada para lograr esta meta.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XI
GLOSARIO .....	XV
RESUMEN.....	XXI
OBJETIVOS.....	XXIII
INTRODUCCIÓN.....	XXV
1.   TECHOS DE BAMBÚ CON FERROCEMENTO PARA VIVIENDAS UNIFAMILIARES.....	1
1.1.   Tipos de techo en Guatemala.....	1
1.2.   Techos mínimos en población pobre .....	3
1.3.   Estructura de techo mínimo .....	4
1.4.   Tipos de techos o cubiertas.....	4
1.4.1.   Cubiertas curvas .....	4
1.4.2.   Cubiertas planas.....	6
1.4.2.1.   Tipos de cubiertas planas.....	9
1.4.2.1.1.   Cubierta caliente.....	10
1.4.2.1.2.   Cubierta fría.....	10
1.4.2.1.3.   Cubierta flotante .....	10
1.4.3.   Cubiertas inclinadas .....	11
1.4.3.1.   Tipos de cubiertas inclinadas.....	14
1.5.   Estructura de techos de bambú con ferrocemento .....	16
1.5.1.1.   Características del bambú y ferrocemento.....	16
1.5.1.1.1.   Bambú .....	16

1.5.1.2.	Característica general del bambú.....	18
1.5.1.3.	Propiedades físicas .....	18
1.5.1.3.1.	Contenido de humedad .....	19
1.5.1.3.2.	Contracción .....	19
1.5.1.3.3.	Peso específico.....	20
1.5.1.4.	Propiedades mecánicas .....	20
1.5.1.4.1.	Tensión paralela a la fibra .....	20
1.5.1.4.2.	Compresión paralela a la fibra .....	21
1.5.1.4.3.	Corte paralelo a la fibra .....	21
1.5.1.4.4.	Tensión perpendicular a la fibra .....	22
1.5.1.4.5.	Clivaje .....	22
1.5.1.5.	Beneficios del bambú .....	23
1.5.1.6.	Ferrocemento .....	24
1.5.1.7.	Materiales que lo constituyen .....	27
1.5.1.7.1.	Mortero.....	27
1.5.1.7.2.	Calidad del agua .....	28
1.5.1.7.3.	Aditivos.....	28
1.5.1.7.4.	Agregados.....	29
1.5.1.7.5.	Refuerzo de acero.....	29
1.5.1.7.6.	Mallas de refuerzo.....	30
1.5.1.7.7.	Malla hexagonal .....	30
1.5.2.	Combinación del bambú y ferrocemento .....	31
1.5.3.	Ventajas y desventajas del sistema .....	32
1.5.3.1.	Ventajas .....	33

1.5.3.2.	Desventajas .....	33
2.	DISEÑO DEL TECHO PROPUESTO COMPUESTO DE BAMBÚ– FERROCEMENTO A DOS AGUAS PARA VIVIENDAS UNIFAMILIARES.....	35
2.1.	Características geométricas .....	35
2.2.	Diseño de viga “T” .....	41
2.2.1.	Cargas distribuidas .....	41
2.2.1.1.	Carga muerta.....	42
2.2.1.2.	Carga viva.....	43
2.2.1.3.	Carga última de diseño.....	44
2.2.2.	Cálculo de momentos y cortantes para una viga simplemente apoyada.....	45
2.2.2.1.	Momento máximo (Mmax) .....	45
2.2.2.2.	Cortante máximo (Vmax).....	46
2.2.3.	Diseño de refuerzo de acero.....	46
2.2.3.1.	Malla hexagonal (As’) .....	46
2.2.3.2.	Cálculo experimental del área de acero de la malla hexagonal de 1/2” ....	49
2.2.3.3.	Refuerzo en el nervio.....	50
2.2.4.	Chequeo en la deformación de los nervios.....	50
2.2.4.1.	Cálculo de la deformación máxima permitida.....	51
2.2.4.2.	Cálculo de la deformación teórica.....	51
2.2.5.	Chequeo de momentos en el nervio a base de ferrocemento.....	52
2.2.5.1.	Área de acero propuesta .....	53
2.3.	Encontrar el momento nominal, carga nominal y su excentricidad por medio del rectángulo equivalente .....	55

2.3.1.	Deformación del acero ( $\epsilon_s$ ) .....	56
2.3.2.	Deformación de la malla hexagonal ( $\epsilon_s'$ ) .....	57
2.3.3.	Encontrar carga y momento nominal.....	59
2.3.3.1.	Carga nominal .....	59
2.3.3.2.	Momento nominal.....	60
2.3.4.	Excentricidad.....	60
2.4.	Análisis estructural de la cubierta.....	61
2.4.1.	Deflexión de la cubierta .....	61
2.4.2.	Cálculo de cargas distribuidas en la cubierta .....	62
2.4.2.1.	Carga muerta .....	63
2.4.2.2.	Carga viva .....	66
2.4.2.3.	Carga última de diseño .....	67
3.	PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO .....	69
3.1.	Preparación y colocación del bambú.....	70
3.2.	Preparación y colocación del refuerzo primario para la cubierta a dos aguas .....	72
3.3.	Preparación y colocación del refuerzo secundario para la cubierta a dos aguas .....	74
3.4.	Tensado del refuerzo .....	74
3.5.	Preparación y colocación del sistema bambú-ferrocemento ....	75
3.6.	Consideración de fijación .....	77
3.7.	Preparación y colocación de formaletas.....	77
3.8.	Preparación y colocación del mortero .....	78
3.9.	Curado .....	80
3.10.	Desencofrado.....	80
4.	COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	83
4.1.	Generalidades.....	83

4.2.	Cargas .....	83
4.2.1.	Carga viva.....	83
4.2.2.	Carga muerta.....	84
4.3.	Análisis de resultados en la cubierta a dos aguas.....	84
4.4.	Aplicación de carga .....	86
4.5.	Comportamiento general de la estructura.....	104
CONCLUSIONES .....		105
RECOMENDACIONES.....		107
BIBLIOGRAFÍA.....		109



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Cúpulas .....	5
2.	Abovedadas .....	6
3.	Cubierta plana .....	7
4.	Cubierta inclinada .....	11
5.	Rangos de pendientes .....	12
6.	A un agua.....	14
7.	Simétrica-asimétrica.....	14
8.	De pabellón de caballete.....	15
9.	Mansarda-holandesa.....	15
10.	Poliédricas.....	16
11.	Dimensiones del módulo .....	36
12.	Elevación del sistema a dos aguas .....	36
13.	Esquema de bambú promedio .....	38
14.	Detalles de cómo está compuesto el módulo de bambú–ferrocemento .....	39
15.	Corte 1–1 del módulo .....	40
16.	Nervios reforzados y no reforzados.....	40
17.	Elevación del módulo, viga “T” .....	41
18.	Esquema de viga “T” .....	42
19.	Carga distribuida sobre el área crítica del módulo .....	44
20.	Esquema de momento y corte de una viga simplemente apoyada .....	45
21.	Esquema del nervio reforzado .....	52
22.	Esquema del rectángulo equivalente .....	56

23.	Elevación del sistema bambú–ferrocemento .....	62
24.	Detalle de las dimensiones internas y externas del bambú en el módulo .....	64
25.	Esquema del sistema bambú–ferrocemento.....	69
26.	Corte transversal del bambú.....	70
27.	Corte longitudinal del bambú .....	71
28.	Limpieza interna del bambú.....	72
29.	Colocación del refuerzo longitudinal y transversal .....	73
30.	Colocación de la malla hexagonal .....	74
31.	Tensado del refuerzo secundario.....	75
32.	Preparación y colocación del sistema.....	76
33.	Fundición de la viga de bambú (unión) .....	77
34.	Preparación y colocación de formaletas .....	78
35.	Colocación del mortero .....	79
36.	Distribución de peso en un módulo.....	85
37.	Diagrama de la cubierta en planta–elevación, y posición de los deformómetros.....	86
38.	Ensayo de la cubierta bambú ferrocemento aplicando la carga de diseño.....	87
39.	Gráficas del comportamiento carga-desplazamiento bajo las alas de la cubierta compuesta de bambú-ferrocemento.....	89
40.	Gráfica del comportamiento carga-desplazamiento bajo la unión viga de bambú que une el sistema bambú-ferrocemento .....	92
41.	Gráficas del comportamiento carga–desplazamiento en los apoyos del sistema bambú-ferrocemento.....	94
42.	Carga-desplazamiento D-4 y D-5.....	95
43.	Gráficas del comportamiento carga-desplazamiento bajo las alas de la cubierta compuesta de bambú-ferrocemento aplicándole el 100 por ciento de carga adicional a la carga de diseño .....	97

44.	Gráfica del comportamiento carga-deformación en la unión de la viga de bambú que une el sistema bambú-ferrocemento, aplicándole el 100 por ciento de carga adicional a la carga de diseño.....	100
45.	Gráficas del comportamiento carga-deformación en los apoyos del sistema bambú-ferrocemento, aplicándole el 100 por ciento de carga adicional a la carga de diseño .....	102
46.	Carga - desplazamiento D-4 y D-5.....	103

## TABLAS

I.	Tabulación de diámetros y espesores de bambú.....	37
II.	Carga viva para cubiertas livianas .....	43
III.	Cálculo del área de acero en viga “T” .....	48
IV.	Carga viva para cubiertas livianas .....	66
V.	Datos obtenidos en el ensayo de la cubierta bambú–ferrocemento aplicando la carga de diseño.....	88
VI.	Datos obtenidos del segundo ensayo de la cubierta bambú–ferrocemento, aplicando el 100 por ciento de carga adicional a la carga de diseño.....	96



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>b</b>	Ancho de la cara en compresión del elemento.
<b>Ag</b>	Área bruta de una sección de concreto.
<b>As</b>	Área de refuerzo longitudinal no preesforzado a tracción.
<b>As min</b>	Área mínima de refuerzo de flexión.
<b>Ast</b>	Área total de refuerzo longitudinal no preesforzado.
<b>Pu</b>	Carga axial última debido a la combinación de cargas afectadas por factores de magnificación.
<b>Cm</b>	Carga muerta.
<b>Wm</b>	Carga muerta uniformemente distribuida.
<b>Pn</b>	Carga nominal.
<b>Cu</b>	Carga última.
<b>W</b>	Carga uniformemente distribuida.
<b>Cv</b>	Carga viva.
<b>p</b>	Carga viva mayorada.
<b>Wv</b>	Carga viva uniformemente distribuida.
<b>cm<sup>2</sup></b>	Centímetro cuadrado.
<b>Def max</b>	Deflexión máxima de un elemento rectangular sometidos a carga de servicio.
<b>Def teórica</b>	Deflexión teórica, dada por el análisis estructural.
<b>D-1</b>	Deformómetro 1.
<b>D-2</b>	Deformómetro 2.

<b>D-3</b>	Deformómetro 3.
<b>D-4</b>	Deformómetro 4.
<b>D-5</b>	Deformómetro 5.
<b>D</b>	Diámetro.
<b>d</b>	Distancia desde la fibra extrema en compresión hasta el centroide del refuerzo longitudinal en tracción.
<b>c</b>	Distancia medida desde la fibra extrema en compresión al eje neutro.
<b>Vmax</b>	Esfuerzo cortante que actúa sobre un elemento.
<b>t</b>	Espesor de la pared de una sección con vacíos.
<b>h</b>	Espesor total o altura de un elemento.
<b>e</b>	Excentricidad.
<b>Kg</b>	Kilogramo.
<b>Lb</b>	Libra.
<b>L</b>	Luz libre medida entre los apoyos.
<b>m</b>	Metro.
<b>mm</b>	Milímetros.
<b>Ec</b>	Módulos de elasticidad del concreto.
<b>I</b>	Momento de inercia de la sección con respecto al eje que pasa por el centroide.
<b>Mmax</b>	Momento máximo producido en un elemento simplemente apoyado con carga aplicada.
<b>Mu</b>	Momento ultimo debido a la combinación de cargas afectadas por factores de magnificación.
<b>A</b>	Profundidad del bloque rectangular equivalente de esfuerzos.
<b>Rec</b>	Recubrimiento.
<b>Cc</b>	Recubrimiento libre del refuerzo.

“	Representación de pulgada en sistema inglés de medida.
<b>f<sub>c</sub></b>	Resistencia específica a la compresión del concreto.
<b>f<sub>y</sub></b>	Resistencia específica a la fluencia del refuerzo.
<b>Vol</b>	Volumen.



## GLOSARIO

<b>ACI</b>	Código del Instituto Americano del Concreto.
<b>Agies</b>	Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica.
<b>ASTM</b>	Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales.
<b>Bambú</b>	Planta tropical de tallo en forma de caña, alto, leñoso y resistente, hojas grandes y alargadas de color verde claro y flores en panojas derechas, ramosas y extendidas; puede alcanzar hasta 20 m de altura.
<b>Carga muerta</b>	Carga vertical aplicada sobre una estructura que incluye el peso de la misma estructura más la de los elementos permanentes. También llamada carga permanente.
<b>Carga de servicio</b>	Carga concentrada que se aplica en el nudo de una cercha. También llamada carga de trabajo, carga de uso.
<b>Carga viva</b>	Carga externa movable sobre una estructura que el mobiliario, equipamiento, personas, entre otros, que

actúa verticalmente, por tanto, no incluye la carga eólica. También llamada carga variable.

**Colapso estructural** Cualquier condición externa o interna que incapacita a una estructura o elemento estructural a cumplir la función para la que ha sido diseñada.

**Corrosión** Deterioro del metal debido a una reacción química o electroquímica, como resultado de su exposición a los agentes atmosféricos, químicos, entre otros.

**Cubierta** Elemento superior que posee la suficiente inclinación para llevar a cabo drenaje del agua; generalmente con una pendiente inferior a 10 grados.

**Diafragma** Pieza estructural rígida que puede soportar el esfuerzo cortante al estar aplicado en una dirección paralela a un plano. También llamado tímpano.

**Directriz** Línea que guía el movimiento de una generatriz para describir una curva o superficie.

**Durabilidad** Capacidad de los componentes para comportarse satisfactoriamente frente a las acciones físicas y químicas agresivas a lo largo de la vida útil de la estructura, protegiendo también las armaduras y elementos metálicos embebidos en su interior.

<b>Esfuerzo axial</b>	Esfuerzo perpendicular al plano sobre el que se aplica la fuerza de tracción o compresión, distribuido de manera uniforme por toda la superficie. También llamado esfuerzo normal.
<b>Esfuerzo a flexión</b>	Combinación de las fuerzas de tracción y de compresión que se desarrollan en la sección transversal de un elemento estructural para resistir una fuerza transversal.
<b>Faldón</b>	Cada uno de los planos inclinados que forman el techo.
<b>Ferrocemento</b>	Material constituido por un mortero de cemento armado con hilos de acero de pequeño diámetro o con tela metálica de malla fina en varias capas.
<b>Flexión</b>	Doblamiento que sufre un elemento estructural al ser sometido a una fuerza transversal externa.
<b>Grieta en la madera</b>	Abertura paralela al hilo de una pieza de madera; generalmente producida por una contracción durante el proceso de secado. También llamada hendedura, hendidura, raja.
<b>Grout (lechada mortero líquido)</b>	Es un relleno estructural para la colocación bajo o estructuras y maquinaria. Mortero especializado para el relleno de espacios permite que llegue a los espacios mas difíciles de la estructura.

<b>Habitabilidad</b>	Referida al ámbito de la arquitectura, es la parte de esta disciplina dedicada a asegurar unas condiciones mínimas de salud y confort en los edificios. En especial, la habitabilidad se ocupa del aislamiento térmico y acústico, y de la salubridad.
<b>Hormigón</b>	Producto resultante de la mezcla de un aglomerante; arena, grava o piedra machacada (denominados áridos) y agua.
<b>Impermeabilizante</b>	Sustancia o compuesto químico que tiene como objetivo detener el agua, impidiendo su paso, es muy utilizado en el revestimiento de piezas y objetos que deben ser mantenidos secos.
<b>Módulo</b>	Elemento con función propia concebido para poder ser agrupado de distintas maneras con otros elementos constituyendo una unidad mayor.
<b>Mortero</b>	Mezcla de diversos materiales, como cal o cemento, arena y agua, que se usa en la construcción para fijar ladrillos y cubrir paredes.
<b>Nervio</b>	Elemento arquitectónico en forma de moldura o banda saliente que recorre un arco o una bóveda.
<b>Pendiente</b>	Inclinación que se le da al techo para que bajen las aguas con facilidad. Es el grado de desnivel de un techo o cubierta para que las aguas puedan correr.

<b>Recubrimiento</b>	En una estructura de hormigón armado: distancia mínima entre la superficie de una pieza del refuerzo y la superficie externa del elemento que lo contiene.
<b>Refuerzo</b>	Porción biselada en su unión a la parte maciza de una pieza, que proporciona una mayor resistencia a una espiga, deben cumplir con ciertas normas que exigen sea verificada su resistencia, ductilidad, dimensiones, y límites físicos o químicos de la materia prima utilizada en su fabricación.
<b>Resistencia a flexión</b>	Medida de la resistencia de un elemento o miembro estructural a las fuerzas flectoras. También llamada resistencia a la tracción.
<b>Resistencia a tracción</b>	Medida de la resistencia de un elemento o miembro estructural a las fuerzas flectoras. También llamada resistencia a la flexión.
<b>Rigidez</b>	Medida de la resistencia que ofrece un material a la deformación.
<b>Revestimiento</b>	Aplicación a una superficie de una capa de metal para protegerla contra las acciones del intemperismo como la oxidación. También llamado chapado.
<b>Soporte</b>	Cosa que recibe el peso de otra e impide que esta se tambalee o caiga.

<b>Tamiz</b>	Utensilio que se usa para separar las partes finas de las gruesas de algunas cosas y que está formado por una tela metálica o rejilla tupida que está sujeta a un aro.
<b>Techo</b>	Elemento o sector que se ubica en la zona superior de una construcción o de un vehículo para cerrarlo y cubrirlo.
<b>Vivienda unifamiliar</b>	Vivienda en la que una única familia ocupa el edificio en su totalidad, a diferencia de las viviendas colectivas.
<b>Viga</b>	Elemento arquitectónico rígido, generalmente horizontal, proyectado para soportar y transmitir las cargas transversales a que está sometido hacia los elementos de apoyo.
<b>Vivienda</b>	La vivienda es el lugar cerrado y cubierto que se construye para que sea habitado por personas. Este tipo de edificación ofrece refugio a los seres humanos y les protege de las condiciones climáticas adversas, además de proporcionarles intimidad y espacio para guardar sus pertenencias y desarrollar sus actividades cotidianas.

## **RESUMEN**

En el presente trabajo de graduación se evidencia el comportamiento de una cubierta a dos aguas, a base de dos módulos compuesta de bambú y ferrocemento, utilizando un material renovable como el bambú, integrándolo con uno de fácil adquisición como el ferrocemento. Proponiendo una nueva cubierta, con características físicas agradables al ambiente y la vista. Asimismo la descripción de cada uno de los elementos que lo constituyen, el diseño y análisis estructural del sistema, llevándolo a la construcción y cuidado de la misma, realizando los ensayos respectivos para conocer las propiedades mecánicas de los componentes estructurales, el comportamiento general de toda la estructura bajo las cargas de diseño propuestas.

Se comparte el análisis de resultados obtenidos, diseño teórico, resultados experimentales en el ensayo, comportamiento real del techo a dos aguas bajo las cargas de diseño, así también un ensayo adicional a la estructura como sistema, aplicándole el cien por ciento de la carga adicional a la carga de diseño propuesto, obteniendo los resultados esperados y aceptables.



# OBJETIVOS

## General

Proponer un nuevo método constructivo de techo liviano sismo resistente a base de bambú y ferrocemento para una vivienda unifamiliar.

## Específicos

- 1 Determinar el diseño teórico y experimental del sistema constructivo.
- 2 Presentar la especificación de procedimiento del método constructivo y características de los materiales en la construcción del techo a base de bambú y ferrocemento para viviendas unifamiliares.
- 3 Evaluar el comportamiento mecánico del sistema bambú ferrocemento a través de ensayos normalizados.



## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como objetivo presentar un modelo novedoso de techo o cubierta liviana, utilizando eficientemente recursos disponibles, materiales ecológicos, con la finalidad de buscar una solución alterna a la cubierta de viviendas en zonas rurales y urbanas, de techos estructuralmente vulnerables, sin capacidad de actuar como diafragmas transmisores de esfuerzos y sin la característica de integrar losas y muros como un sistema.

Específicamente, se propone el uso de un techo que aproveche el peso ligero, resistencia y bajo costo del bambú, con la versatilidad y gran resistencia del ferrocemento, trabajando ambos como un sistema constructivo compuesto. Esto para la implementación de un nuevo sistema de construcción, ideal para zonas de alta incidencia sísmica, debido a su bajo peso, pero con suficiente aporte de integridad estructural y capacidad de transmisión de cargas al plano de los muros que lo sostendrán.

De este modo, a las ventajas ya señaladas del ferrocemento, se anida la característica del bambú como material renovable, colaborando al desarrollo sustentable con tecnologías apropiadas, presentando una propuesta de diseño de techo liviano, viable y digno para la población.



# **1. TECHOS DE BAMBÚ CON FERROCEMENTO PARA VIVIENDAS UNIFAMILIARES**

El déficit habitacional es un problema socioeconómico que afecta a toda la población guatemalteca, esta situación no excluye a las personas por su edad, sexo o color de piel; los sectores más perjudicados son aquellos de menores ingresos y los que carecen de un lugar decente para vivir.

El Fideicomiso para el Desarrollo Local de Guatemala, en las estadísticas publicadas el 20 de mayo del 2013, dice que en Guatemala hay 1 501 166 viviendas con déficit habitacional, el 56,20 % de estas corresponde al déficit cualitativo, personas que gozan de vivienda pero no llenan los requisitos de habitabilidad por estar en zonas de peligro, con condiciones precarias y carecen de servicios básicos poniendo en riesgo la vida de sus residentes y el 43,80 % corresponde al déficit cuantitativo, es decir que el “ciudadano carece absolutamente de una vivienda”, la situación no ha variado significativamente en la actualidad.

Existen techos mínimos que se han utilizado en otros países y que pueden resolver la problemática en Guatemala, no solo entre la población con escasos recursos sino también en habitantes con viviendas ubicadas en áreas de riesgo y contra sismos.

## **1.1. Tipos de techo en Guatemala**

Para ofrecer una alternativa de solución a este problema es necesario la implementación de nuevos sistemas de construcción que tengan una

funcionabilidad adecuada con costos bajos pero que llenen los requisitos de un techo mínimo apropiado, especialmente en lugares del país de Guatemala ubicados en zonas altamente sísmicas.

Puac Alvarez en su trabajo de graduación *Opciones de techos para la vivienda en Guatemala* manifiesta que regionalizar la república de acuerdo a factores ecológicos, climáticos, productivos y antropológicos es posible implementar este tipo de techos basado en dos componentes, que son los primarios y secundarios.

Los componentes primarios se caracterizan por tener factores como la altitud, el clima, calidad del suelo, población y aspectos culturales.

Los componentes secundarios se caracterizan por tener factores como zona de vida, tipos de cultivos, uso de la tierra, relaciones de producción y tenencia de la tierra.

