



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

**DISEÑO DE PUENTE PEATONAL UTILIZANDO BAMBÚ ESTRUCTURAL BAJO CARGAS  
DE SERVICIO REQUERIDAS POR LA GUÍA DE ESPECIFICACIONES PARA EL DISEÑO DE  
PUENTES PEATONALES DE AASHTO**

**Byron René Herrera López**

Asesorado por el Ing. Fredy Alexander Contreras Castañaza

Guatemala, agosto de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE PUENTE PEATONAL UTILIZANDO BAMBÚ ESTRUCTURAL BAJO CARGAS  
DE SERVICIO REQUERIDAS POR LA GUÍA DE ESPECIFICACIONES PARA EL DISEÑO DE  
PUENTES PEATONALES DE AASHTO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**BYRON RENÉ HERRERA LÓPEZ**

ASESORADO POR EL ING. FREDY ALEXANDER CONTRERAS CASTAÑAZA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

GUATEMALA, AGOSTO DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Alan Geovani Cosillo Pinto
EXAMINADOR	Ing. Milton Lenin Hernández González
EXAMINADOR	Ing. Andy Williams Alonzo Vásquez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

**DISEÑO DE PUENTE PEATONAL UTILIZANDO BAMBÚ ESTRUCTURAL BAJO CARGAS DE SERVICIO REQUERIDAS POR LA GUÍA DE ESPECIFICACIONES PARA EL DISEÑO DE PUENTES PEATONALES DE AASHTO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 10 de mayo de 2018.

**Byron René Herrera López**

Guatemala, 2 de noviembre de 2020

Ingeniero

Armando Fuentes Roca

Jefe del Departamento de Estructuras

Facultad de Ingeniería

Después de revisar el trabajo de graduación del estudiante Byron René Herrera López, quien se identifica con carne No. 201213291, titulado "DISEÑO DE PUENTE PEATONAL UTILIZANDO BAMBÚ ESTRUCTURAL BAJO CARGAS DE SERVICIO REQUERIDAS POR LA GUÍA DE ESPECIFICACIONES PARA EL DISEÑO DE PUENTES PEATONALES DE AASHTO"; luego de una constante asesoría y habiendo el estudiante realizado las correcciones necesarias, doy por aprobado dicho trabajo y lo autorizo para continuar con el proceso correspondiente.

Sin otro particular, me despido atentamente.



Fredy Alexander Contreras Castañaza  
-Ingeniero Civil- Col.: 10754

Ing. Civil Fredy Alexander Contreras Castañaza

Colegiado 10754



**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
FACULTAD DE INGENIERÍA

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

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**



Guatemala, 29 de noviembre de 2020

Ingeniero  
Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Director de Escuela de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