De acuerdo con los componentes primarios y secundarios la República de Guatemala se clasifica en 6 regiones, las cuales son la región central, región del altiplano occidental, región del altiplano oriental, región costera del pacifico, región seca oriental y región norte. Las características de las viviendas por región indican que existe una integración de factores en lo económico, cultural y social, por lo tanto, es necesario reconocer que el desarrollo del país en techos o cubiertas, los materiales prevalecientes son lamina zinc, teja, madera y palma.

Últimamente se están implementando nuevas tecnologías en la construcción de estructuras que cumplen con la función de soporte, apoyándose en los muros o vigas de la vivienda, tales estructuras son losas

prefabricadas, estructuras de madera, estructuras metálicas, estructuras de acero, vigueta y bovedilla, planchas pretensadas, panel estructural convitec, viguetas zap, entre otros. Así como en la implementación de diferentes tipos de cubiertas que cumplen con la función de dar protección, asilamiento e impermeabilidad a la estructura estas pueden ser lámina galvanizada acanalada de zinc, lámina ondulada de cemento, láminas troqueladas, láminas termo acústicas, tejas y sus diferentes tipos, entre otros.

Con los nuevos métodos de construcción se propone un nuevo techo constituido de bambú con ferrocemento con las características de una cubierta, que es dar protección, aislamiento e impermeabilidad y propiedades mecánicas como la resistencia a flexión con cargas de trabajo manteniendo la estructura sin mayores daños.

## **1.2. Techos mínimos en población pobre**

Los techos más utilizados por la población de escasos recursos están elaborados de materiales como la lámina de zinc, tejas o paja, dado que es de fácil adquisición, el costo de compra es relativamente barato conforme a otros tipos de cubiertas donde hay mayor elaboración en el diseño, y no se necesita de mano de obra calificada para la elaboración de estos tipos de techos.

El estudio económico en la construcción de techos es muy importante ya que está relacionado con el costo de los materiales, la facilidad de construcción y la adquisición de los elementos a utilizar en la elaboración de las cubiertas.

### **1.3. Estructura de techo mínimo**

Techos: también llamados cubiertas, son armaduras o sistemas que sirven como cierres superiores, cuyo empleo esencial es ofrecer protección al edificio o vivienda contra los agentes ambientales tales como la precipitación pluvial, radiación solar, aislamiento termoacústico, dar refugio y tener un ámbito privado, entre otros factores.

El techo mínimo tiene características especiales, que reúnen requisitos que aseguren la habitabilidad de los beneficiarios sin tener algún riesgo. A continuación se describen los diferentes tipos de cubiertas y los materiales que los constituyen.

### **1.4. Tipos de techos o cubiertas**

Por su geometría y forma de evacuar el agua los techos o cubiertas se dividen en tres tipos: cubiertas horizontales, inclinadas y curvas, para la comprensión de la propuesta es importante describirlas.

#### **1.4.1. Cubiertas curvas**

Cubierta cuya directriz describe un arco, suelen ser bóvedas o cúpulas, ya que estas son estructuras autoportantes que están compuestas por diversos materiales tales como el hormigón, madera, adobe, ladrillo, ferrocemento, fibrocemento entre otros. En la actualidad a cualquier cubierta curva se le denomina cúpula no importando si la curvatura es simple o doble. La característica mecánica de las cubiertas curvas es que trabajan a compresión, transmitiendo las cargas uno sobre otros. Una de las ventajas de las cúpulas es que casi todos los materiales empleados en los diferentes tipos de cubiertas

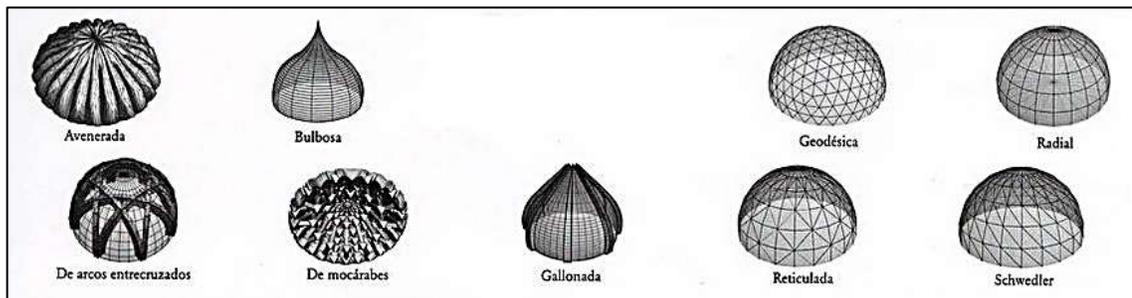
pueden adaptarse a las formas curvas de estas, siendo ellas tejas, pizarra, baldosas, cerámicas, chapa, siempre y cuando sean en fracciones pequeñas para ir moldeándola en la estructura.

Estas cubiertas se clasifican en dos tipos, cubiertas curva autoportante y cubiertas curvas no autoportante.

Cubierta curva autoportante: en este tipo de cubierta, un perfil metálico grecado y curvo descansa directamente sobre las vigas de carga y soporta los esfuerzos transmitiéndolos a estas.

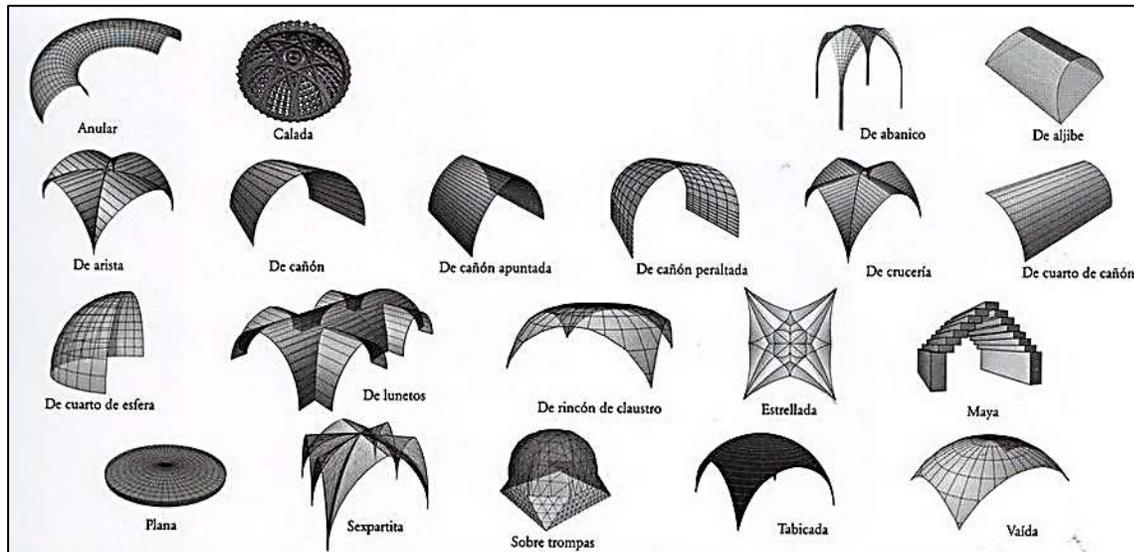
Cubierta curva no autoportante: en este tipo de cubierta, el perfil grecado y curvo descansa sobre una estructura portante compuesta de viguetas/correas y pórticos.

Figura 1. **Cúpulas**



Fuente: *Diccionario visual de términos arquitectónicos*. p 46.

Figura 2. **Abovedadas**



Fuente: *Diccionario visual de términos arquitectónicos*. p. 47.

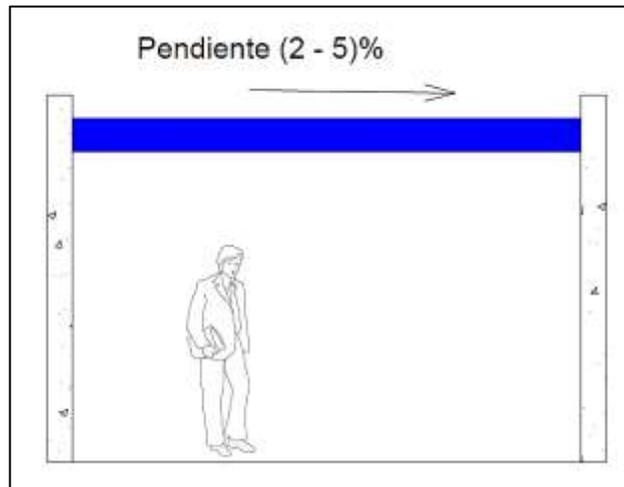
#### 1.4.2. **Cubiertas planas**

Son cubiertas que están levemente horizontales y que están constituidas por uno o varios faldones, en el cual conservan un rango de pendiente del 1 al 5 % y el agua recogida se evacua por medio de salidas de agua como los drenajes o aguas pluviales.

Se considera este tipo de cubiertas como elementos estructurales que soportan su propio peso y sobre cargas que actúan encima de la cubierta, tales como precipitaciones, viento, vibraciones de la calle, sismos, etc. en la que la cubierta trabaja como un tipo de diafragma que distribuye los esfuerzos a los elementos resistentes del edificio o vivienda.

En la figura 3 ejemplifica la cubierta plana y el porcentaje de pendiente que debe tener para su buen funcionamiento.

Figura 3. **Cubierta plana**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

La cubierta plana se compone de varias partes, entre las cuales se mencionan:

- Estructura de soporte

Cubierta que se apoya sobre una estructura de elementos lineales o sobre el último de los forjados de la vivienda, se diseña de acuerdo al peso muerto de la misma, así como la sobrecarga que actúan en ella, tales como viento, precipitaciones, sismos entre otros. Donde las deformaciones que pueden causar estos factores repercuten en las soleras de corona, paredes de la vivienda, que algunas veces provocan fisuras.

- Faldón

Son aquellos que forman los planos inclinados con pendientes leves que van del 1 al 5 % de elevación, forman el techo y que recaen sobre la estructura soporte, están constituidos por la elaboración de hormigón, mortero y planchas aislantes rígidas.

- Impermeabilizante

Es una capa protectora que evita el paso del agua al interior de los elementos estructurales exteriores. Existen dos tipos de impermeabilizantes: uno de ellos son las láminas bituminosas y las láminas sintéticas, el otro tipo es aplicado en obra a través de rodillos, brochas en forma de pintura impermeabilizante.

- Protección del impermeabilizante

Si la cubierta es transitable y de la posición del aislamiento donde el objetivo principal es proteger la capa impermeabilizante por medio de varios métodos de aplicación tales como: protección pesada en pavimentos, protección con baldosas, protección aislante con grava, protección ligera.

- Juntas de dilatación

Las juntas de dilatación en la elaboración de cubiertas planas son necesarias, ya que la estructura está sometida a la variación de temperaturas y pueden afectar la cubierta con esfuerzos de dilatación que son afectadas por estas mismas variaciones de temperatura, y si no

se realizan dichas juntas se puede provocar fisuras y agrietamientos en la estructura, para resolver esta problemática se construyen juntas de dilatación en el sistema en tramos de 5 metros cada una y con un máximo de distancia de 15 metros, en el cual todos los esfuerzos son absorbidos por estas mismas.

- Drenajes

El objetivo principal es la evacuación del agua de lluvia que pueden quedarse retenidas en la cubierta, ya que esta debe ser evacuada por los drenajes o sumideros ubicados en los puntos más bajos de la cubierta. Donde la pendiente diseñada en la cubierta plana juega un papel importante a la hora de la salida del agua al exterior.

#### **1.4.2.1. Tipos de cubiertas planas**

Las cubiertas planas pueden ser transitables, no transitables y ajardinadas, estas se construyen dependiendo del uso que se les dé; las transitables está diseñadas para ser habitables, mientras que las no transitables están inhabilitadas para el uso cotidiano y las ajardinadas son cubiertas que soportan una cobertura exterior de sustratos con espesores mínimos y el sustrato aloja especies vegetales de poco mantenimiento.

La cubierta o techo plano puede ser caliente, frío y flotante según su composición.

#### **1.4.2.1.1. Cubierta caliente**

Está formada por una sola hoja o ala, compuesta por varias capas de distintos materiales como: material cerámico, capa de microventilación, aislante térmico, barrera de vapor y estructura portante, ordenada sucesivamente del exterior hacia el interior de la cubierta, por ser solo de un ala que separa la vivienda del exterior, el sistema se encuentra sujeta a cambios de temperaturas y de presión entre su cara exterior hacia la cara interior.

#### **1.4.2.1.2. Cubierta fría**

Está compuesta por dos hojas que se separan por medio de una cámara de aire que ayuda a regular el comportamiento de las condiciones térmicas, sea calor y humedad relativa que se dan en los ambientes interiores y exteriores dando una mejor garantía para la habitabilidad y funcionamiento de la vivienda o edificio.

Estas hojas están compuestas por un material cerámico, capa de microventilación, elemento de soporte de las tejas, cámara de aire ventilada, la segunda hoja se constituye de un aislante térmico, barrera de vapor y una estructura portante.

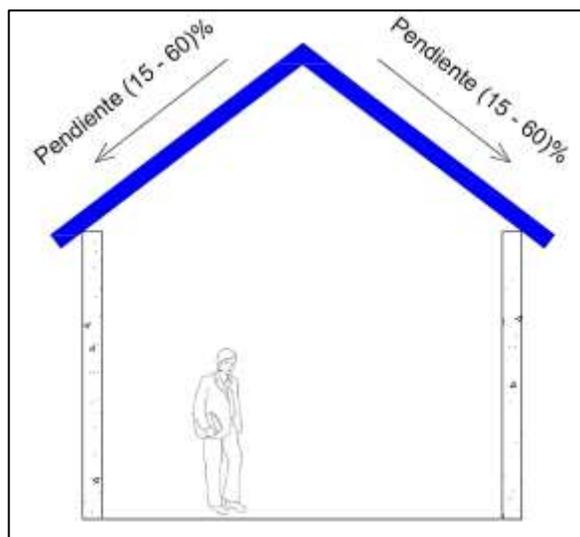
#### **1.4.2.1.3. Cubierta flotante**

Se construye con láminas de material plásticos (polietileno, polipropileno, poliéster) que se instalan sobre los cultivos a proteger, también llamadas mantas térmicas, sirven para crear un microclima favorable para el desarrollo de las plantas. Para este proyecto no tiene mayor importancia este tipo de techos.

### 1.4.3. Cubiertas inclinadas

Son todas aquellas que tienen una pendiente mayor al 15 % y están conformadas por faldones que se encargan de la evacuación del agua hacia las salidas de los drenajes, en el cual las cubiertas tienen un revestimiento de protección que se componen de piezas impermeables tales como la teja cerámica, chapa metálica o de fibrocemento, lámina metálica, entre otras.

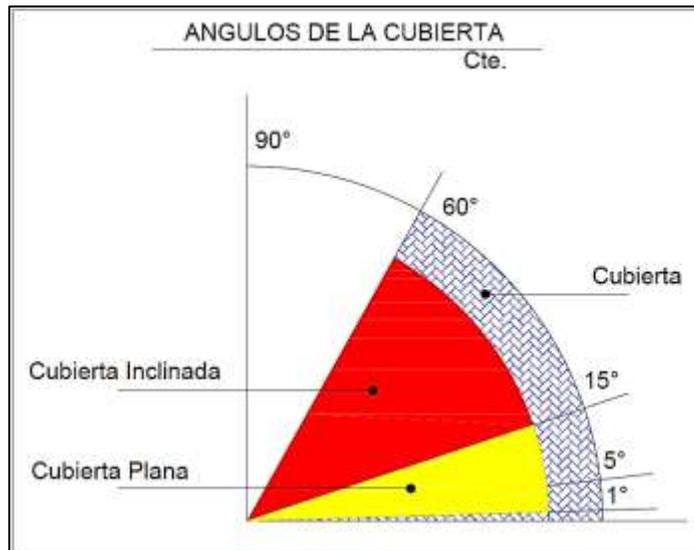
Figura 4. **Cubierta Inclinada**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

A continuación, una representación gráfica de los rangos de pendientes para los diferentes tipos de cubiertas.

Figura 5. Rangos de pendientes



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Así como las cubiertas planas, este tipo de cubiertas se componen de diferentes partes las cuales se detallan a continuación.

- Soporte estructural

La función principal es de servir de apoyo para todos los elementos que componen la cubierta y trabajar como un diafragma sobre los elementos verticales de la estructura. Hay diferentes tipos de soportes, tales como techos horizontales, tabiques y elementos ligados a la cubierta.

- Faldón

Son secciones inclinadas que forman la parte superior de la cubierta, y estas pendientes tienen un rango del 15 al 60 %.

- Alero

Es la continuación, en el extremo inferior, del faldón que sobresale del plano de la fachada, su función principal es la evacuación del agua debido a las precipitaciones sin que pueda tocar las paredes principales de la vivienda causando fisuras o agrietamientos por la filtración de la misma.

- Cumbre o caballete

Es el encuentro superior máximo de la cubierta conformado por dos faldones con pendientes contrapuestas.

- Lima o unión

Es un elemento de madera o cualquier otro material que se coloca en un ángulo diedro que forma el encuentro entre dos faldones inclinados. Existen dos tipos de limas: lima tesa y lima hoya.

- Base sustentante

Cubierta que se apoya sobre una estructura de elementos lineales o sobre el último de los forjados de la vivienda, se diseña de acuerdo al peso muerto de la cubierta, así como la sobrecarga que actúan en la misma, tales como viento, precipitaciones, sismos etc. donde las deformaciones que pueden causar estos factores repercuten en las soleras de corona, paredes de la vivienda provocando fisuras.

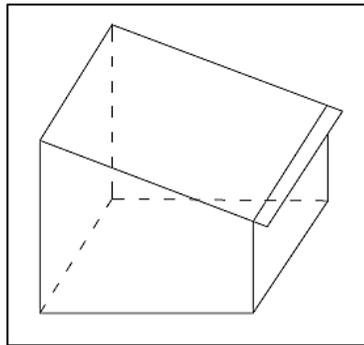
### 1.4.3.1. Tipos de cubiertas inclinadas

Dependiendo de su geometría las cubiertas se clasifican en dos tipos:

Superficies planas:

Cubierta a un agua:

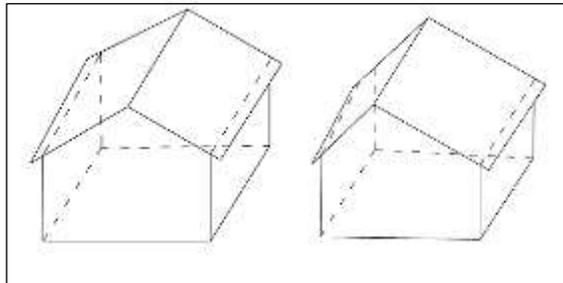
Figura 6. **A un agua**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Cubierta a dos aguas:

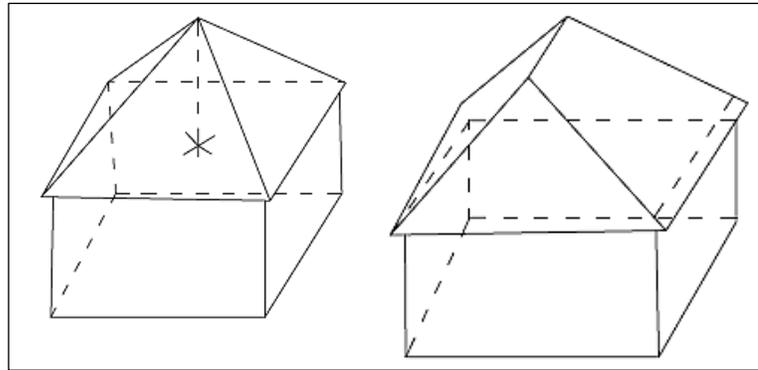
Figura 7. **Simétrica-asimétrica**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Cubierta a cuatro aguas:

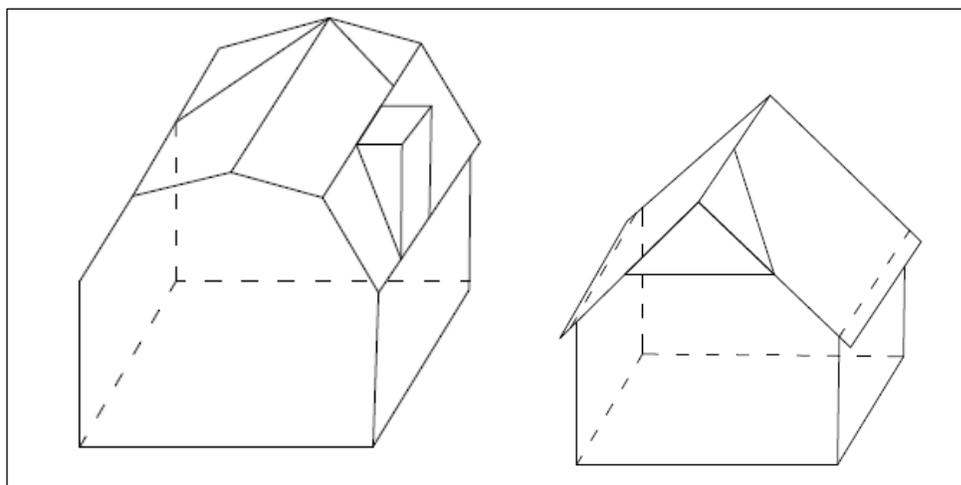
Figura 8. **De pabellón de caballete**



Fuente: elaboración propia, empleando programa AutoCAD.

Cubierta compuesta de más de 4 faldones:

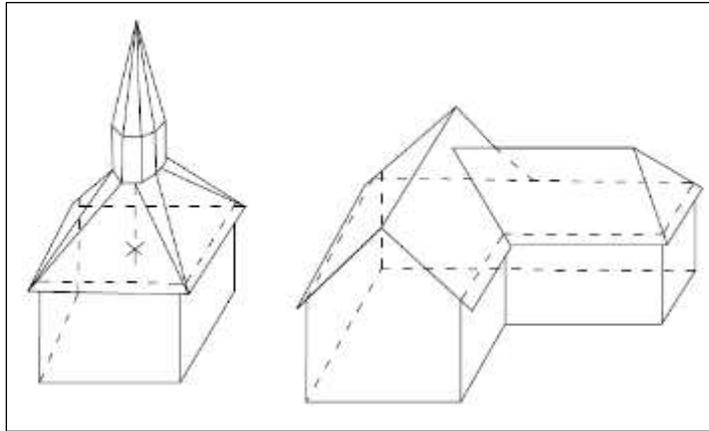
Figura 9. **Mansarda-holandesa**



Fuente: elaboración propia, empleando programa AutoCAD.

Cubiertas poliédricas:

Figura 10. **Poliédricas**



Fuente: elaboración propia, empleando programa AutoCAD.

## **1.5. Estructura de techos de bambú con ferrocemento**

En esta sección se busca conocer las características individuales del bambú y ferrocemento, y la fortaleza de la combinación de ambos para proponer un nuevo sistema de cubierta.

### **1.5.1.1. Características del bambú y ferrocemento**

A continuación se describen las características del bambú y ferrocemento.

#### **1.5.1.1.1. Bambú**

El bambú es una planta que se ha utilizado históricamente para una variedad de construcciones, tiene grandes beneficios, según el estudio *El*

*bambú en México* realizado por Cedeño, A. en China y Colombia se utiliza para la elaboración de muebles, artesanías, baldosas y otros, de acuerdo a Cedeño el bambú es también un material que puede utilizarse para techos mínimos de viviendas.

El bambú se introdujo en Guatemala en 1950 con siete especies, la que tenían potencial y capacidad de adaptación al clima con el fin de contribuir a la economía de ciertas regiones, se plantaron especies como *Bambusa textilis*, *Dendrocalamus asper*, *Gigantochloa apus*, *Gigantochloa verticillata*, *Guadua angustifolia*, *Phyllostachys bambusoides* y *Phyllostachys aurea*, en 1983 y 1984 el especialista taiwanés, Dr. Wei Chi Lin visita el país para evaluar las especies existentes y luego hacer recomendaciones sobre su propagación, aprovechamiento y transformación de dichas especies.

A petición del Gobierno de Guatemala se inicia un nuevo proyecto llamado Promoción del Cultivo del Bambú en Guatemala en los departamentos de Retalhuleu y viveros en Suchitepéquez, Baja Verapaz y Alta Verapaz, con el fin de abastecer a las personas de material vegetativo, esto con la ayuda del Instituto Técnico de Capacitación y Productividad (Intecap) y la Misión Técnica de la República de China (Taiwán) (MITAC).

En 1988 se sigue con el fomento del uso de bambú en diversas localidades de la República de Guatemala y a partir del 2003 se inicia el proyecto de Desarrollo Integral del Cultivo de Bambú y sus Diferentes Usos. En el 2009 el Gobierno de Guatemala y la Secretaria de Obras Sociales de la Presidencia (Sosep) comienzan el proyecto de la construcción de 600 casas con un área de 42 metros cuadrados cada módulo y elaborado con cañas de bambú en el sector de Tecun Umán en San Marcos. En el 2012 el Gobierno de

la República de China (Taiwan) realiza el traslado del proyecto al Centro Educativo del Bambú para seguir con su funcionamiento.

Existen dos tipos de bambú, el leñoso y el herbáceo, ambos tienen la virtud de rápido crecimiento, la velocidad de reproducción y su fácil manejo, la resistencia a la flexión y sus fibras longitudinales le dan mayor rigidez para ser utilizadas en todo tipo de construcciones, muebles o artesanías dependiendo de su tipo, así como las ventajas que deja a nivel social, económico y ecológico.

#### **1.5.1.2. Característica general del bambú**

El tipo de rizoma es simpodial o paquimorfo y se encuentra en los grupos de tallos abiertos, arqueados apicalmente. Los tallos de color verde oscuro, una banda pubescente arriba de los nudos, blanquecina, de 1 a 1,5 cm de ancho, entrenudos cortos en la parte inferior (17 cm), longitud de 43,0 cm en la media, deprimidos en la axila de la rama, lisos, lustrosos y finos. La hoja caulinar grande ampliamente triangular café oscuro, por la fuerte cantidad de setas orales en su exterior y lisa en el interior. Las ramas basalmente solitarias, en la parte media de 2 a 3, ángulo de 60° respecto al tallo. Hojas verdes pálido, oblongo-lanceolada, de 11,0 cm de largo y 9,0 cm de ancho, lisas en el haz, ligeramente pubescentes en el envés, espinas en gran cantidad, principalmente en las ramas basales.

#### **1.5.1.3. Propiedades físicas**

A continuación se explicará las propiedades físicas del bambú.

#### **1.5.1.3.1. Contenido de humedad**

El contenido de humedad varía dependiendo del periodo estacional, suelo y especie del bambú. El contenido de humedad del bambú se expresa en porcentaje de su peso secado al horno.

Con edades de 10 a 12 meses los cogollos tienen un contenido de humedad relativo de 120 a 130 %, mientras tanto en los nudos se presentan los valores más bajos en humedad de hasta un 15 % más que los entrenudos, siendo más significativas en la parte basal que en la apical y esto depende de la época de corte y las características de la especie a trabajar. Para el bambú guadua se tiene un contenido de humedad del 14,30 por ciento, esta especie fue cultivada en la finca Chocolá, Suchitepéquez.

#### **1.5.1.3.2. Contracción**

El bambú sufre de cambios dimensionales en su longitud, anchura y espesor de las paredes de esta misma, los cuales son proporcionales a su contenido de humedad, ya sea pérdida o ganancia de agua higroscópica en la pared y por lo tanto producen contracciones volumétricas en el material.

Las contracciones cesan cuando el contenido de humedad que hay en las paredes del bambú se equilibra con el ambiente. En un tiempo mínimo de 8 semanas después del corte, el contenido de humedad se logra estabilizar. Para el tipo de bambú guadua se tiene una contracción radial de 22,80 %, tangencial del 10,31 % y longitudinal de 1,50 % en la parte media del tallo en probetas cuadradas de 4 cms y una contracción en anillos radial de 19,30 %, tangencial de 6,70 %, longitudinal de 0,60 % y volumétrica de 24,50 % en la parte media del tallo.

### **1.5.1.3.3. Peso específico**

Esta propiedad física determina el peso del bambú por unidad de volumen. Debido a la falta de parénquima en los nudos el peso específico es más alto que en los entrenudos, por las irregularidades en la disposición de la fibra y reducen la capacidad de resistencias a los diferentes tipos de esfuerzos sometidos.

El peso específico cambia dependiendo del tipo de especie y varía entre los tallos, en los tramos de tallo a tallo, así como en las partes internas y externas del mismo. Para el bambú guadua tenemos un peso específico aparente de 0,62 (g/cm<sup>3</sup>), esta especie fue cultivada en la finca Chocolá, Suchitepéquez.

### **1.5.1.4. Propiedades mecánicas**

A continuación se explicará las propiedades mecánicas del bambú.

#### **1.5.1.4.1. Tensión paralela a la fibra**

La mayor cualidad del bambú es su alta resistencia a la tensión paralela a la fibra; tiene mayor resistencia a los esfuerzos a tensión en la parte exterior de la pared del tallo que en el interior y es por eso que es utilizado en cables por su propiedad a la tensión y se utilizan normalmente en puentes colgantes, así como refuerzo en el concreto.

De acuerdo con los ensayos realizados por el tesista Carlos Armando Ixcolín Oroxom los resultados obtenidos en el ensayo del bambú guadua fueron los siguientes: la tensión con probetas con nudo al centro es de 1 023 kg/cm<sup>2</sup> y

de entrenado es de 1 670 kg/cm<sup>2</sup> con un módulo de elasticidad de 1,54 E10 kg/cm<sup>2</sup> y 2,31 E10 kg/cm<sup>2</sup> respectivamente. El lugar de cultivo y de corte fue en la finca Chocolá, Suchitepéquez.

#### **1.5.1.4.2. Compresión paralela a la fibra**

La resistencia a compresión del bambú es sumamente alta, pero depende del grado de madurez y la relación entre el diámetro y la longitud de la misma, ya que es de importancia especificar el grado de madurez, así como en la madera, en el cual la humedad disminuye la rigidez de las fibras y por consiguiente hay una disminución en los esfuerzos, principalmente en los de compresión y flexión.

De acuerdo con los ensayos realizados por el tesista Carlos Armando Ixcolín Oroxom los resultados obtenidos en el ensayo del bambú guadua fueron los siguientes: la tensión con probetas con nudo al centro es de 594 kg/cm<sup>2</sup> y de entrenado es de 509 kg/cm<sup>2</sup> con un módulo de elasticidad de 1,83 E10 kg/cm<sup>2</sup> y 1,46 E10 kg/cm<sup>2</sup> respectivamente y el lugar de cultivo y de corte fue en la finca Chocolá, Suchitepéquez.

#### **1.5.1.4.3. Corte paralelo a la fibra**

El esfuerzo cortante es una medida de la capacidad que tiene el bambú en soportar 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.

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, a través de la fibra y en forma inclinada o en diagonal a la misma.

El esfuerzo de corte debe ser tomado muy en cuenta especialmente en diseños de uniones o juntas. La mayoría de estos elementos constructivos 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 alguna otra forma, causado por aplastamiento a través de la fibra.

#### **1.5.1.4.4. Tensión perpendicular a la fibra**

La 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 acción de hender o separar el bambú a lo largo de la fibra. También está vinculado al fenómeno del agrietamiento superficial. Por lo general las grietas o rajaduras en la superficie se presentan cuando los esfuerzos que se crean durante el periodo de secado exceden a la resistencia del bambú en tensión perpendicular a la fibra. Es por ello que el bambú tiende a rajarse al uso de clavos para asegurar las uniones.

#### **1.5.1.4.5. Clivaje**

La resistencia al clivaje se utiliza para medir la resistencia que ofrece el bambú al desgarramiento. Se expresa como la fuerza necesaria para provocar la falla por unidad de longitud kilogramo por centímetro una baja resistencia al clivaje favorece el corte longitudinal de los tallos, mientras que una alta resistencia es requerida para uniones con pernos, clavos y otros.

#### **1.5.1.5. Beneficios del bambú**

Son innumerables las ventajas que el bambú puede ofrecer como material en la construcción y al medio ambiente, a continuación, se destaca las más importantes:

- Es una materia prima natural renovable y en cada etapa de crecimiento puede ser utilizable para materiales de construcción, artesanías o el consumo humano.
- El bambú tiene una fuerza de tensión que supera al hierro en un 20 %, y por eso es llamado el acero vegetal.
- Tiene una mayor resistencia y flexibilidad a causa de sus fibras longitudinales y por lo tanto no se quiebra al curvarse estando en su etapa de madurez (3 años).
- La guadua posee características sismosrresistentes, ya que a la hora de un sismo el material puede colapsar y el daño es mínimo por su ligero peso.
- Este material puede acoplarse fácilmente con materiales como el concreto, ferrocemento, madera, hierro, tierra y más.
- Dentro del interior de bambú se guardan cámaras de aire, que permiten que estas sean buenas aislantes de sonido y térmicas.
- Pueden utilizarse en construcciones tales como puentes, viviendas, andamios, entre otros.

- Es un material liviano, manejable, fácil de adquirir, transportar y almacenar.
- Los métodos de tratamiento para esta planta son métodos sencillos y puede ser realizada por mano de obra no calificada.
- generando empleo para reducir el índice de pobreza e incrementar el desarrollo económico de la región.
- El desarrollo del cultivo del bambú benefician a los más necesitados.
- Resguarda el medio ambiente frenando la deforestación.

#### **1.5.1.6. Ferrocemento**

El ferrocemento es una lámina de poco grosor, constituido de mortero hidráulico con diferentes tipos de refuerzo tales como varillas longitudinales y refuerzo de malla de acero de alambre fino y de espaciamiento limitado, donde la malla está distribuida uniformemente a lo largo de toda la sección transversal del elemento a construir, la que aplicándole cargas este sistema actúa como un material homogéneo.

Es un término usado para diferenciarlo del concreto reforzado ya que este básicamente tiene el refuerzo distribuido a lo largo de la sección transversal del elemento a construir, donde se combina lo mejor del cemento hidráulico con lo mejor del refuerzo. Este tipo de material es de poco espesor, es flexible y de fácil manipulación y está compuesto por un mortero de cemento portland, refuerzo, aditivos y revestimientos.

La historia del ferrocemento se inicia en 1847 con el jardinero francés Joseph Monier quien integra mallas de acero en el concreto en la fabricación de grandes maceteros, pero para muchos la fecha de iniciación del ferrocemento se remonta desde el año 1948 como la del primer uso del concreto reforzado.

Joseph Louis Lambot presenta al mundo la primera embarcación fabricada de mortero reforzado con varillas de acero y alambre en la exposición universal en 1855 en París, con dimensiones de 3,66 m de largo y 1,22 m de ancho con espesores delgados de 2,5 a 3,8 cm, también construyó otros artículos tales como maceteros, asientos y otros artículos con un material que le denominó "Ferciment" con una patente que obtuvo en 1852 que dice lo siguiente: "mi invención es un producto nuevo que puede reemplazar la madera (en pisos, recipientes para agua, maceteros, entre otros), la cual está sujeta a daños por el agua y la humedad. La base del nuevo material es una malla metálica de alambre o de varillas interconectadas para formar un emparrillado flexible. Moldeó esta malla en forma similar al artículo que quiero crear, después utilizo cemento hidráulico o una brea bituminosa o una mezcla para rellenar juntas".

Con una técnica parecida a la de Lambot durante la segunda mitad del siglo XIX los constructores C. Gabellini y Boon construyeron la famosa balandra Zeemeeuw en el año de 1887. A principios del siglo XX el Gobierno de Estados Unidos construyó la primera embarcación a motor con dimensiones de 5,5 m de eslora y un casco de 1,9 cm de espesor a la que se le dio el nombre de "concreto".

A principios de los años 40 el ingeniero-arquitecto italiano, Pier Luigi Nervi perfeccionó la idea de Lambot al darse cuenta que reforzando el concreto con capas de malla de alambre se obtiene un material con propiedades mecánicas de un material homogéneo, con gran resistencia al impacto y lo

utilizó en todo tipo de diseño en construcciones, tal como diversas techumbres que hoy en día todavía se conservan como modelos racionales y estéticos de diseño estructural.

El ingeniero Nervi fue el primero en utilizar el material ferrocemento en edificios, bodegas y en la construcción de un techo para la alberca de la academia naval italiana con una cubierta de 15 m y después en la elaboración de un techo con una luz de 91 m que es la famosa Sala de Exhibición de Turín. Se puede decir que Nervi “inventó” el ferrocemento tal como lo conocemos en nuestra actualidad con las características de un material resistente, duradero, liviano y con fácil manipulación, compuesta de una malla de acero y mezclada con mortero de alta resistencia.

A principios de 1977, el Instituto Americano del Concreto (ACI) estableció el comité 549 sobre el ferrocemento, para dar seguimiento del estado actual de la tecnología y para dar un posible reglamento para la práctica de este material.

Este tipo de tecnología es muy utilizado por todo el mundo sobre todo en techos curvos y grandes, así como paneles prefabricados y embarcaciones. La resistencia del ferrocemento se debe a su armadura que está compuesta por varias capas de malla de acero de poco espesor y ligeramente desplazadas entre sí, que le da una mayor resistencia a los esfuerzos a tensión y con la ayuda de concreto para soportar los esfuerzos a compresión, lo hacen una materia altamente resistente a cargas por flexión.

### **1.5.1.7. Materiales que lo constituyen**

Los requisitos generales para los materiales que componen el ferrocemento son: resistencia a compresión, resistencia a los ataques químicos, impermeabilidad, dureza y, lo más importante, que su consistencia se mantenga compacta, uniforme y sin huecos a la hora de penetrar sobre el refuerzo y las mallas. Con los requisitos presentados derivamos los materiales a utilizar:

#### **1.5.1.7.1. Mortero**

Material adhesivo en el ferrocemento que lleva el nombre de mortero, esta mezcla está compuesta por materiales como el cemento hidráulico (aglutinante), arena (agregado fino), agua y aditivos, dado que estos elementos aportan sus distintas propiedades a la mezcla. Las relaciones para preparar esta mezcla varían, dependiendo de la resistencia que se quiere obtener, las más recomendadas son la: relación arena/cemento de 1,5 a 2,5 por peso y la relación de agua/cemento de 0,35 a 0,5 por peso.

El cemento es un material con propiedades de adherencia y cohesión que lo hacen capaz de aglutinar fragmentos minerales de una masa compacta, el más utilizado y de fácil adquisición en nuestro medio es el cemento portland. El cemento Portland tipo I y tipo II son adecuados para estos modelos de estructuras siempre y cuando no se presentan condiciones especiales.

La arena empleada debe ser inerte, limpia y libre de toda materia orgánica y relativamente sin limo ni arcilla. Las partículas deben tener un cierto tamaño máximo capaz de pasar por el tamiz #8, pero también pueden trabajarse con arenas ligeras ya que estas tienen la propiedad de reducir la densidad y la resistencia de esta.

Las normas Coguanor 410066 y ASTM C144 recomiendan los límites permisibles de los agregados para el diseño del mortero, así como rangos permisibles para otras propiedades. Ya que con una buena granulometría en el mortero obtendremos un estado plástico correcto, así como en la resistencia del mismo.

El mortero posee propiedades en sus dos estados, en su estado plástico se encuentra la trabajabilidad que es la combinación de propiedades como plasticidad, consistencia, cohesión y adherencia, y en su estado de fraguado posee propiedades tales como durabilidad, elasticidad y resistencia a compresión, estas propiedades del mortero se rigen por el tipo y la calidad de los materiales que lo constituyen.

#### **1.5.1.7.2. Calidad del agua**

El agua debe ser potable y libre de toda materia orgánica, ácidos, sales, y otras impurezas que puedan afectar la resistencia del mortero, así como el exceso de agua que puede afectar en la corrosión del refuerzo.

#### **1.5.1.7.3. Aditivos**

Generalmente el uso de aditivos es para alterar o mejorar una o más de las propiedades del elemento en que se utiliza, pero una de las características del aditivo es mejorar la trabajabilidad, para reducir el exceso de agua y prolongar el fraguado del mortero, los aditivos más usados en la elaboración del ferrocemento son los siguientes:

- Aditivos reductores de agua: tipo A: ASTM C494-71
- Aditivos retardantes: Tipo B: ASTM C494-71

- Aditivos reductores de agua y retardantes: Tipo D: ASTM C494-71
- Aditivos reductores de agua y acelerantes: Tipo E: ASTM C494-71

#### **1.5.1.7.4. Agregados**

Es todo el material inerte disperso dentro de la mezcla de cemento, donde este material ocupa del 60 al 70 % del volumen del mortero. Los agregados para las estructuras de ferrocemento deben ser fuertes, impermeables y tener una mezcla trabajable con las relaciones ya dadas en la elaboración del mortero para poder penetrar apropiadamente la malla de refuerzo. El agregado utilizado normalmente es arena y la granulometría de las partículas está dada por las especificaciones C33-74<sup>a</sup> de la Norma ASTM para los agregados de concreto.

#### **1.5.1.7.5. Refuerzo de acero**

Se utiliza principalmente para hacer el armazón de la estructura sobre el cual van colocadas las diferentes capas de malla. Tanto las varillas longitudinales y las transversales se distribuyen uniformemente y se les da la forma deseada. Estos tipos de refuerzos pueden ser de diferentes modelos como lo son el refuerzo corrugado o liso, pero con un rango de diámetros pequeños que varían de 0,42 a 0,95 cm (0,165 a 3/8 de pulgada) siendo el más común el de 0,63 cm (1/4 de pulgada). Ya que nos permiten su manejabilidad sin restringir su resistencia y rigidez que estos elementos transmiten a la estructura.

Es imprescindible considerar que en la armadura pueden llegar a existir traslapes y para sujetar estas varillasse emplea de alambre de amarre para unir las y forma un solo elemento y esto al final incrementa el espesor de la cubierta.

El sistema o armazón que se fabricó debe ir fijado en los bordes de la estructura, usualmente es una solera final o de corona mediante pines que se dejan al final de la fundición para poder acoplar la estructura a la cubierta diseñada.

#### **1.5.1.7.6. Mallas de refuerzo**

Uno de los elementos principales del ferrocemento es la malla de acero, que consiste en alambres delgados entreteljidos o soldados para formar la malla, pero el objetivo principal es que sea de fácil manipulación y flexible para poder hacer dobleces en esquinas agudas. La función de la malla de acero y los refuerzos longitudinales o transversales es, en primer lugar actuar como un marco para dar forma y sostener el mortero fresco, y cuando el mortero se endurece la función de la varilla es absorber todos los esfuerzos a tensión sobre la estructura y trabajar como un diafragma, ya que por sí solo el mortero no podría soportar esos esfuerzos.

Los principales tipos de mallas que se utilizan para el ferrocemento son varios. Tales como malla de alambre soldado, malla entreteljida, malla de metal desplegado, malla Watson y la más comercial e utilizada en nuestro ámbito es la malla hexagonal, que servirá para la construcción de la cubierta a dos aguas.

#### **1.5.1.7.7. Malla hexagonal**

Esta es la malla más comercial en la mayor parte de los países y Guatemala no es la excepción, es de fácil adquisición, fácil manejo y la más económica. Popularmente se le conoce como malla de gallinero y se fabrica con alambre estirado en frío que se entretelje en patrones hexagonales. La malla de

alambre utilizada en el ferrocemento tiene diámetros que van desde 0,05 a 0,1 cm y aberturas entre ellas que varían de 1 a 2,5 cm.

- Especificaciones de la malla hexagonal (As') de ½":
- Separación de entorchado = 1,25 cm
- Numero de alambres por unidad de longitud = 151 alambres/metro
- Diámetro de alambre = 0,065 cm
- Espesor de la malla = 1,4 mm
- Área de alambre = 0,0033167 cm<sup>2</sup>
- Contenido de acero = 410 kg/m<sup>3</sup>
- Esfuerzo máximo promedio = 3 919,7 kg/cm<sup>2</sup>
- Peso por unidad de superficie = 0,60 kg/cm<sup>2</sup>
- Esfuerzo de fluencia = 2 180 kg/cm<sup>2</sup>

### **1.5.2. Combinación del bambú y ferrocemento**

La combinación del bambú con el ferrocemento tiene como objetivo principal crear un nuevo sistema de techo para la sociedad guatemalteca con el fin de proporcionar un techo durable, resistente, impermeable, de fácil adquisición de los materiales con un bajo costo en los elementos que lo constituyen, y que no se necesite de mano de obra calificada para su elaboración.

Las características físicas del elemento creado es dar una vista agradable al interior de la vivienda por medio de la belleza del bambú con diferentes tipos de acabados, o ya sea solo con un tipo de barnizado para evitar los ataques de bichos, asimismo, dar resistencia y durabilidad en el exterior de la cubierta por medio de un recubrimiento de una pulgada compuesta de ferrocemento ya que

esta capa trabajará como un impermeabilizante que protege al bambú de filtraciones así como ataques químicos y biológicos.

La característica mecánica que se quiere lograr en la estructura es de someterla a flexión, que pueda resistir las cargas de trabajo con la que va a ser diseñada y que trabaje como un diafragma que disperse los esfuerzos a las vigas superiores, estas a su vez a las columnas y de las columnas a los cimientos. En un caso muy extremo a la hora del colapso del elemento uno de los objetivos es de que el sistema dé tiempo de evacuación y que no cause mayores daños a la estructura y a los residentes.

### **1.5.3. Ventajas y desventajas del sistema**

Uno de los motivos de la propuesta de techos de bambú ferrocemento es colaborar a resolver el déficit habitacional de la República de Guatemala, dándole a la población la oportunidad de tener una cubierta sismo resistente e impermeable ya que a menudo en el país ocurren movimientos sísmicos y cambios climáticos tales como lluvias torrenciales, fuertes vientos y calor. Este tipo de techo se compone por materiales de fácil adquisición, costos moderados o bajos a comparación de otros sistemas.

Este sistema constructivo propuesto se aplicará en una cubierta inclinada a dos aguas y los materiales base a utilizar son el bambú y el ferrocemento que se especificarán más adelante, así como sus características físicas y mecánicas, este tipo de techo posee ventajas y desventajas por su forma geométrica y su uso que se detalla a continuación:

### **1.5.3.1. Ventajas**

- Este tipo de sistema es ideal para clima cálido – húmedo, ya que las pendientes de la cubierta con amplios voladizos facilitan el drenaje de las precipitaciones donde estas protegen los muros exteriores, así como la disminución de los rayos ultravioleta hacia el interior de la vivienda.
- Es de fácil construcción y no se necesita mano de obra calificada, la adquisición de los materiales, es cómoda ya que son de fácil alcance y de bajo costo a comparación de los sistemas tradicionales, tales como losas de concreto, losas de vigueta y bovedilla, losas prefabricadas y otras.
- Permite la colocación de ventanas en el extremo superior de los muros extremos de la vivienda para evitar o disminuir todo tipo de condensación formada dentro del interior de la vivienda, así como iluminación natural a todo el sistema interno.
- Es adecuado para lugares sísmicos, ya que los materiales propuestos son resistentes para zonas sísmicas, como se indica en el diseño de la cubierta.

### **1.5.3.2. Desventajas**

- Este tipo de cubiertas no son transitables, donde las pendientes son mayores al 15 % y por lo tanto no se pueden realizar actividades sobre la misma, solo el tipo de mantenimiento requerido.

- Con la cubierta a dos aguas se produce un problema, que es dejar descubierto los muros extremos de la vivienda, por lo tanto causa fisuramiento o agrietamiento por las inclemencias del tiempo, ya que no están protegidas por ningún sistema constructivo y para cubrir esta dificultad se recomienda la construcción de un techo a cuatro aguas.
- La impermeabilización del sistema con una membrana de ferrocemento a prueba de agua puede llegar a ser inadecuada ya que el vapor del clima no puede escapar y esto causa condensación dentro del interior de la vivienda.

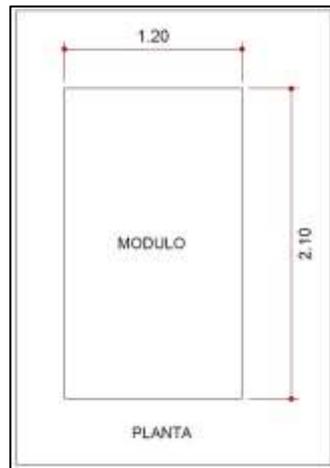
## **2. DISEÑO DEL TECHO PROPUESTO COMPUESTO DE BAMBÚ-FERROCEMENTO A DOS AGUAS PARA VIVIENDAS UNIFAMILIARES**

### **2.1. Características geométricas**

La cubierta está compuesta por dos módulos de bambú con ferrocemento, unidas a una viga de bambú fundida con mortero, por medio de tres pernos en el extremo superior de cada módulo, estos a la vez forman un sistema constructivo con características geométricas de un triángulo isósceles, con un ángulo de referencia de  $27^\circ$ . La predilección del ángulo propuesto respecto al horizonte se debe a que es el óptimo para el equilibrio de fuerzas de empuje y succión del viento.

Cada módulo del techo tiene características iguales cuyas dimensiones son las siguientes.

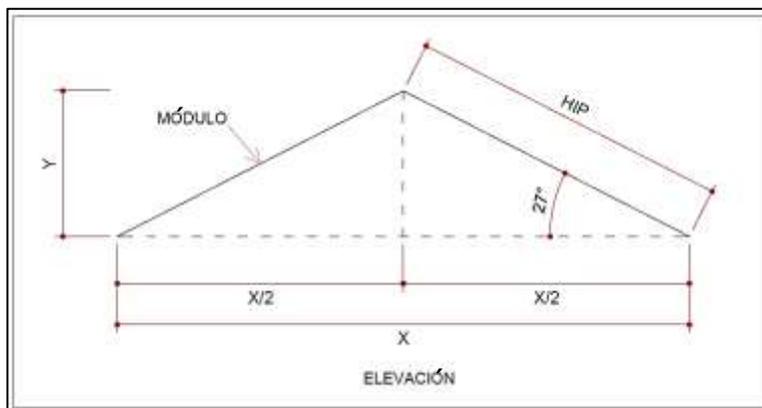
Figura 11. Dimensiones del módulo



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

A continuación, se detallan las características geométricas del triángulo isósceles y las ecuaciones a utilizar para encontrar las variantes que se necesitarán más adelante para el diseño de la cubierta.

Figura 12. Elevación del sistema a dos aguas



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

$$\theta = 27^\circ$$

$$\text{hip} = 2,10 \text{ mts}$$

$$\sin \theta = \frac{y}{h}$$

$$\cos \theta = \frac{x}{h}$$

$$y = \sin \theta * \text{hip}$$

$$y = \sin 27^\circ * 2,10 \text{ mts}$$

$$y = 0,95 \text{ mts}$$

$$x/2 = \cos \theta * \text{hip}$$

$$x/2 = \cos 27^\circ * 2,10 \text{ mts}$$

$$x/2 = 1,87 \text{ mts}$$

Por lo tanto, la longitud total "X" de la cubierta es de 3,74 mts.

En cada módulo se utilizan 8 piezas de bambú de 3" de diámetro, seccionados a la mitad, donde se obtienen 16 secciones, que se emplean en la construcción de los nervios de cada módulo. Se hace un muestreo de 5 piezas al azar para poder obtener el espesor y diámetro promedio del bambú a utilizar para el diseño de la viga T que trabajará como una viga b\*d debido a la distancia del eje neutro en la parte inferior del alma.

Tabla I. **Tabulación de diámetros y espesores de bambú**

<b>Diámetros (cms)</b>	<b>Espesores (cms)</b>
$\Phi 1 = 7,50$	t1 = 0,80
$\Phi 2 = 7,45$	t2 = 1,00
$\Phi 3 = 7,35$	t3 = 1,20
$\Phi 4 = 7,30$	t4 = 0,90
$\Phi 5 = 7,40$	t5 = 1,10
$\Phi_{\text{prom.}} = 7,40 \text{ cms}$	t <sub>prom.</sub> = 1,00 cms

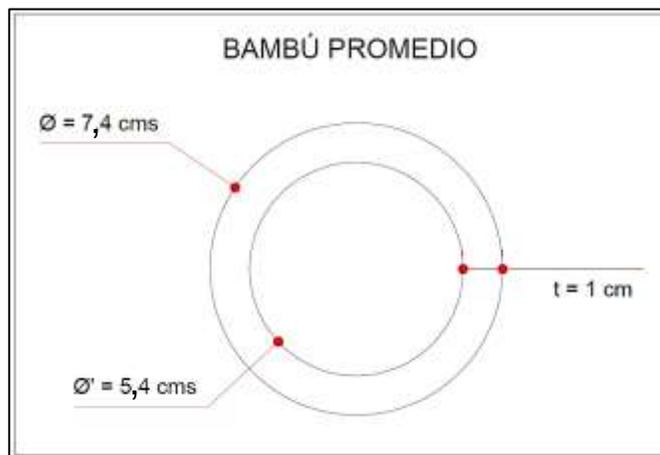
Fuente: elaboración propia.

$$\Phi' = (\Phi_{\text{prom}} - 2t_{\text{prom}})$$

$$\Phi' = (7,40 \text{ cms} - 2(1,00 \text{ cms}))$$

$$\Phi' = 5,40 \text{ cms}$$

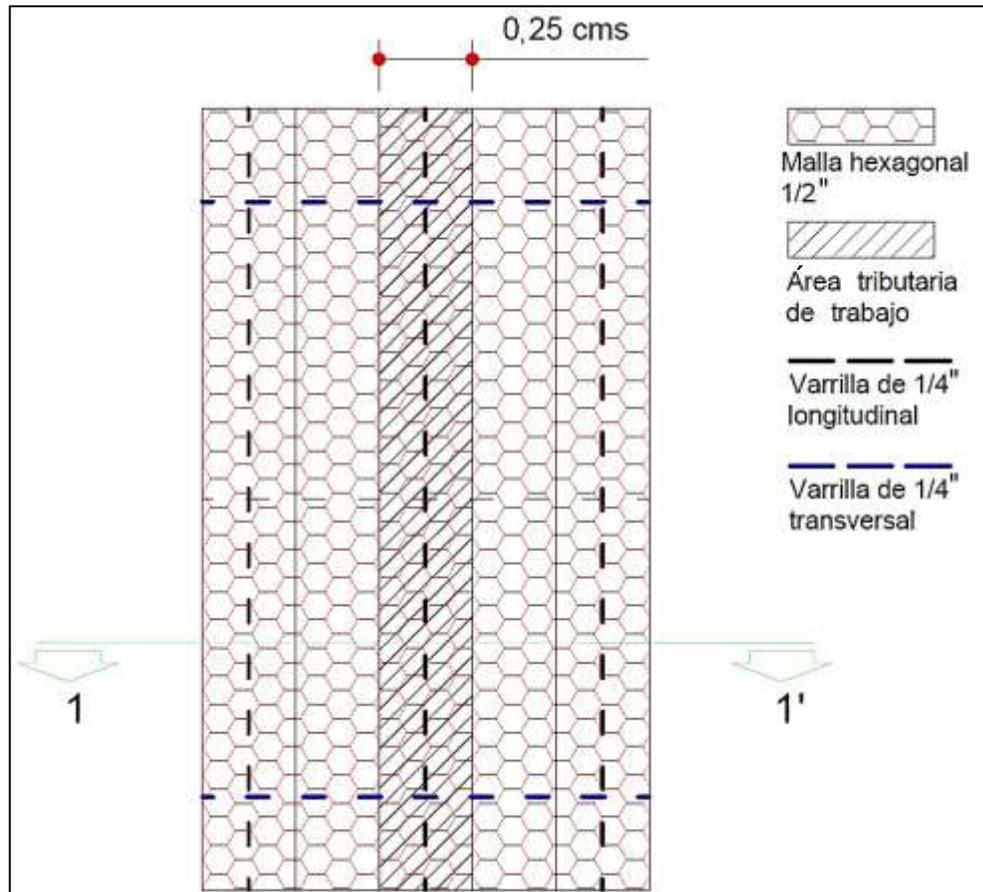
Figura 13. **Esquema de bambú promedio**



Fuente: elaboración propia, empleando programa AutoCAD.

A continuación, se detalla el módulo a trabajar con las diferentes partes que lo componen, así como el bambú de 2,92" de diámetro promedio que servirá como nervios en el módulo, malla hexagonal de  $\frac{1}{2}$ ", tres varillas longitudinales de  $\frac{1}{4}$  y tres varillas transversales de  $\frac{1}{4}$  que servirán como rigidizaste para el modulo.

Figura 14. **Detalles de cómo está compuesto el módulo de bambú–ferrocemento**

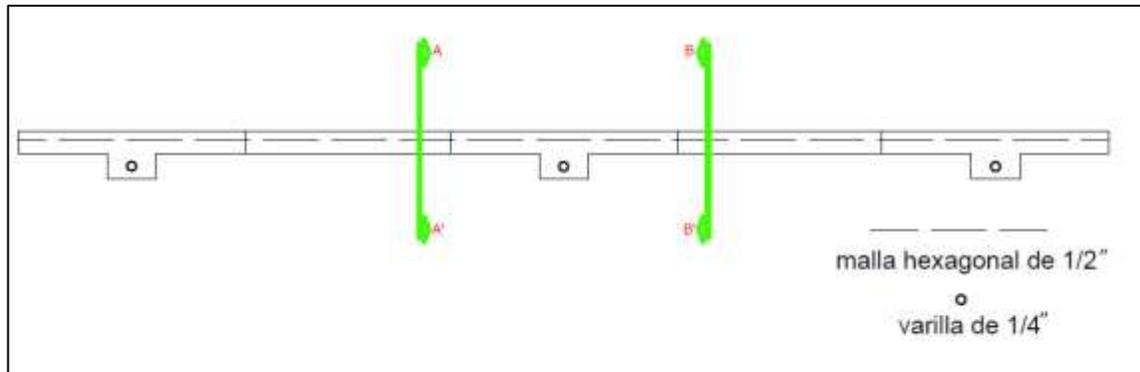


Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

En el corte 1 – 1' se muestra el siguiente esquema donde se indica cómo están colocadas las 16 secciones del bambú que funcionan como formalerta u obra falsa y sus tres refuerzos longitudinales dándole una mayor flexión al módulo, sabiendo que también el bambú es resistente a tensión, dándole una mayor resistencia a tensión a todo el módulo.



Figura 17. Elevación del módulo, viga "T"



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

## 2.2. Diseño de viga "T"

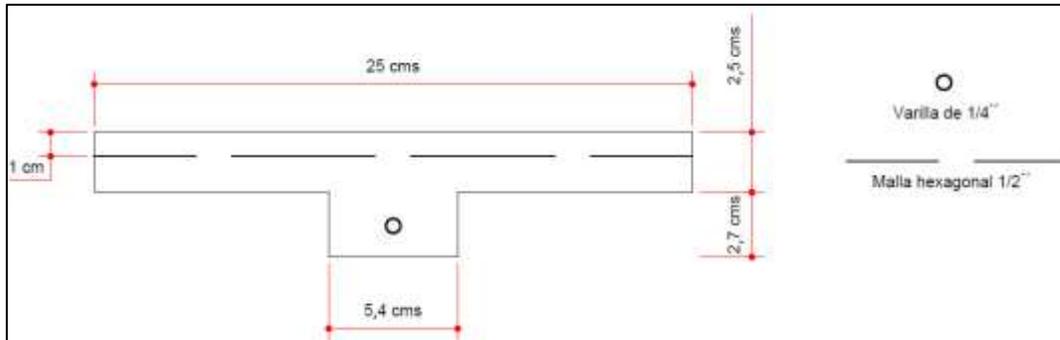
A continuación se explicará el diseño de viga "T".

### 2.2.1. Cargas Distribuidas

Para diseñar la viga "T" de ferrocemento se utiliza la sección crítica del módulo, esta se encuentra a la mitad de la misma. Se le aplica un corte en ambas direcciones perpendiculares al módulo donde a continuación, se detalla el área tributaria a trabajar.

El ancho del alma de la viga rectangular es equivalente al diámetro interno del bambú que es igual 5,40 cms, con una altura de 2,7 cms, un espesor de 2,5 cms y una base de 25 cms.

Figura 18. Esquema de viga "T"



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

### 2.2.1.1. Carga muerta

La carga distribuida se encuentra de la siguiente manera:

- Peso propio de la viga crítica a diseñar
- Proyección horizontal de 1,87 mts. (1 módulo)

$$W_m = \text{vol. sección} * \gamma. \text{concreto}$$

$$W_m = [((0,25\text{m})(0,025\text{m}) + (0,054\text{ m})(0,027\text{m}))(1,87\text{ m})] \left( 2400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

$$W_m = 34,59 \text{ kg}$$

Para calcular la carga muerta distribuida se divide el peso muerto calculado sobre la proyección horizontal de la cubierta.

$$C_m = W_m / l$$

$$C_m = 34,59 \text{ kg} / 1,87 \text{ mts}$$

$$C_m = 18,50 \text{ kg/m}$$

### 2.2.1.2. Carga viva

Según Agies NSE 2 – 10 en su capítulo 3 en la tabla 3 – 1 indica que para cubiertas livianas se utiliza una carga viva de 50 kg/m<sup>2</sup>. Esta carga viva se aplica sobre la proyección horizontal de la cubierta.

Tabla II. **Carga viva para cubiertas livianas**

Tipo de ocupación o uso	$W_v \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right)$
Cubiertas livianas (inciso 3,3 (g))	
Para cubiertas con planchas livianas	50 <sup>(a)</sup>

Nota: (a) sobre proyección horizontal

Fuente: elaboración propia, AGIES NSE 2-10 tabla 3 – 1.

$$W_v = \text{Area tributaria} * (\text{carga viva})$$

$$W_v = (0,25\text{m} * 1,87\text{m}) \left( 50 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right)$$

$$W_v = 23,38 \text{ kg}$$

Para calcular la carga viva distribuida se divide el peso vivo calculado sobre la proyección horizontal de la cubierta.

$l$  = longitud en proyección horizontal

$$C_v = W_v / l$$
$$C_v = 23,38 \text{ kg} / 1,87 \text{ mts}$$

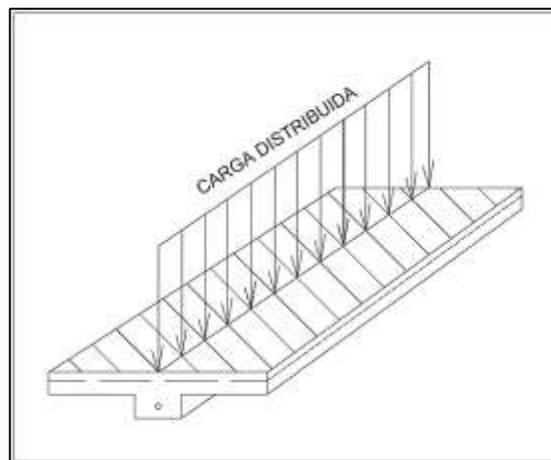
$$C_v = 12,50 \text{ kg/m}$$

### 2.2.1.3. Carga última de diseño

La carga última según ACI 318S-11 Apéndice C 9.2.1 es igual a:

$$C_u = 1,7C_v + 1,4C_m$$
$$C_u = 1,7 \left( 12,50 \text{ kg/m} \right) + 1,4 \left( 18,50 \text{ kg/m} \right)$$
$$W = C_u = 47,15 \text{ kg/m}$$

Figura 19. **Carga distribuida sobre el área crítica del módulo**



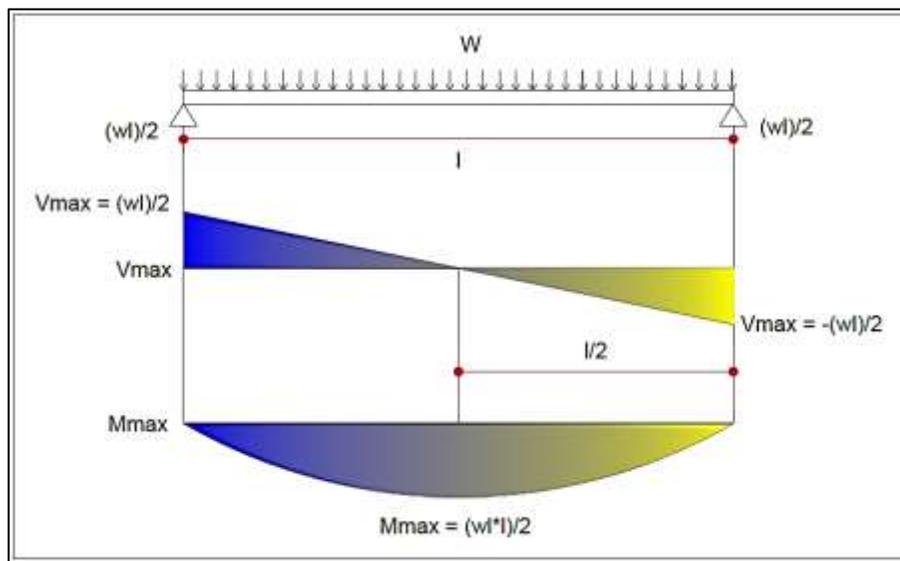
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

La carga última distribuida a utilizar en el área tributaria de la viga "T" es de 47,15 kg/m.

### 2.2.2. Cálculo de momentos y cortantes para una viga simplemente apoyada

A continuación en la figura 20 se explicará los cálculo de momento y cortantes para una viga.

Figura 20. Esquema de momento y corte de una viga simplemente apoyada



Fuente: elaboración propia.

#### 2.2.2.1. Momento máximo ( $M_{max}$ )

$$M_{max} = Wl^2/8$$

$$M_{\max} = \frac{\left(47,15 \text{ kg/m}\right) \left((1,87\text{m})^2\right)}{8}$$

$$M_{\max} = 20,6099 \text{ kg} - \text{m}$$

$$M_{\max} = 2\,060,99 \text{ kg} - \text{cm}$$

### 2.2.2.2. Cortante máximo (Vmax)

$$V_{\max} = Wl/2$$

$$V_{\max} = \frac{\left(47,15 \text{ kg/m}\right) (1,87\text{m})}{2}$$

$$V_{\max} = 44,08 \text{ kg}$$

### 2.2.3. Diseño de refuerzo de acero

Es un importante material para la industria de la construcción utilizado para el refuerzo de estructuras y demás obras que requieran de este elemento.

#### 2.2.3.1. Malla hexagonal (As')

Las características de la malla hexagonal de 1/2" son las siguientes:

- Separación de entorchado = 1,25 cm
- Número de alambres por unidad de longitud = 151 alambres/mt.
- Diámetro de alambre = 0,065 cm
- Área de alambre = 0,0033167 cm<sup>2</sup>
- Esfuerzo máximo promedio = 3 919,7 kg/cm<sup>2</sup>
- Peso por unidad de superficie = 0,60 kg/cm<sup>2</sup>

- Esfuerzo de fluencia = 2 180 kg/cm<sup>2</sup>
- Características del mortero:
- Fluencia del mortero = 280 kg/cm<sup>2</sup>

$$a = \frac{As' * fy}{0,85 * f'c * b}$$

$$As = \frac{Mu}{0,9 * fy * (d - a/2)}$$

$$fy = 2180 \text{ kg/cm}^2$$

$$f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Base (b)} = 25 \text{ cms}$$

$$\text{Espesor (t)} = 2,5 \text{ cms}$$

$$\text{Recubrimiento (rec)} = 1 \text{ cms}$$

$$\text{Peralte (d)} = t - \text{rec}$$

$$d = 1,5 \text{ cms}$$

$$a = \frac{As * \left( 2180 \text{ kg/cm}^2 \right)}{0,85 * \left( 280 \text{ kg/cm}^2 \right) * 25 \text{ cms}}$$

$$a = 0,3664 * As$$

$$As = \frac{(2060,99 \text{ kg} - \text{cm})}{0,9 * \left( 2180 \text{ kg/cm}^2 \right) * (1,5 - a/2)}$$

$$As = \frac{1,0505}{(1,5 - a/2)}$$

Encontrar el área de acero de la malla hexagonal  $As'$  y “a” por medio del método de iteraciones.

$$a = 0,3664 * As$$

$$As = \frac{1,0505}{(1,5 - a/2)}$$

Se crea una tabla para encontrar el  $As'$  de diseño y compararla con el  $As'$  experimental, donde se chequea si resiste las cargas de diseño propuesta.

Tabla III. **Cálculo del área de acero en viga “T”**

a	as	a
1	1,0505	0,3849032
0,3849032	0,80341194	0,29437014
0,29437014	0,77652898	0,28452022
0,28452022	0,77371226	0,28348817
0,28348817	0,77341831	0,28338047
0,28338047	0,77338765	0,28336924
0,28336924	0,77338445	0,28336806
0,28336806	0,77338412	0,28336794
0,28336794	0,77338409	0,28336793
0,28336793	0,77338408	0,28336793
0,28336793	0,77338408	0,28336793
0,28336793	0,77338408	0,28336793

Fuente: elaboración propia.

$As'$  de diseño = 0,77 cms<sup>2</sup>

### 2.2.3.2. Cálculo experimental del área de acero de la malla hexagonal de 1/2"

Según las características de la malla hexagonal el área de acero es de 0,0033167 cms<sup>2</sup>.

Número de alambres por unidad de longitud es de 151 alambres/ml.

$$\begin{aligned}As &= A_{\text{alambre}} * \text{Núm. alambres/ml} \\As &= (0,0033167 \text{ cms}^2)(151 \text{ alambres/ml}) \\As &= 0,50 \text{ cms}^2/\text{ml}\end{aligned}$$

El área de acero se multiplica por la longitud proyectada del módulo que es igual a 1,87 mts y se obtiene el área de acero experimental de la viga "T".

$$\begin{aligned}As &= \left(0,50 \frac{\text{cms}^2}{\text{ml}}\right) * (1,87 \text{ mts}) \\As &= 0,92 \text{ cms}^2\end{aligned}$$

Para que se cumpla la condición y se continúe con los cálculos siguientes, el área de acero experimental tiene que ser mayor que el área de acero de diseño obtenido.

$$\begin{aligned}As_{\text{experimental}} &\geq As_{\text{diseño}} \\0,92 \text{ cms}^2 &\geq 0,77 \text{ cms}^2\end{aligned}$$

Como 0,92 cms<sup>2</sup> es mayor que 0,77 cms<sup>2</sup>, entonces el refuerzo a compresión resiste las cargas en la viga T y por lo tanto sí chequea.

### 2.2.3.3. Refuerzo en el nervio

$$A_{smin} = \frac{14,1}{f_y} bd$$
$$A_{smin} = \frac{14,1}{2\,800 \text{ kg/cm}^2} [(3,8815 \text{ cms})(5,40 \text{ cms})]$$
$$A_{smin} = 0,1055 \text{ cm}^2$$

Para el diseño experimental del refuerzo a tensión se sugiere una varilla de ¼" con una fluencia de acero de 2 800 kg/cm<sup>2</sup>, y un área de acero de 0,32 cms<sup>2</sup>.

$$A_{s \text{ experimental}} \geq A_{s \text{ diseño}}$$
$$0,32 \text{ cms}^2 \geq 0,11 \text{ cms}^2$$

Sí se cumple la condición, por lo tanto se puede continuar con los cálculos.

### 2.2.4. Chequeo en la deformación de los nervios

La deflexión máxima admisible se calcula con base en el Código ACI 318S-11 tabla 9,5 (b) para cubiertas planas que no soporten equipos pesados que sufran daños debidos a deflexiones grandes.

$$Def \text{ max permitida} = \frac{l}{180}$$
$$Def \text{ teórica} = \frac{-5Wl^4}{384EI}$$
$$Def \text{ max permitida} \geq Def \text{ teórica}$$

#### 2.2.4.1. Cálculo de la deformación máxima permitida

$$Def \text{ max} = \frac{187 \text{ cms}}{180}$$

$$Def \text{ max} = 1,04 \text{ cms}$$

#### 2.2.4.2. Cálculo de la deformación teórica

Módulo de elasticidad

$$Ec = 15\ 100(f'c)$$

$$Ec = 15\ 100(280 \text{ kg/cm}^2)$$

$$Ec = 25\ 2\ 671,33 \text{ kg/cm}^2$$

Inercia del nervio

$$I = \frac{1}{12}bh^3$$

$$I = \frac{1}{12}(5,40 \text{ cm})(5,20 \text{ cm})^3$$

$$I = 63,2734 \text{ cms}^4$$

Deflexión teórica

$$Def \text{ teórica} = \frac{-5Wl^4}{384EI}$$

$$Def \text{ teórica} = \frac{5 \left( 0,4715 \frac{kg}{cm} \right) (187cms)^4}{384(252\,671,33 \frac{kg}{cm^2})(63,2736cms^4)}$$

$$Def \text{ teórica} = 0,47 \text{ cms}$$

$$Def \text{ max permitida} \geq Def \text{ teórica}$$

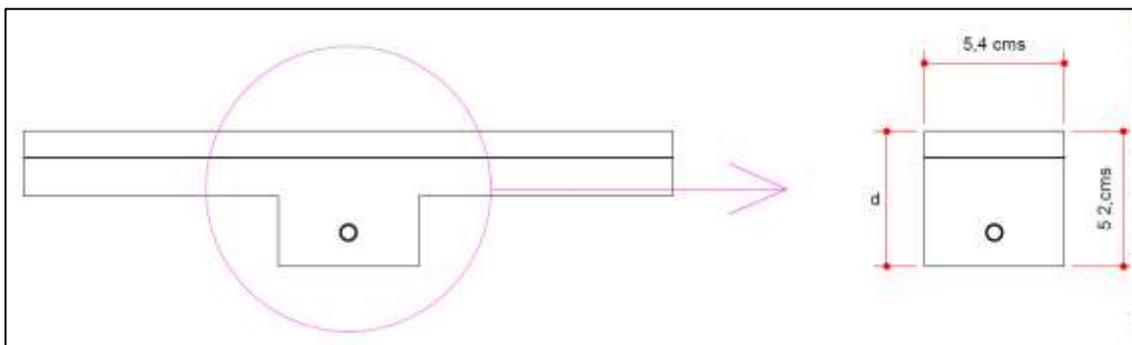
$$1,04 \text{ cms} \geq 0,47 \text{ cms}$$

La deformación máxima permitida es mayor a la deformación teórica calculada, por lo tanto, sí cumple con la condición y se continúa con los cálculos.

### 2.2.5. Chequeo de momentos en el nervio a base de ferrocemento

A continuación se explicará el chequeo de momentos en el nervio a base de ferrocemento.

Figura 21. Esquema del nervio reforzado



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

$$b = 5,40 \text{ cms}$$

$$h = 5,20 \text{ cms}$$

$$l = 1,87 \text{ mts}$$

$$rec = 1 \text{ cm}$$

$$d = ?$$

$$M_{max} = 2\,060,99 \text{ kg} - \text{cm}$$

El diámetro de una varilla de 1/4" es de 0,635 cms

$$d' = rec + \frac{\phi}{2} \text{ malla hex}$$

$$d' = 1 \text{ cm}$$

$$d = h - d' - \frac{\phi}{2} \text{ varilla de } 1/4''$$

$$d = 5,20 \text{ cm} - 1 \text{ cm} - \frac{0,635}{2} \text{ cm}$$

$$d = 3,8815 \text{ cms}$$

Área de acero mínimo:

$$A_{smin} = \frac{14,1}{f_y} bd$$

$$A_{smin} = \frac{14,1}{2\,800 \text{ kg/cm}^2} [(3,8815 \text{ cms})(5,40 \text{ cms})]$$

$$A_{smin} = 0,1055 \text{ cm}^2$$

### 2.2.5.1. Área de acero propuesta

Varilla de 1/4" de diámetro y área de acero de 0,32 cms<sup>2</sup>.

Cálculo del área de acero con la cuantía mínima.

$$a = \frac{As * fy}{0,85 * f'c * b}$$

$$As = \frac{Mu}{0,9 * fy * (d - a/2)}$$

Con un  $f_y = 40\ 000\ \text{PSI} = 2\ 800\ \text{kg/cm}^2$ .

$$a = \frac{0,11\text{cm}^2 * \left(2\ 800\ \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}\right)}{0,85 * \left(280\ \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}\right) * 5,40\ \text{cms}}$$

$$a = 0,2397\ \text{cms}$$

$$As = \frac{(2\ 060,99\ \text{kg} - \text{cm})}{0,9 * \left(2\ 800\ \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}\right) * \left(3,8815 - \frac{0,2397}{2}\right)}$$

$$As = 0,22\ \text{cm}^2$$

Por lo tanto, se utiliza una varilla de  $\frac{1}{4}$ " de diámetro con una fluencia del acero  $f_y = 2\ 800\ \text{kg/cm}^2$  y un área de acero de  $0,32\ \text{cms}^2$ .

Se procede a comprobar el momento resistente con un área de acero de  $0,32\ \text{cms}^2$ .

$$a = \frac{As * fy}{0,85 * f'c * b}$$

$$M_{res} = 0,9 * As * fy * (d - a/2)$$

$$a = \frac{0,32\text{cm}^2 * \left(2\,800 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}\right)}{0,85 * \left(280 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}\right) * 5,40 \text{ cms}}$$

$$a = 0,6972 \text{ cms}$$

$$M_{res} = 0,9 * 0,32\text{cm}^2 * 2\,800 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} * \left(3,8815 - \frac{0,6972}{2}\right)$$

$$M_{res} = 2\,848,93 \text{ kg} - \text{cm}$$

$$\text{Momento resistente (M}_{res}) \geq \text{Momento actuante (M}_{act})$$

$$2\,848,93 \text{ kg} - \text{cm} \geq 2\,060,99 \text{ kg} - \text{cm}$$

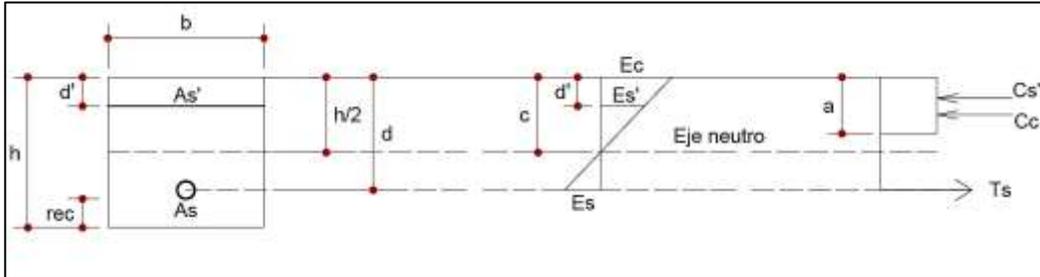
El momento resistente es mayor al momento actuante, por lo tanto, sí cumple con la condición.

Entonces se utiliza una varilla de ¼” de diámetro y con fluencia del acero de 2 800 kg/cm<sup>2</sup> la cual ha de trabajar a flexión.

### **2.3. Encontrar el momento nominal, carga nominal y su excentricidad por medio del rectángulo equivalente**

La viga “T” trabaja como una viga rectangular b\*h.

Figura 22. Esquema del rectángulo equivalente



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

El diámetro de una varilla de 1/4" es de 0,635 cms.

$$d' = rec + \frac{\phi}{2} \text{ malla hex}$$

$$d' = 1 \text{ cm}$$

$$d = h - d' - \frac{\phi}{2} \text{ varilla de } 1/4''$$

$$d = 5,20 \text{ cm} - 1 \text{ cm} - \frac{0,635}{2} \text{ cm}$$

$$d = 3,8815 \text{ cms}$$

La máxima deformación utilizable en la fibra comprimida extrema del hormigón se asumirá igual a:

$$\varepsilon_c = 0,003$$

### 2.3.1. Deformación del acero ( $\varepsilon_s$ )

Módulo de elasticidad del acero  $E = 2 * 10^6 \text{ kg/cm}^2$

Fluencia del acero  $f_y = 2800 \text{ kg/cm}^2$

$$E = f_y / \varepsilon_s$$

$$\varepsilon_s = f_y / E$$

$$\varepsilon_s = \frac{2800 \text{ kg/cm}^2}{2 * 10^6 \text{ kg/cm}^2}$$

$$\varepsilon_s = 0,0014$$

### 2.3.2. Deformación de la malla hexagonal ( $\varepsilon_s'$ )

Módulo de elasticidad de la malla hexagonal  $E = 1,04 * 10^6 \text{ kg/cm}^2$

Fluencia de la malla hexagonal  $f_y = 2180 \text{ kg/cm}^2$

$$E = f_y / \varepsilon_s'$$

$$\varepsilon_s' = f_y / E$$

$$\varepsilon_s' = \frac{2180 \text{ kg/cm}^2}{1,04 * 10^6 \text{ kg/cm}^2}$$

$$\varepsilon_s' = 0,002096$$

“Los requisitos de ACI 318 -10.2.7.1 se pueden considerar satisfechos con una distribución rectangular de tensiones equivalente en el hormigón, definida de la siguiente manera: Se asumirá una tensión en el hormigón de  $0,85f'_c$  uniformemente distribuida en una zona de compresión equivalente limitada por los bordes de la sección transversal y una recta paralela al eje neutro ubicada a una distancia  $a = \beta_1 c$  a partir de la fibra con máxima de formación específica de compresión. La distancia  $c$  entre la fibra con máxima de formación específica de compresión y el eje neutro se deberá medir en dirección perpendicular a dicho eje. El factor  $\beta_1$  se deberá tomar igual a 0,85 para resistencias  $f'_c$  de hasta 4 000 psi y se deberá disminuir de forma progresiva en 0,05 por cada 1 000 psi de resistencia en exceso de 4 000 psi, pero  $\beta_1$  no se deberá tomar menor que 0,65”, (Ing. Mario Corzo, Libro Sabandija CA2).

$$c = \frac{0,003 (3,8825 \text{ cms})}{0,0014 + 0,003}$$

$$c = 2,6472 \text{ cms}$$

$$a = \beta c$$

Donde: ACI-318-08 10.2.7.3

$$\beta_1 = 0,85 \quad \text{para } f'_c \leq 30 \text{ Mpa}$$

$$a = 0,85 (2,6472 \text{ cms})$$

$$a = 2,25 \text{ cms}$$

$$\frac{\epsilon'_s}{c - d'} = \frac{\epsilon_c}{c}$$

$$\varepsilon'_s = \frac{\varepsilon_c (c - d')}{c}$$

$$\varepsilon'_s = \frac{0,003 (2,6472 - 1)}{2,6472}$$

$$\varepsilon'_s = 0,001867$$

$$\varepsilon'_s \text{ experimental} \geq \varepsilon'_s \text{ diseño}$$

$$0,002096 \geq 0,001867$$

La deformación experimental de la malla hexagonal es mayor a la deformación de diseño por lo tanto se usa la fluencia de la malla hexagonal experimental propuesta con un  $f_y = 2\ 180\ \text{kg/cm}^2$ .

### 2.3.3. Encontrar carga y momento nominal

A continuación se explicará cómo encontrar carga y momento nominal.

#### 2.3.3.1. Carga nominal

$$P_N = C_C + C_S - T$$

$$C_C = 0,85 * f'_c * a * b$$

$$C'_S = A'_S * f_s'$$

$$T = A_S * f_s$$

$$P_N = \left( 0,85 * 280\ \text{kg/cm}^2 * 2,25\ \text{cm} * 5,40\ \text{cm} \right) + \left( 0,0033167\ \text{cm}^2 * 2\ 180\ \text{kg/cm}^2 \right) - \left( 0,32\ \text{cm}^2 * 800\ \text{kg/cm}^2 \right)$$

$$P_N = 2\,891,7\text{ kg} + 7,23\text{ kg} - 896\text{ kg}$$

$$P_N = 2\,002,93\text{ kg}$$

### 2.3.3.2. Momento nominal

$$M_N = C_c \left( \frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + C_s \left( \frac{h}{2} - d' \right) - T \left( d - \frac{h}{2} \right)$$

$$M_N = 2\,891,7\text{ kg} \left( \frac{5,20\text{ cm}}{2} - \frac{2,25\text{ cm}}{2} \right) + 7,23\text{ kg} \left( \frac{5,20\text{ cm}}{2} - 1,00\text{ cm} \right) + 896\text{ kg} \left( 3,88\text{ cms} - \frac{5,20\text{ cm}}{2} \right)$$

$$M_N = 2\,891,7\text{ kg}(1,475\text{ cm}) + 7,23\text{ kg}(3,6\text{ cm}) + 896\text{ kg}(1,2825\text{ cm})$$

$$M_N = 5\,440,41\text{ kg} - \text{cm}$$

### 2.3.4. Excentricidad

$$e = \frac{M_N}{P_N}$$

$$e = \frac{5\,440,41\text{ kg} - \text{cm}}{2\,002,93\text{ kg}}$$

$$e = 2,716\text{ cms}$$

El factor de reducción de resistencia  $\phi$  debe ser dado por la siguiente condición:

ACI318S – 08 9.3.2.1 para secciones controladas por tracción es de 0,90. Por lo tanto, la resistencia a la carga flexión de diseño es:

$$\varphi P_N = 0,90 (2\ 002,93\ kg)$$

$$\varphi P_N = 1\ 802,64\ kg$$

La resistencia a la carga flexión de diseño es:

$$\varphi M_N = 0,90 (5\ 440,41\ kg)$$

$$\varphi M_N = 4\ 896,37\ kg$$

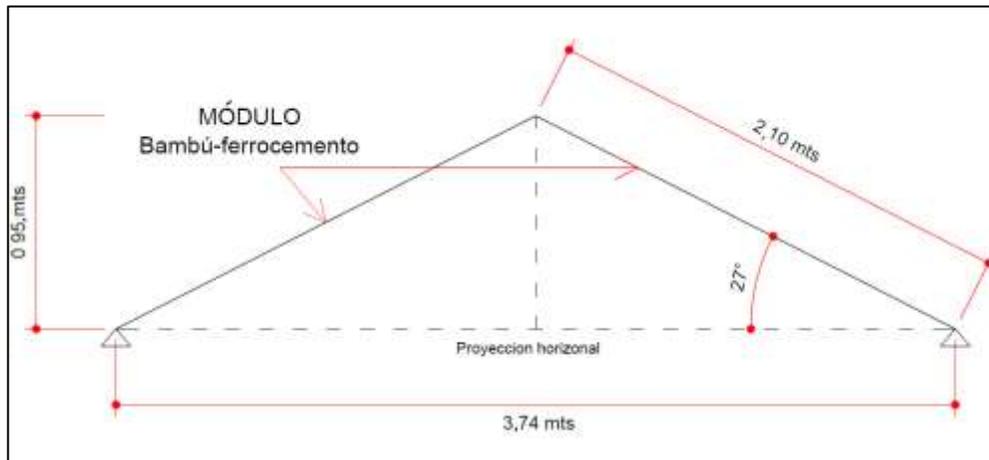
## **2.4. Análisis estructural de la cubierta**

Este estudio pretende realizar una caracterización del bambú de fácil acceso en la región, con el fin de determinar cuál es más apropiado para ser empleado en la construcción.

### **2.4.1. Deflexión de la cubierta**

Para determinar la deflexión máxima permitida en la cubierta, se toma la longitud proyectada entre apoyos y se analiza como una viga rectangular simplemente apoyada.

Figura 23. Elevación del sistema bambú–ferrocemento



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

$$Def \text{ max permitida} = \frac{l}{180}$$

$$Def \text{ max} = \frac{374 \text{ cms}}{180}$$

$$Def \text{ max} = 2,08 \text{ cms}$$

La deformación máxima permitida en todo el sistema es 2,08 cms. Por lo tanto, a la mitad de la cubierta no puede haber una mayor deflexión que esta.

#### 2.4.2. Cálculo de cargas distribuidas en la cubierta

Las cargas que actúan sobre la estructura pueden dividirse en tres grandes categorías, cargas muertas, vivas y ambientales.

### **2.4.2.1. Carga muerta**

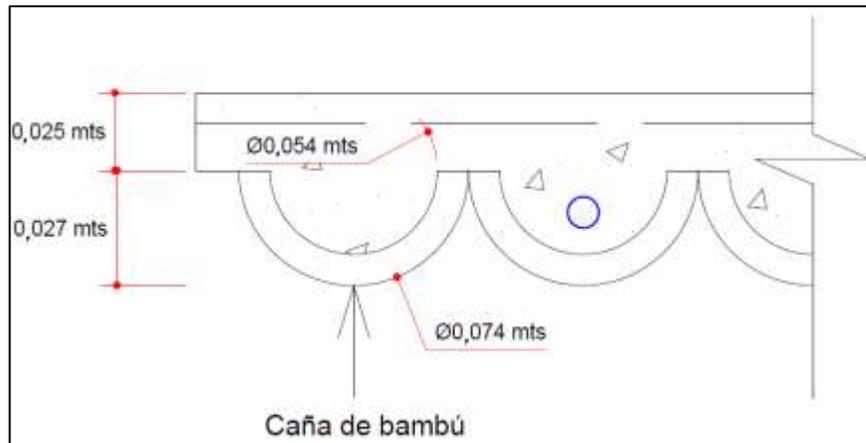
La carga muerta distribuida del sistema se encuentra de la siguiente manera:

- Peso propio del sistema estructural bambú-ferrocemento
- La proyección horizontal del sistema es de 3,74 mts. Tal como lo muestra la figura 23.

Para encontrar el peso muerto del sistema se utiliza solo un módulo de bambú-ferrocemento y se multiplica por dos para tener el peso total de la estructura.

El módulo está compuesto por una losa de ferrocemento con un espesor de 0,025 metros, 3 nervios reforzados y 13 nervios no reforzados de 0,054 metros de ancho y una altura de 0,027 metros. También se tienen 16 secciones de bambú de diámetro promedio de 7,4 centímetros o 2,92 pulgadas.

Figura 24. **Detalle de las dimensiones internas y externas del bambú en el módulo**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Peso de la losa:

$$W_{losa} = Vol * \gamma_{concreto}$$

$$Vol \text{ módulo} = BLt$$

$$Vol \text{ módulo} = (1,20mts)(2,10mts)(0,025mts)$$

$$Vol \text{ módulo} = 0,063 \text{ mts}^3$$

$$\gamma_{concreto} = 2400 \text{ kg/mts}^3$$

$$W_{losa} = (0,063 \text{ mts}^3)(2400 \frac{\text{kg}}{\text{mts}^3})$$

$$W_{losa} = 151,20 \text{ kg}$$

Peso de los nervios

$$W_{nervios} = 8(Vol * \gamma_{concreto})$$

$$Vol \text{ nervios} = bhL$$

$$Vol\ nervios = \left(\frac{\pi}{4}(0,054\ mts)^2\right)(2,10\ mts)$$

$$Vol\ nervios = 0,004809\ mts^3$$

$$\gamma_{concreto} = 2\ 400\ kg/mts^3$$

$$W_{nervios} = 8(0,004809\ mts^3)(2\ 400\ \frac{kg}{mts^3})$$

$$W_{nervios} = 92,34\ kg$$

Peso del bambú

$$W_{bambú} = 8(Vol * \gamma_{concreto})$$

$$Vol\ bambú = L \left[ \left( \frac{\pi}{4} \phi_{externo}^2 \right) - \left( \frac{\pi}{4} \phi_{interno}^2 \right) \right]$$

$$Vol\ bambú = 2,10\ mts \left[ \left( \frac{\pi}{4} (0,074\ mts)^2 \right) - \left( \frac{\pi}{4} (0,054\ mts)^2 \right) \right]$$

$$Vol\ nervios = 0,004222\ mts^3$$

$$\gamma_{bambu} = 790\ kg/mts^3$$

$$W_{bambú} = 8(0,004222\ mts^3)(790\ \frac{kg}{mts^3})$$

$$W_{bambú} = 26,68\ kg$$

Carga muerta distribuida de la cubierta

$$CM_{cubierta} = \frac{2(W_{losa+nervios+bambu})}{l}$$

$$W_{losa+nervios+bambu} = 151,20\ kg + 92,34\ kg + 26,68\ kg$$

$$W_{losa+nervios+bambu} = 270,22\ kg$$

$$CM_{cubierta} = \frac{2(270,22\ kg)}{3,74\ mts}$$

$$CM_{cubierta} = 144,50\ \frac{kg}{mt}$$

### 2.4.2.2. Carga viva

Denominadas también cargas probables, incluyen todas las fuerzas que son variables dentro de un mismo ciclo.

Tabla IV. **Carga viva para cubiertas livianas**

Tipo de ocupación o uso	$W_v \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right)$
Cubiertas livianas (inciso 3,3 (g))	
Para cubiertas con planchas livianas	50 <sup>(a)</sup>

Nota: (a) sobre proyección horizontal

Fuente: elaboración propia, Agies NSE 2-10 tabla 3 – 1.

$$WV_{\text{cubierta}} = 2(\text{Area losa} * \text{carga viva})$$

$$WV_{\text{cubierta}} = 2 \left( (1,20\text{m} * 2,10\text{m}) \left( 50 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right) \right)$$

$$W_v = 252,00 \text{ kg}$$

Carga viva distribuida

$$CV_{\text{cubierta}} = \frac{W_v}{l}$$

$$CV_{\text{cubierta}} = \frac{252,00 \text{ kg}}{3,74 \text{ mts}}$$

$$CV_{\text{cubierta}} = 67,38 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

### 2.4.2.3. Carga última de diseño

La carga última según ACI 318S-11 Apéndice C 9.2.1 es igual a:

$$C_u = 1,7C_v + 1,4C_m$$
$$C_u = 1,7 \left( 67,38 \text{ kg/m} \right) + 1,4 \left( 144,50 \text{ kg/m} \right)$$
$$W_{\text{total cubierta}} = C_u = 316,85 \text{ kg/mts}$$

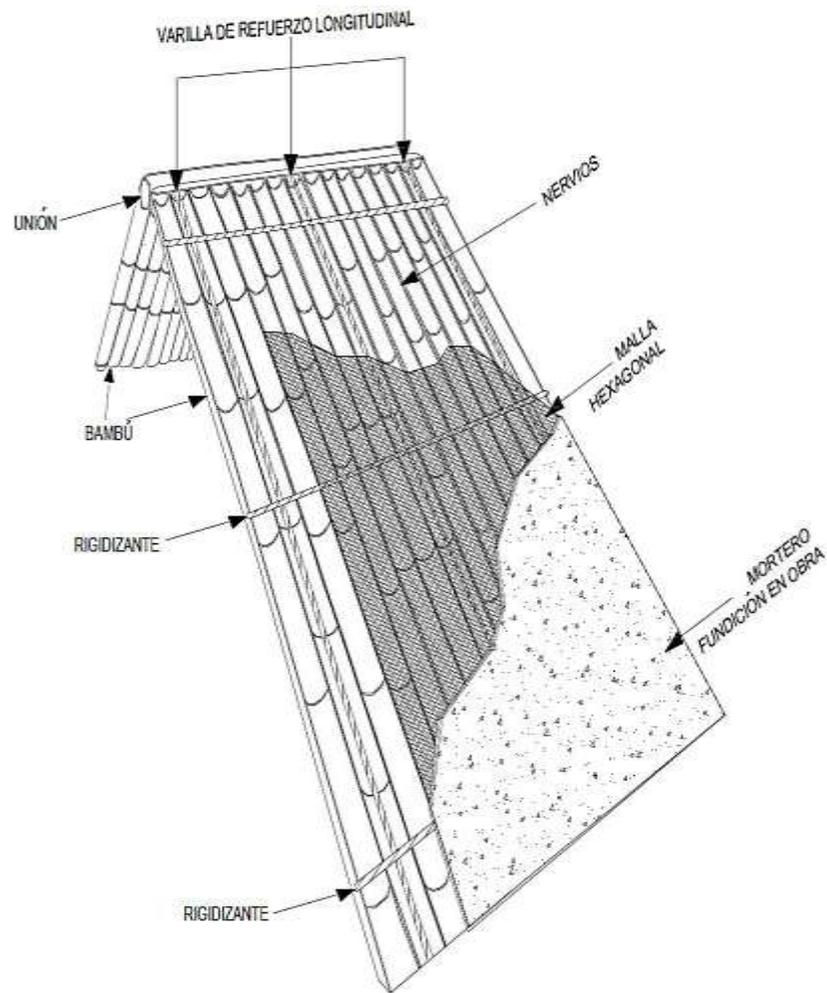
La carga última distribuida a utilizar en la cubierta es de 316,85 kg/mts.



### 3. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

A continuación, un modelo en 3D sobre el sistema constructivo propuesto a dos aguas, con sus respectivos elementos.

Figura 25. Esquema del sistema bambú-ferrocemento



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

### 3.1. Preparación y colocación del bambú

El bambú a trabajar en el sistema constructivo es del tipo guadua angustifolia kunt con una madurez de 3 años con un diámetro promedio de 3 pulgadas, espesor de 0,4 pulgadas y una longitud de 80 pulgadas.

Figura 26. Corte transversal del bambú



Fuente: Sección de Estructuras del CII, USAC.

El bambú se divide en dos partes iguales con una máquina troqueladora para bambú, que se encuentra en las instalaciones del Centro de Investigaciones de Ingeniería, Usac.

Figura 27. Corte longitudinal del bambú



Fuente: Sección de Estructuras del CII, USAC.

Cuando se obtienen los cortes de bambú a la mitad, se procede a limpiar internamente de impurezas, utilizando un par de guantes gruesos de trabajo para protegerse de cualquier lesión provocada por astillas u otro elemento. Se sostiene las secciones de bambú en una mano y en la otra un cepillo con cerdas metálicas para quitar todos los residuos del bambú por dentro. El procedimiento de limpieza es cepillar el bambú de arriba hacia abajo por todo lo largo de la sección hasta que quede libre de asperezas.

Por último, se realiza una segunda pasada ligera con una lija para remover los residuos que dejó el cepillo y tener una superficie libre de asperezas o desechos y poder obtener una mejor adherencia con el ferrocemento.

Figura 28. **Limpieza interna del bambú**



Fuente: Sección de Estructuras del CII, USAC.

### **3.2. Preparación y colocación del refuerzo primario para la cubierta a dos aguas**

Teniendo las secciones de bambú limpias, se continua a construir los módulos de bambú-ferrocemento con la función principal de trabajar como faldones en la cubierta a dos aguas con dimensiones de 1,20 m de ancho y 2,00 m de largo. Para unirlas se utilizan varillas de 1/4 de diámetro para rigidizar el sistema con una longitud de 1,20 m, tres varillas longitudinales con las mismas características que el refuerzo utilizado en la sección transversal con longitudes de 2,00 m, estas servirán como armazón para sujetar la malla hexagonal del sistema.

Para que no queden vacíos o espacios entre las piezas de bambú se usan sargentos para compactarlos, pero si quedan espacios libres se rellenan por medio de papel periódico para tapar todo tipo de vacíos, esto servirá a la hora de la fundición, para que no se riegue el mortero por toda la estructura. Se utiliza alambre de amarre para unir estos dos elementos.

Figura 29. Colocación del refuerzo longitudinal y transversal



Fuente: Sección de Estructuras del CII, USAC.

### **3.3. Preparación y colocación del refuerzo secundario para la cubierta a dos aguas**

Como refuerzo secundario se elige el tipo de malla hexagonal o comúnmente llamada malla de gallinero de  $\frac{1}{2}$  pulgada de abertura, calibre 23 y 0,90 cm de ancho. Este refuerzo se colocó encima del esqueleto ya armado, se coloca una sola capa de malla en el sentido longitudinal de los módulos. Para los traslapes se utiliza la misma malla con una longitud de desarrollo de 15 cm, para unir estas dos mallas y hacerlas una misma. Se utiliza un gancho diseñado para tejer este traslape.

Figura 30. **Colocación de la malla hexagonal**



Fuente: Sección de Estructuras del CII, USAC.

### **3.4. Tensado del refuerzo**

Uno de los principales objetivos para el buen funcionamiento del ferrocemento es la aplicación del mortero y para esto la malla hexagonal tiene que estar firmemente unida y tensada al esqueleto, para formar un solo

sistema, brindándole resistencia y rigidez a toda la estructura, para tensar esta malla necesitamos de alambre de amarre para unirla con las varillas ya unidas con el bambú.

Se procede a barrenar agujeros al bambú en los bordes a cada 20 cm a lo largo del módulo con el fin de tensar ordenadamente la malla de gallinero en sus aristas y así evitar deformaciones en la malla, y facilitar la aplicación del mortero a la hora de fundir.

Figura 31. **Tensado del refuerzo secundario**



Fuente: Sección de Estructuras del CII, USAC.

### **3.5. Preparación y colocación del sistema bambú-ferrocemento**

Con los dos módulos ya construidos por separado se procede a formar la cubierta a dos aguas por medio de una viga de bambú que unirá los dos faldones con una pendiente de 27 grados, estos módulos se unen a la viga por medio de pernos de 3/8 de pulgada utilizando en cada ala tres pernos para sujetarse a la viga de unión y crear un solo sistema a dos aguas. Para sostener la cubierta a la hora de su construcción se colocaron dos columnas de bambú como obra falsa, en el proceso de colocación.

El área de trabajo que se eligió para la construcción de la cubierta y su respectivo ensayo es el área de prefabricados, perteneciente al centro de investigaciones de ingeniería, ya que es un área apropiada para este tipo de ensayo.

Figura 32. **Preparación y colocación del sistema**



Fuente: Sección de Estructuras del CII, USAC.

Después de que todo el sistema está colocado se procede a fundir la viga de bambú que sirve de unión para los dos módulos con una relación de cemento/ arena de (1:2).

Esta viga sirve para que la cubierta mantenga su rigidez y le dé una mayor resistencia al momento, causado por los dos módulos en la viga.

Figura 33. **Fundición de la viga de bambú (unión)**



Fuente: Sección de Estructuras del CII, USAC.

### **3.6. Consideración de fijación**

Para fijar el sistema bambú-ferrocemento a las vigas superiores o soleras de corona, de las paredes, el esqueleto ya completo con sus respectivos refuerzos (primario y secundario) debe ir fundido con estas vigas por medio de pines, lo recomendado sería unir estos pines en los refuerzos longitudinales de los módulos para crear un solo sistema con las vigas y después fundir toda la cubierta.

Para este caso se simuló las vigas colocando pines en una losa de cimentación y colocamos toda la estructura en los pines dándole rigidez al sistema.

### **3.7. Preparación y colocación de formaletas**

Se utilizaron piezas de madera para la elaboración de formaletas con el fin de contener el mortero que se le va aplicar, sin dar lugar a desplazamientos o deslizamientos de esta mezcla. Estos moldes se colocarán firmemente y con las

uniones debidamente cerradas, por medio de clavos, de tal modo que no permita el paso de filtraciones, ni escurrimientos y se obtenga el mínimo de rebabas en la estructura y por lo tanto poder darle un buen acabado, el cual llena los requisitos de resistencia y durabilidad, antes, durante y después de la fundición.

Figura 34. **Preparación y colocación de formaletas**



Fuente: Sección de Estructuras del CII, USAC.

### **3.8. Preparación y colocación del mortero**

El área de trabajo para la preparación del mortero tiene que estar limpia, que no exista material orgánico o cualquier otra contaminación en el suelo.

La proporción recomendada para el mortero en el uso de ferrocemento es la de 1:2 (cemento/arena) en relaciones de volumen por la facilidad de llevar el control de calidad, utilizando cubetas conocidas para realizar este tipo de

mezclas, con arena de río cernida por el tamiz #8 y debe cumplir con todas las especificaciones de la norma Coguanor NC-0554-001 o 410066.

La relación de agua/cemento fue de 0,4 en volumen para brindar mayor trabajabilidad a la mezcla.

El cemento utilizado es del tipo Portland, el cual debe estar fresco y sin la presencia de grumos, o cualquier materia extraña, para que no perjudique la resistencia del mortero. La aplicación del mortero se realizó en tres etapas, la primera se aplica directamente sobre el bambú y los refuerzos con una cuchara de albañil para cerrar todos los espacios o vacíos (ratoneras) que existen entre el bambú y el ferrocemento, el cual produzcan una disminución en la resistencia estructural y las filtraciones que provoquen corrosión al esfuerzo, la segunda etapa es para llenar totalmente todos los vacíos que pudieran haber en la primera capa de mortero e incrementar el espesor deseado en la estructura, la tercera capa es para darle un acabado final en la cara superior de la estructura y así mismo asegurar la impermeabilidad del sistema.

Figura 35. **Colocación del mortero**



Continuación de la figura 35.



Fuente: Sección de Estructuras del CII, USAC.

### **3.9. Curado**

Después de que se termina la fundición de la cubierta, se procede a darle un curado continuo con agua, después de que el mortero ha tenido su fraguado inicial, lo que ocurre posteriormente de 3 a 4 horas de ser aplicado.

Las piezas de ferrocemento deben estar húmedas por un tiempo apropiado, ya sea este de 7 días, para un curado intensivo, o de 15 días en un curado normal.

Para conservar la humedad de la cubierta estas deben ser periódicamente mojadas con agua o cubiertas con mantas de un material que retenga la humedad siendo estas de *nylon* o con aserrín mojado o cualquier otro tipo de material que conserve la humedad sin dañar la resistencia de la estructura.

### **3.10. Desencofrado**

El desmontaje de la obra falsa se debe realizar con sumo cuidado para evitar que se produzcan daños en los elementos, ya sean fisuras o golpes en la

estructura. El mortero debe alcanzar suficiente resistencia antes de retirar el encofrado, para esto debe esperarse un tiempo no menor a los 7 días después de haberlo colocado.



## **4. COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### **4.1. Generalidades**

Después del análisis y diseño estructural teórico de la cubierta de dos aguas compuesta a base de bambú ferrocemento se procede a construir la estructura, tal como se indica en el capítulo anterior, y analizar el comportamiento real del sistema estructural diseñado, ante la simulación de la carga viva aplicada.

### **4.2. Cargas**

A continuación, se hace una comparación de las cargas teóricas y las cargas reales sobre la estructura comparando el comportamiento de estas conforme se van aplicando en el sistema, estas cargas son, la carga viva que es la que actúa directamente con el sistema y la carga muerta que es el peso propio de la cubierta.

#### **4.2.1. Carga viva**

La carga viva para el diseño de la cubierta es como se indica en la norma Según Agies NSE 2 – 10 en su capítulo 3 en la tabla 3 – 1 donde indica que para cubiertas livianas se utiliza una carga viva de 50 kg/m<sup>2</sup>.

#### **4.2.2. Carga muerta**

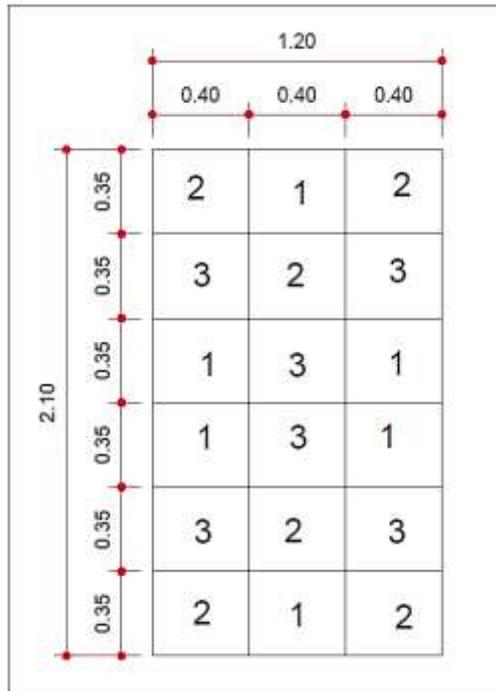
Se realizaron los cálculos respectivos para encontrar el peso muerto de cada elemento que compone la cubierta de dos aguas.

#### **4.3. Análisis de resultados en la cubierta a dos aguas**

La carga viva actuante en la cubierta, es transmitida por los nervios estructurales y los no estructurales a la parte inferior de la cubierta. Ya que estos nervios trabajan como diafragmas, donde los esfuerzos actuantes se transmiten a la solera de corona, estas las transmiten a las columnas de la estructura donde recae en los cimientos y estas a su vez al suelo, la colocación de la carga viva de diseño en la cubierta se aplicó por medio de sacos de pedrín cada uno pesando 55 lbs y fue distribuida en varios segmentos de la losa.

Se detalla cómo se aplicó cada saco de pedrín por medio de un diagrama elaborado estratégicamente, donde indica cómo tienen que ir colocados los sacos por medio de un cuadrículado seguido de números que indican el orden en que se van a ir aplicando, conservando su hegemonía y distribución en ambos módulos.

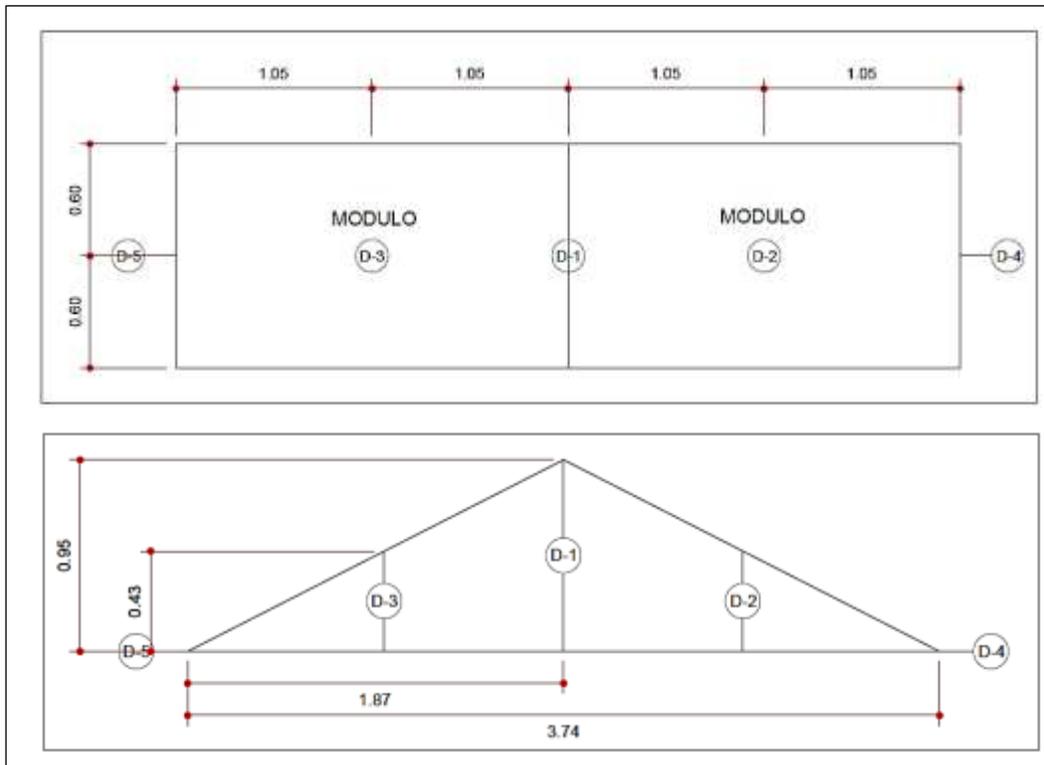
Figura 36. **Distribución de peso en un módulo**



Fuente: elaboración propia, empleado AutoCAD.

En el ensayo de la estructura se pretende evaluar el comportamiento de todo el sistema por medio de varios deformómetros colocadas estratégicamente para ver la deflexión máxima que tiene la estructura aplicándole la carga viva de diseño.

Figura 37. Diagrama de la cubierta en planta-elevación, y posición de los deformómetros



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

#### 4.4. Aplicación de carga

Se realizaron dos tipos de ensayos en la estructura.

El primer ensayo es para evaluar su deflexión y comportamiento del sistema ante la aplicación de la carga de diseño, cuanto es su deflexión después de 24 horas, cuál es su recuperación después de descargar el sistema.

En el segundo ensayo se evalúa la deflexión máxima permitida en el sistema, aplicando un cincuenta por ciento más de la carga de diseño propuesta, para estudiar el comportamiento de la estructura bajo cargas especiales.

La aplicación de la carga de diseño consiste en aumentar progresivamente la distribución de la carga en toda la superficie de la cubierta en porciones aproximadamente del veinticinco por ciento de la carga de diseño, donde en cada porción se toman las lecturas de los deformómetros, para analizar la deflexión a la que está siendo sometida la estructura.

Figura 38. **Ensayo de la cubierta bambú ferrocemento aplicando la carga de diseño**



Fuente: Sección de estructuras del CII, USAC.

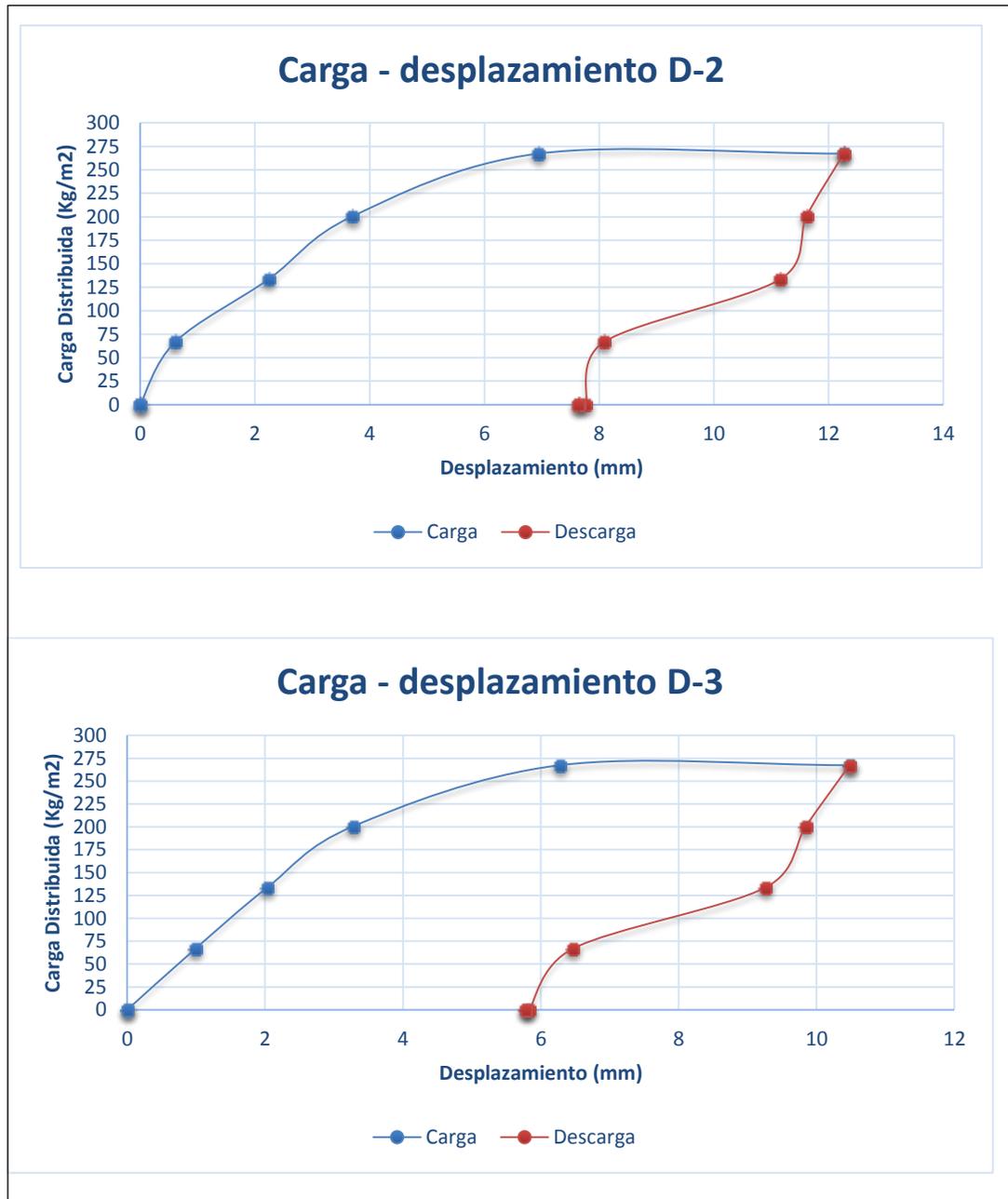
Del primer ensayo los resultados fueron tabulados y graficados de la siguiente forma:

Tabla V. Datos obtenidos en el ensayo de la cubierta bambú – ferrocemento aplicando la carga de diseño

Carga /descarga (P) Lbs	carga/ descarga (p) Kg	Carga distribuida Kg/m2	Carga distribuida Kg/m2	Desplazamiento acumulado 1 (mm)	Desplazamiento acumulado 2 (mm)	Desplazamiento acumulado 3 (mm)	Desplazamiento acumulado 4 (mm)	Desplazamiento acumulado 5 (mm)
losa con parales (0)	losa con parales (0)	0,00	0,00	0	0	0	0	0
losa sin parales (0)	losa sin parales (0)	0,00	0,00	0,07	0	0	0	0,11
660	300	66,84	33,42	1,21	0,61	0,99	0,39	0,3
1 320	600	133,69	66,84	2,29	2,24	2,03	0,71	0,65
1 980	900	200,53	100,27	2,85	3,70	3,28	0,75	0,65
2 640	1 200	267,38	133,69	3,89	6,93	6,27	1,03	0,84
2 640	1 200	267,38	133,69	7,71	12,26	10,48	1,14	0,92
1 980	900	200,53	100,27	7,51	11,61	9,84	1,1	0,86
1 320	600	133,69	66,84	7,4	11,16	9,26	1,07	0,84
660	300	66,84	33,42	7,22	8,08	6,46	1,05	0,8
1h despues	0	0,00	0,00	6,84	7,77	5,83	1,03	0,8
4h despues	0	0,00	0,00	6,79	7,64	5,78	1,03	0,8
24h despues	0	0,00	0,00	6,78	7,63	5,78	1,03	0,8

Fuente: elaboración propia.

Figura 39. Gráficas del comportamiento carga-desplazamiento bajo las alas de la cubierta compuesta de bambú-ferrocemento



Fuente: elaboración propia.

Los comportamientos de ambas gráficas carga-desplazamiento son bastante parecidos ya que guardan una proporcionalidad similar, esto se debe a que mayor carga mayor deflexión y se mantiene constantemente. Se observa que todo el sistema trabajó como uno solo teniendo el mismo comportamiento ante los esfuerzos.

En la gráfica D-2 se observa cómo se inicia el proceso entre la tensión y la deformación que va desde el origen 0 hasta el punto de carga 66,84 kg/m<sup>2</sup>, donde comienza a trabajar el límite de proporcionalidad con un desplazamiento de 0,61 mm, donde continúa al límite elástico en el punto de carga de 133,69 kg/m<sup>2</sup> con un desplazamiento de 2,24 mm, en este punto el módulo de bambú ferrocemento no recupera totalmente su forma original al ser descargado sino que queda con una deformación residual o deformación permanente, se llega a la zona elasto-plástica o punto de fluencia donde aparece un considerable alargamiento o fluencia del módulo sin el correspondiente aumento de carga y este se encuentra en el punto de carga 200,53 kg/m<sup>2</sup> con un desplazamiento de 3,70 mm, llegando a la zona plástica a su esfuerzo máximo o punto de ruptura en la curva, donde se le aplicó una carga de 267,38 kg/m<sup>2</sup> y se obtuvo un desplazamiento de 6,93 mm.

El sistema se dejó cargado con este peso de 267,38 kg/m<sup>2</sup> veinticuatro horas, para obtener la deformación en el módulo con el deformómetro 2, dando un desplazamiento máximo de 12,26 mm, y de este valor se recupera 8,08 milímetros. Obteniendo al final una deformación permanente de 6,63 milímetros después de 24 horas de haber descargado todo el sistema.

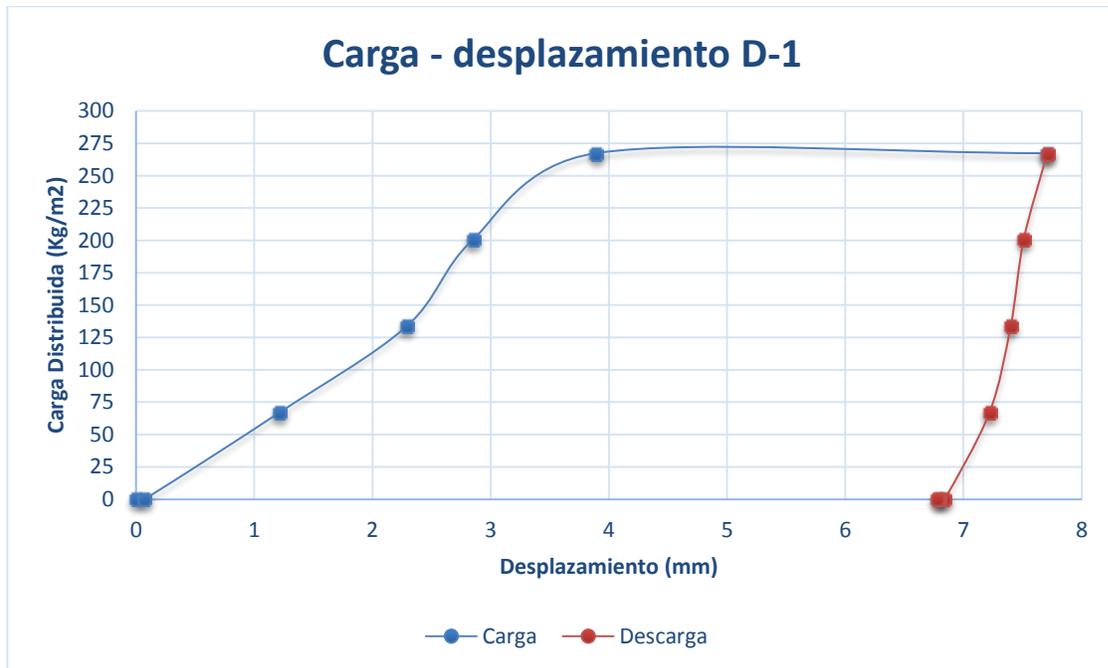
En la gráfica D-3 se observa como inicia el proceso entre la tensión y la deformación que va desde el origen 0 hasta el punto de carga 66,84 kg/m<sup>2</sup> donde comienza a trabajar el límite de proporcionalidad con un desplazamiento

de 0,99 mm, continua al límite elástico en el punto de carga de 133,69 kg/m<sup>2</sup> con un desplazamiento de 2,03 mm, en este punto el módulo de bambú ferrocemento no recupera totalmente su forma original al ser descargado si no que queda con una deformación residual o deformación permanente, se llega a la zona elasto-plástica o punto de fluencia donde aparece un considerable alargamiento o fluencia del módulo sin el correspondiente aumento de carga y este se encuentra en el punto de carga 200,53 kg/m<sup>2</sup> con un desplazamiento de 3,28 mm, llegando a la zona plástica a su esfuerzo máximo o punto de ruptura en la curva, donde se le aplicó una carga de 267,38 kg/m<sup>2</sup> y se obtuvo un desplazamiento de 6,27 mm.

El sistema se dejó cargado con este peso de 267,38 kg/m<sup>2</sup> veinticuatro horas, para obtener la deformación en el módulo con el deformómetro 3, dando un desplazamiento máximo de 10,48 mm, y de este valor se recupera 6,46 milímetros. Obteniendo al final una deformación permanente de 5,78 milímetros después de 24 horas de haber descargado todo el sistema

Por lo tanto, se considera ambos módulos con un comportamiento similar, ya que su deformación no varía tanto al igual que su recuperación cuando es retirada toda la carga de diseño, su deformación permanente en ambos casos es similar después de 24 horas de la descarga. Esto demuestra que la deformación real es menor a la deformación teórica máxima calculada y por lo tanto el sistema trabaja bajo las condiciones de diseño.

Figura 40. **Gráfica del comportamiento carga-desplazamiento bajo la unión viga de bambú que une el sistema bambú-ferrocemento**



Fuente: elaboración propia.

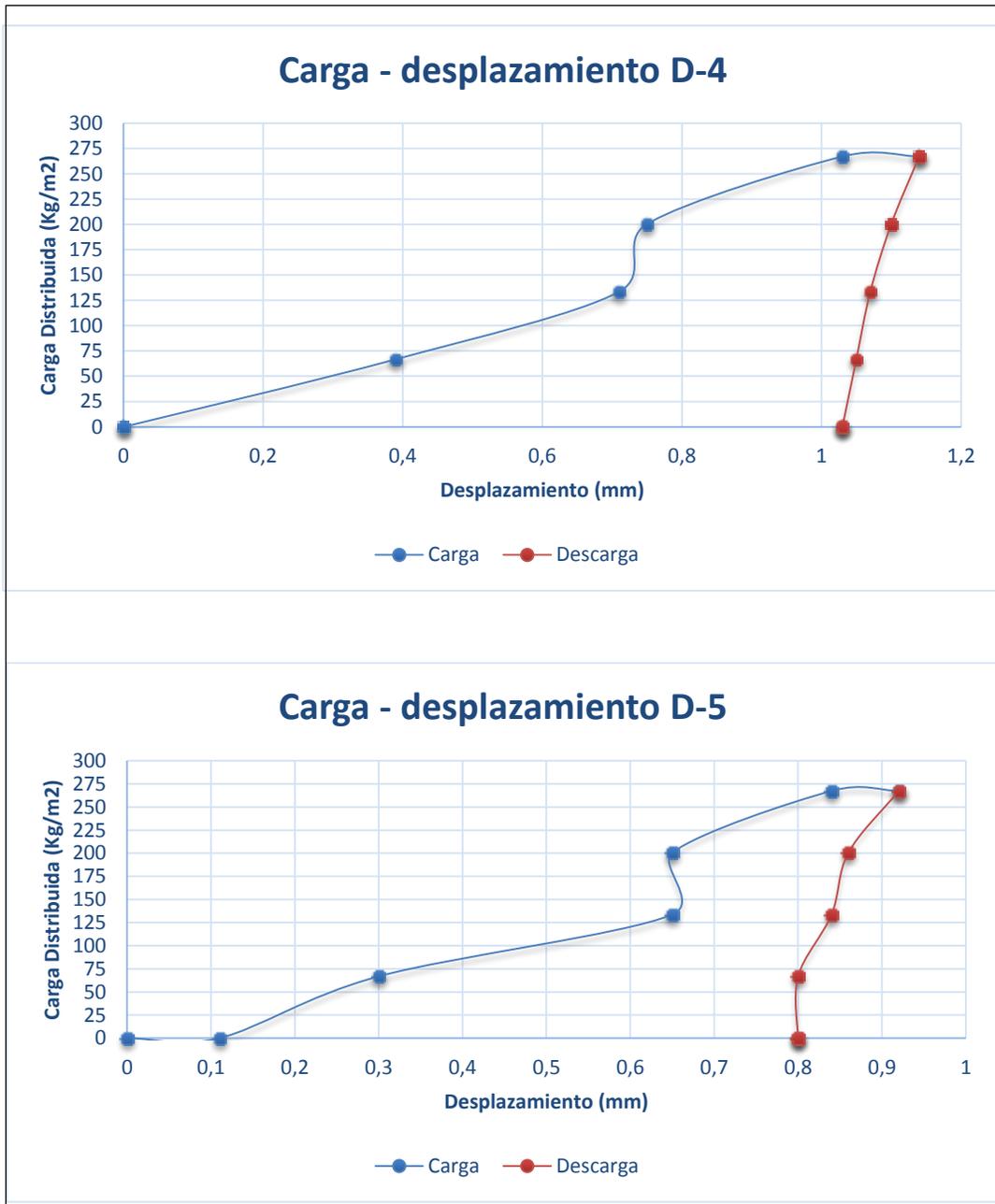
El comportamiento que se muestra en la gráfica carga-desplazamiento D-1 es similar a las gráficas D-2 y D-3 ya que guardan una cierta proporcionalidad en su comportamiento, esto se debe a que mayor carga mayor deflexión y se mantiene constantemente. Se observa que todo el sistema trabajo como uno solo teniendo el mismo comportamiento ante los esfuerzos.

En la gráfica D-1 se observa como se inicia el proceso entre la tensión y la deformación que va desde el origen 0 hasta el punto de carga 66,84 kg/m<sup>2</sup>, donde comienza a trabajar el límite de proporcionalidad con un desplazamiento de 1,21 mm, esta deformación es mayor a las dos anteriores por el esfuerzo

que se produce en la viga debido a los dos módulos aplicándole cargas distribuidas al mismo tiempo, continua al límite elástico en el punto de carga de 133,69 kg/m<sup>2</sup> con un desplazamiento de 2,29 mm, donde se logra apreciar que la gráfica sigue una tendencia lineal desde su punto de origen, en esta posición el módulo de bambú-ferrocemento no recupera totalmente su forma original al ser descargado sino que queda con una deformación permanente, se llega a la zona elasto-plástica o punto de fluencia donde aparece un considerable alargamiento o fluencia del módulo sin el correspondiente aumento de carga y este se encuentra en el punto de carga 200,53 kg/m<sup>2</sup> con un desplazamiento de 2,85 mm, donde este resultado indica que los módulos están trabajando más a tensión que la unión de bambú, llegando a la zona plástica a su esfuerzo máximo o punto de ruptura en la curva, donde se le aplicó una carga de 267,38 kg/m<sup>2</sup> y se obtuvo un desplazamiento de 3,89 mm.

El sistema se dejó cargado con este peso de 267,38 kg/m<sup>2</sup> veinticuatro horas, para obtener la deformación en la viga de unión, dando un desplazamiento máximo de 7,71 mm, y de este valor se recupera 7,22 milímetros. Obteniendo al final una deformación permanente de 6,78 milímetros después de 24 horas de haber descargado todo el sistema

Figura 41. Gráficas del comportamiento carga–desplazamiento en los apoyos del sistema bambú-ferrocemento

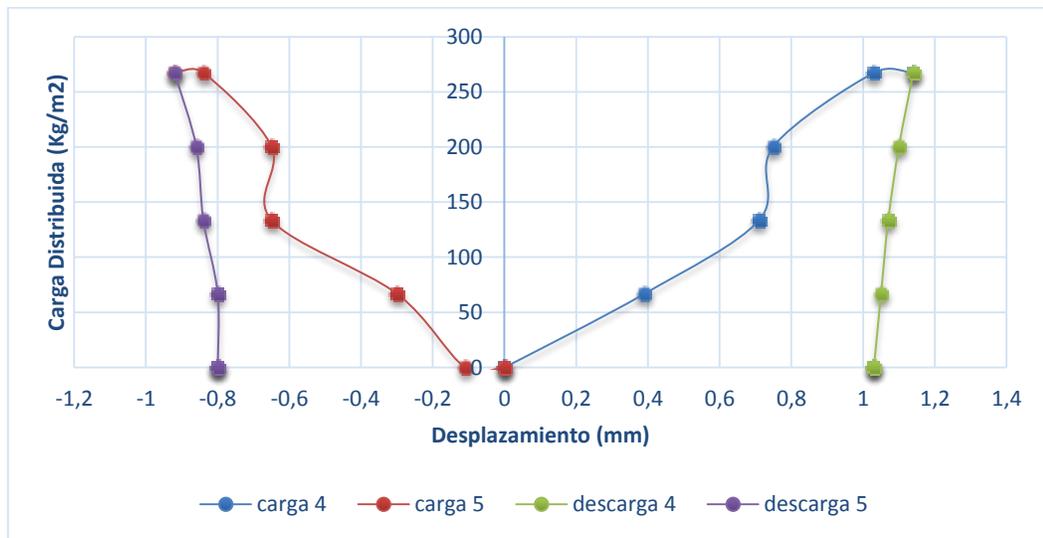


Fuente: elaboración propia.

El comportamiento que mantuvieron ambas gráficas carga-desplazamiento en los apoyos de la cubierta son parecidas ya que guardan una proporcionalidad similar, esto se debe a que mayor carga mayor deflexión y se mantiene constantemente.

El sistema se dejó cargado con este peso de 267,38 kg/m<sup>2</sup> veinticuatro horas, para obtener la deformación en el apoyo con el deformómetro 4, dando un desplazamiento máximo de 1,14 mm, de este valor se recupera 1,05 milímetros. Obteniendo al final una deformación permanente de 1,03 milímetros después de 24 horas de haber descargado todo el sistema. El deformómetro 5 midió un desplazamiento máximo de 0,92 mm, de este valor se recupera 0,8 milímetros. Obteniendo al final una deformación permanente de 0,8 milímetros después de 24 horas de haber descargado todo el sistema, donde este último apoyo mantuvo su recuperación.

Figura 42. **Carga - desplazamiento D-4 y D-5**



Fuente: elaboración propia.

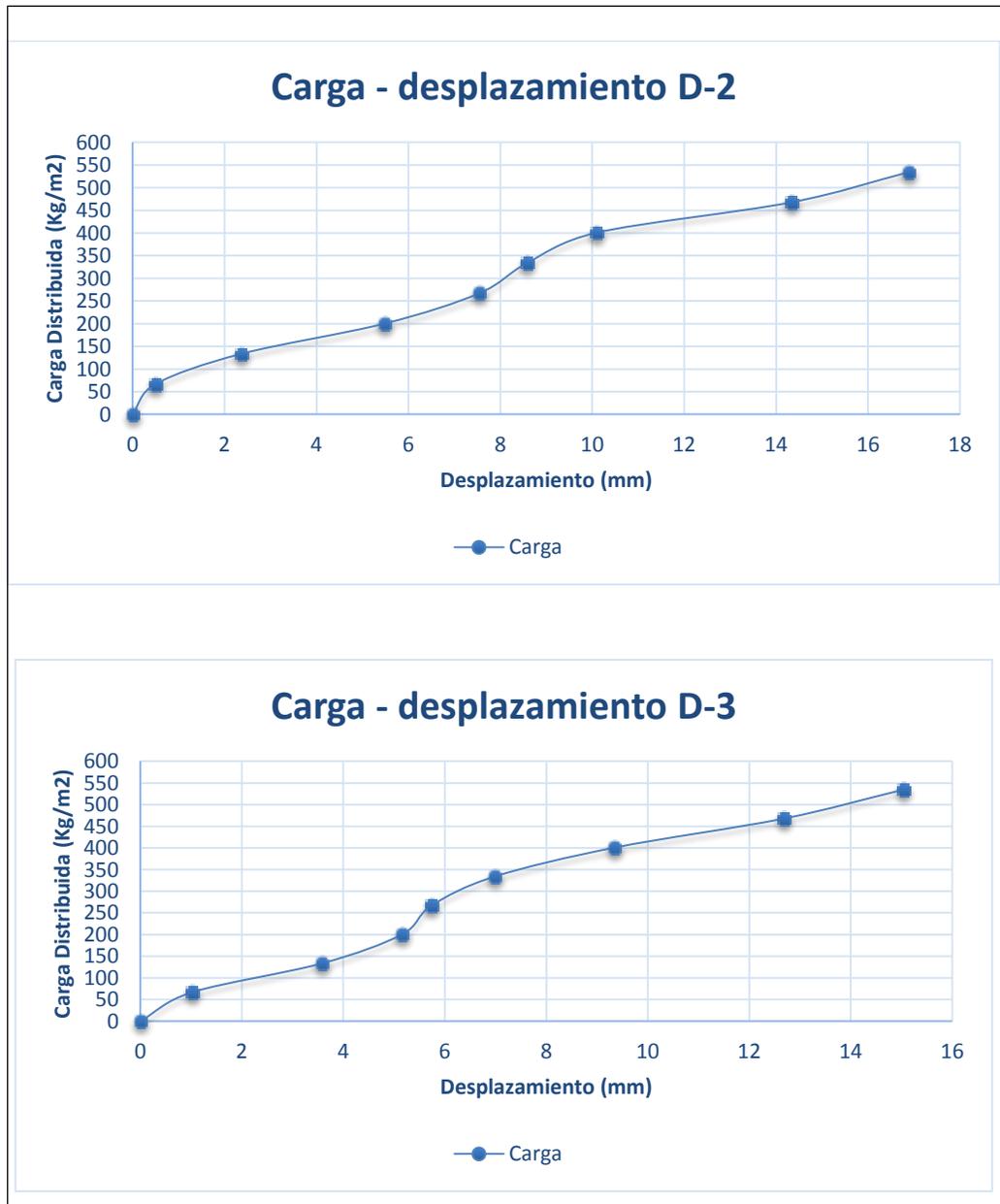
En este tipo de gráfica se muestra un análisis de cómo se comportan los apoyos en el nudo al aplicarle una carga de 133,69 kg/m<sup>2</sup> donde comienza a trabajar el límite elástico con un desplazamiento entre los dos apoyos de 1,36 mm, siendo esta la suma de la deformación entre los dos, donde esta carga se mantiene en el rango del límite elástico. Donde la condición elasto-plástica de los apoyos es de 200,54 kg/m<sup>2</sup> con un desplazamiento entre los dos apoyos de 1,4 mm.

**Tabla VI. Datos obtenidos del segundo ensayo de la cubierta bambú-ferrocemento, aplicando el 100 por ciento de carga adicional a la carga de diseño**

Carga (P) Lbs	Carga (P) Kg	Carga distribuida Kg/m <sup>2</sup>	Carga distribuida 1 ala Kg/m <sup>2</sup>	Desplazamiento acumulado 1 (mm)	Desplazamiento acumulado 2 (mm)	Desplazamiento acumulado 3 (mm)	Desplazamiento acumulado 4 (mm)	Desplazamiento acumulado 5 (mm)
0	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0
660	300	66,84	33,42	0,26	0,50	102	0,03	0,025
1 320	600	133,69	66,84	0,715	2,36	3,58	0,06	0,045
1 980	900	200,53	100,27	1,34	5,49	5,16	0,14	0,11
2 640	1 200	267,38	133,69	1,87	7,54	5,74	0,23	0,19
3 300	1 500	334,22	167,11	2,415	8,59	6,99	0,34	0,26
3 960	1 800	401,07	200,53	2,5	10,10	9,35	0,46	0,33
4 620	2 100	467,91	233,96	3,81	14,33	12,67	0,87	0,53
5 280	2 400	534,76	267,38	5,71	16,89	15,04	1,12	0,88

Fuente: elaboración propia.

Figura 43. **Gráficas del comportamiento carga-desplazamiento bajo las alas de la cubierta compuesta de bambú-ferrocemento, aplicándole el 100 por ciento de carga adicional a la carga de diseño**



Fuente: elaboración propia.

Los comportamientos de las graficas carga-desplazamiento con el doble de su carga de diseño son similares ya que guardan una cierta proporcionalidad en sus desplazamientos, esto se debe a que mayor carga mayor deflexión y se mantiene constantemente. Se observa que los dos módulos de bambú ferrocemento trabajan como un solo sistema teniendo el mismo comportamiento ante los esfuerzos.

En la gráfica D-2 se le aplica el doble de carga y se puede analizar como inicia el proceso entre la tensión y la deformación que va desde el origen 0 hasta el punto de carga 66,84 kg/m<sup>2</sup>, donde comienza a trabajar el límite de proporcionalidad con un desplazamiento de 0,50 mm, continua al límite elástico en el punto de carga de 133,69 kg/m<sup>2</sup> con un desplazamiento de 2,36 mm, en este punto el módulo de bambú-ferrocemento no recupera totalmente su forma original al ser descargado sino que queda con una deformación residual o deformación permanente, se llega a la zona elasto-plástica o punto de fluencia donde aparece un considerable alargamiento o fluencia del módulo sin el correspondiente aumento de carga y este se encuentra en el punto de carga 200,53 kg/m<sup>2</sup> con un desplazamiento de 5,49 mm, llegando a la zona plástica a su esfuerzo máximo o punto de ruptura en la curva donde se le aplicó una carga de 267,38 kg/m<sup>2</sup> y se obtuvo un desplazamiento de 7,54 mm.

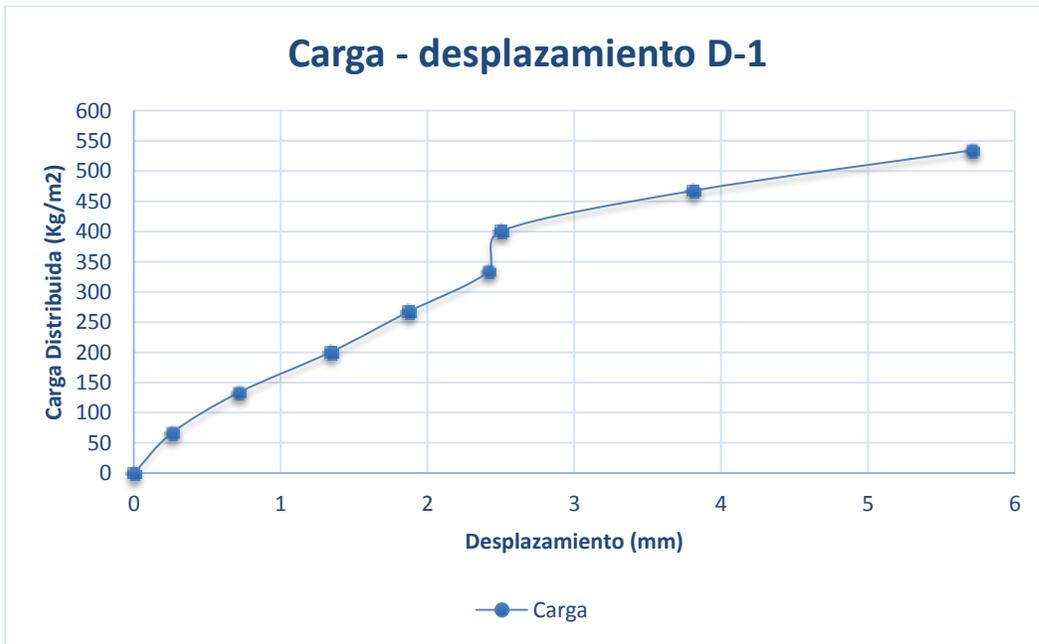
El módulo retoma tensión para seguir deformándose hasta llegar a su zona elasto-plástica con una carga de 334,22 kg/m<sup>2</sup> y un desplazamiento de 7,54 mm, donde se llega a la zona de endurecimiento por deformación que va hasta el punto de tensión máxima o resistencia ultima con una carga de 401,07 kg/m<sup>2</sup> con un desplazamiento de 10,10 mm, donde en el módulo no se presenta una relajación de la tensión, pues sigue aumentando hasta la rotura, cuya carga es de 534,76 kg/m<sup>2</sup> con una deformación de 16,89 mm, donde el sistema comienza a crujir y se llega a este límite de carga y deformación.

La gráfica D-3 muestra el comportamiento cuando se le aplica el doble de carga y se puede analizar como inicia el proceso entre la tensión y la deformación que va desde el origen 0 hasta el punto de carga  $66,84 \text{ kg/m}^2$ , donde comienza a trabajar el límite de proporcionalidad con un desplazamiento de  $1,02 \text{ mm}$ , continua al límite elástico en el punto de carga de  $133,69 \text{ kg/m}^2$  con un desplazamiento de  $3,58 \text{ mm}$ , en este punto el módulo de bambú ferrocemento no recupera totalmente su forma original al ser descargado sino que queda con una deformación residual o deformación permanente, se llega a la zona elasto-plástica o punto de fluencia, donde aparece un considerable alargamiento o fluencia del módulo sin el correspondiente aumento de carga y este se encuentra en el punto de carga  $200,53 \text{ kg/m}^2$  con un desplazamiento de  $5,16 \text{ mm}$ , llegando a la zona plástica a su esfuerzo máximo o punto de ruptura en la curva, donde se le aplicó una carga de  $267,38 \text{ kg/m}^2$  y se obtuvo un desplazamiento de  $5,74 \text{ mm}$ .

El módulo retoma tensión para seguir deformándose hasta llegar a su zona elasto-plástica con una carga de  $334,22 \text{ kg/m}^2$  y un desplazamiento de  $6,99 \text{ mm}$ , donde se llega a la zona de endurecimiento por deformación que va hasta el punto de tensión máxima o resistencia última con una carga de  $401,07 \text{ kg/m}^2$  con un desplazamiento de  $9,35 \text{ mm}$ , donde en el módulo no se presenta una relajación de la tensión, pues sigue aumentando hasta la rotura, cuya carga es de  $534,76 \text{ kg/m}^2$  con una deformación de  $15,04 \text{ mm}$ , donde el sistema comienza a crujiir y se llega a este límite de carga y deformación.

La diferencia de deformaciones del deformómetro 2 con el deformómetro 3 es de  $1,85 \text{ mm}$ , siendo esta la diferencia entre los dos desplazamientos en su carga máxima de ruptura, donde indica que la diferencia entre los dos es casi mínima y se mantiene la proporcionalidad de desplazamientos al aplicarle cargas uniformes en cada módulo.

Figura 44. **Gráfica del comportamiento carga-deformación en la unión de la viga de bambú que une el sistema bambú-ferrocemento, aplicándole el 100 por ciento de carga adicional a la carga de diseño**



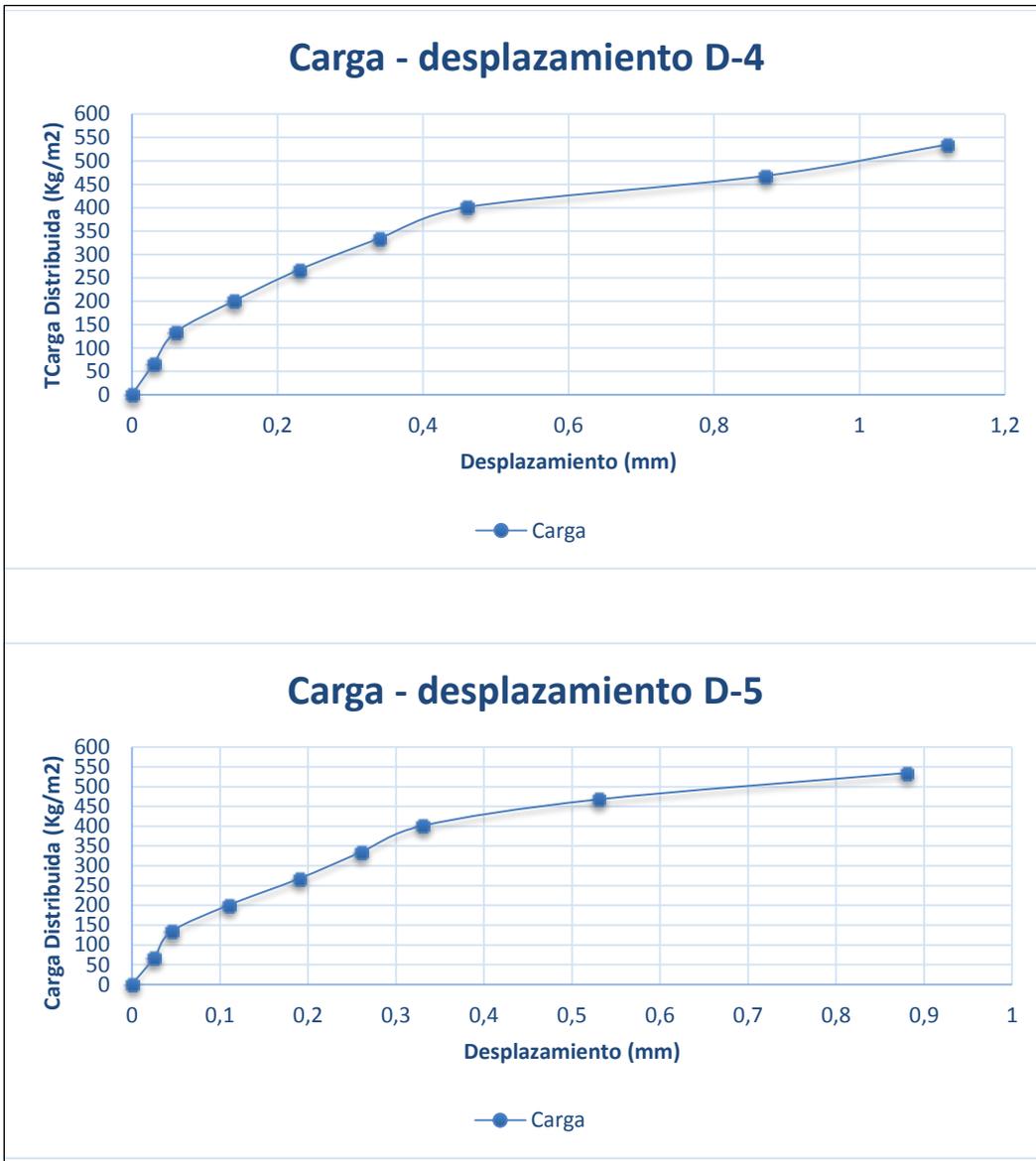
Fuente: elaboración propia.

En la gráfica D-1 se logra observar como inicia el proceso entre la tensión y la deformación que va desde el origen 0 hasta el punto de carga 66,84 kg/m<sup>2</sup>, donde comienza a trabajar el límite de proporcionalidad con un desplazamiento de 0,26 mm donde esta deformación es mayor a las dos anteriores por el esfuerzo que se produce en la viga, debido a los dos módulos aplicándole cargas distribuidas al mismo tiempo, donde continua al límite elástico en el punto de carga de 133,69 kg/m<sup>2</sup> con un desplazamiento de 0,72 mm donde se logra apreciar que la gráfica sigue una tendencia lineal desde su punto de origen, en esta posición el módulo de bambú ferrocemento no recupera

totalmente su forma original al ser descargado, sino que queda con una deformación permanente, se llega a la zona elasto-plástica o punto de fluencia donde aparece un considerable alargamiento o fluencia del módulo sin el correspondiente aumento de carga y este se encuentra en el punto de carga 200,53 kg/m<sup>2</sup> con un desplazamiento de 1,34 mm, donde este resultado indica que los módulos están trabajando más a tensión que la unión de bambú, llegando a la zona plástica a su esfuerzo máximo o punto de ruptura en la curva, donde se le aplicó una carga de 267,38 kg/m<sup>2</sup> y se obtuvo un desplazamiento de 1,87 mm.

La viga retoma tensión para seguir deformándose hasta llegar a su zona elasto-plástica con una carga de 334,22 kg/m<sup>2</sup> y un desplazamiento de 2,42 mm, donde se llega a la zona de endurecimiento por deformación que va hasta el punto de tensión máxima o resistencia última con una carga de 401,07 kg/m<sup>2</sup> con un desplazamiento de 2,50 mm, donde en el módulo no se presenta una relajación de la tensión, pues sigue aumentando hasta la rotura, cuya carga es de 534,76 kg/m<sup>2</sup> con una deformación de 5,71 mm.

Figura 45. Gráficas del comportamiento carga-deformación en los apoyos del sistema bambú-ferrocemento aplicándole el 100, por ciento de carga adicional a la carga de diseño

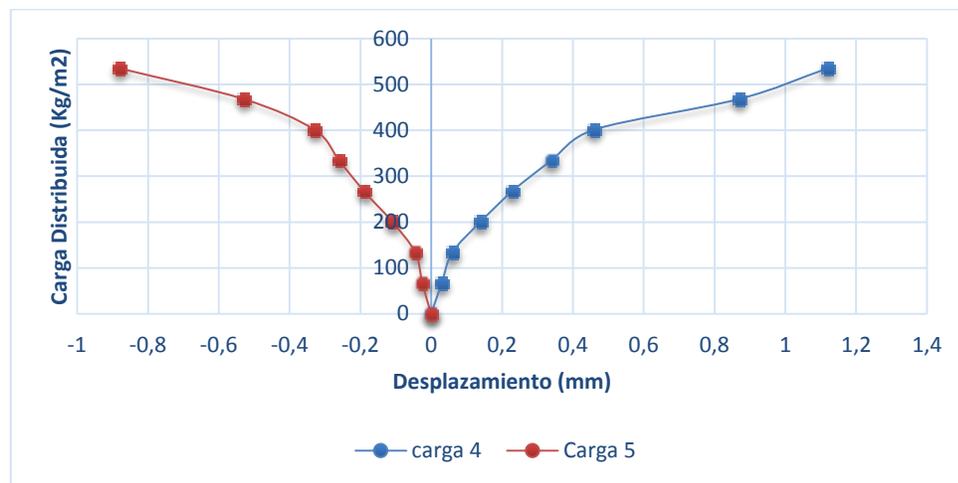


Fuente: elaboración propia.

El comportamiento que mantuvo ambas gráficas carga-desplazamiento en los apoyos de la cubierta aplicando el doble de carga son semejantes, ya que guardan una proporcionalidad similar, esto se debe a que mayor carga mayor deflexión y se mantiene constantemente.

En el deformómetro 4 se mide una deformación con una carga de 534,76 kg/m<sup>2</sup> dando un desplazamiento máximo de 1,12 mm. El deformómetro 5 dio una lectura de desplazamiento máximo de 0,88 mm.

Figura 46. **Carga - desplazamiento D-4 y D-5**



Fuente: elaboración propia.

En este tipo de gráfica se obtiene un análisis de cómo se comporta los apoyos en el nudo, al aplicarle una carga de 133,69 kg/m<sup>2</sup> donde comienza a trabajar el límite elástico con un desplazamiento entre los dos apoyos de 0,105 mm, siendo esta la suma de la deformación entre los dos, donde esta carga se mantiene en el rango del límite elástico. Donde la condición elasto-plástica de los apoyos es de 401,07 kg/m<sup>2</sup> con un desplazamiento entre los dos apoyos de 0,79 mm.

#### **4.5. Comportamiento general de la estructura**

Al analizar el comportamiento general del sistema de bambú compuesto con ferrocemento, se obtuvieron resultados de resistencia aceptables tanto en la unión como en los módulos individuales aplicándole la carga de servicio diseñada. Así también en la aplicación del doble de carga de diseño en el sistema, la cubierta trabajó con los resultados esperados sin llegar a colapsar llevándolo hasta su límite, sin tener mayores daños en la cubierta.

Se observaron pequeñas fisuras en los módulos de ferrocemento, las cuales no afectan el comportamiento mecánico del sistema, ya que no representan un daño considerable a la estructura, así como la impermeabilidad. Estas fisuras solo afectan el recubrimiento y no a los nervios reforzados a tensión, lo cual indica que el refuerzo no fluyó y por lo tanto el bambú no fue afectado con fisuras o grietas, estos módulos de bambú-ferrocemento tienen la capacidad de resistir la carga para la cual fue diseñada, sin llegar a fallar.

El bambú no presenta daño alguno después de la segunda aplicación de carga, donde se cargó al sistema llegar al límite de su capacidad sin que colapsara. Las deformaciones fueron relativamente pequeñas a las cuales fueron diseñadas sin llegar al límite de su deformación permitida.

Por lo tanto, se puede decir que el sistema a dos aguas de bambú compuesto con ferrocemento mantuvo una integridad estructural en todo el proceso del ensayo.

## CONCLUSIONES

El Sistema liviano de bambú-ferrocemento al ser evaluado a través del ensayo a flexión, demostró estabilidad y resistencia adecuada al diseño, soportando cargas mayores de dos veces los parámetros de diseño propuestos, por lo tanto, el sistema a dos aguas es adecuado para la utilización en viviendas unifamiliares.

1. Conforme a las gráficas, se concluye que todo el sistema trabaja como uno solo, ya que las deformaciones en cada módulo son similares del uno al otro, variando aproximadamente entre ellos de uno a dos milímetros en cada módulo.
2. Asimismo en la viga de bambú esta mantuvo una deformación de un dieciocho por ciento sobre la deformación máxima calculada en el primer ensayo. En el segundo ensayo llegó a una deformación máxima del veintiocho por ciento de la deformación máxima calculada.
3. La utilización del mortero fluido con alto valor de revenimiento permite que ingrese por el esqueleto formado por las varillas y la malla hexagonal que conforman la estructura encima de las secciones de bambú, donde no deja vacíos a la hora de fundición.
4. Para este tipo de cubierta de bambú-ferrocemento es necesaria la construcción de formaletas en todo el sistema, para que el *grout* no se derrame por las orillas y así poder darle el espesor requerido de una pulgada (2,5 cms).

5. Este tipo de cubierta o techo, compuesto de bambú-ferrocemento no requiere de materiales ni equipo especial, los materiales que se empleen han de ser legítimos y de fácil adquisición para facilitar la construcción. Mediante capacitaciones sobre el uso de ferrocemento cualquier persona puede construir el sistema, con ello se reduce el costo de la mano de obra.
6. Con este tipo de sistema se busca mejorar los aspectos de seguridad, habitabilidad, aislamiento, impermeabilidad, estabilidad y bajo costo en los materiales que son básicamente las condiciones de cualquier tipo de techo.
7. Con el bambú utilizado en la construcción del techo, se busca innovar un nuevo material ecológico en la elaboración de cubiertas manteniendo una agradable vista natural en el interior del sistema.
8. El comportamiento general de la cubierta como sistema estructural es admisible, ya que después de cargarlo al doble de su capacidad a la carga de diseño propuesto toda la estructura mantiene su integridad.
9. Los módulos de bambú-ferrocemento tienen una virtud de que al fallar por sobre carga la falla no es brusca o no tiende a colapsar, sin primero dar aviso de grietas y fisuras, así como otros tipos de sistemas tradicionales.

## RECOMENDACIONES

1. En la construcción de la cubierta se recomienda que la base soporte que la sostendrá, esté reforzada con pines para anclar este tipo de techo en las varillas longitudinales del sistema antes de la fundición de la cubierta.
2. En la fachada interior de la cubierta es importante que el tipo de bambú sea destinado para la construcción, con un diámetro de tres a cuatro pulgadas, con un espesor promedio de uno a dos centímetros, para que soporte la plancha de ferrocemento diseñada sin tener mayores daños en el bambú.
3. El tipo de bambú que se utiliza en la construcción de la cubierta este tratado y curado contra hongos o plagas que amenacen a este tipo de material. Limpiar internamente el bambú de asperezas que contengan esta misma por medio de herramientas adecuadas.
4. Es necesario tener un buen control de calidad en los materiales a utilizar en la construcción del sistema para que no repercutan en la resistencia de la cubierta, ya que sin un buen control de calidad en el sistema se pueden producir concentraciones de esfuerzos que ocasionen agrietamientos, la inestabilidad y la falta de capacidad de recibir cargas.
5. Hay que tener precaución a la hora de la fundición ya que el ferrocemento es un material que se compone de un espesor

relativamente pequeño, a la hora de la colocación del mortero, si no es bien aplicado provoca ratoneras dentro de los módulos, así como el manejo y el curado del techo, ya que un mal control de calidad disminuirá la resistencia del sistema.

6. Que se realicen ensayos y construcciones de diversas formas de techos para aprovechar las características mecánicas del bambú y ferrocemento como una sola unidad y seguir desarrollando nuevas formas de cubiertas tanto estructuralmente como estéticamente conforme a los requerimientos del diseñador de la obra.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ARCILA LOSADA, Jorge Humberto. *Vigencia del bambú como hecho constructivo*. Tesis doctoral. España, Universidad Politécnica de Catalunya. Departamento de Construcciones Arquitectonicas, 1993. 640 pag.
2. B.K. Paul, R.P. *Ferrocemento*. Pama Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, a.c. Limusa, 1984, 2a reimpresión 1991.
3. CEDEÑO VALDIVIEZO E IRIGOYEN CASTILLO, Alberto y Jaime. *El bambú en México*. México 2011. 223 – 240 p.
4. COMITÉ ACI 318 AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-08) y Comentario (ACI 318SR-08)*. Estados Unidos: s.e. 2008. 387 p.
5. GUERRERO ZUÑIGA, Aydeé Patricia. *Conceptos generales de ferrocemento*. Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Colombia, 2008. 79 p
6. HORACIO SALEME, Susana Comoglio y MENDEZ MUÑOZ, Jose. *Ferrocemento, un material apropiado a nuestro medio*. Cet, 2002. 124 p.
7. HIDALGO LÓPEZ, Oscar. *Construcciones 2. Bambú, cultivo y aplicaciones*. Cali, Colombia. Estudios Técnicos Colombianos, 1974. 176 p.

8. \_\_\_\_\_, *Nuevas técnicas de construcción con bambú*. Bogotá, Colombia. Estudios Técnicos Colombianos Ltda, 1978. 137 p.
9. \_\_\_\_\_, *Manual de construcción con bambú*. Bogotá, Colombia. Estudios Técnicos Colombianos Ltda, 1978. 71 p.
10. HUERTAS ARREAGA, Oscar Danilo. *Aplicación del bambú en la construcción de vivienda de interés social, en el municipio de Ixcán, Quiché*. Trabajo de graduación del Arquitecto. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Arquitectura, 1996. 254 p.
11. IXCOLIN OROXOM, Carlos Armando. *Estado actual del bambú como material de construcción en Guatemala*. Trabajo de graduación del Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1999. 169 p.
12. MARTINEZ CÁCERES, Dixon Emmanuel. *Puentes en do mayor* (Tesis de grado). En: Congreso mundial de Bambú / Guadua. (1º : 1992). Memorias I Congreso Mundial de Bambú / Guadua. Pereira: 1992; p. 173.
13. MEJIA SON, José Marcos. *Cáscaras de ferrocemento, una alternativa para techos en viviendas económicas*. Trabajo de graduación del Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2005. 90 p.

14. PUAC ALVAREZ, Octavio Roberto. *Opciones de techos para vivienda en Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1996. 141 p.
15. RODRIGUEZ RUIZ, Sandra Judith. *El bambú como alternativa constructiva en Guatemala*. Trabajo de graduación de la Arquitecta. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Arquitectura, 254 p.
16. URRUTIA Revilla, Juan Francisco. *Propiedades físico mecánicas del bambu (estudio preliminar de 6 especies de la finca chocola, Suchitepéquez)*. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería 1983. 92 p.
17. VALDEZ CANCINOS, David. *Manual para el cultivo del bambú experiencias en Guatemala*. Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícola (ICTA), 2003
18. VÁSQUEZ ALFARO, Luis Fernando. *Losas plegadas de ferrocemento*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1997. 106 p.
19. VETTORAZZI, Lyz. *Bambu Maya*. Práctica profesional, Conex, SA. Guatemala, 2005. 58 p.

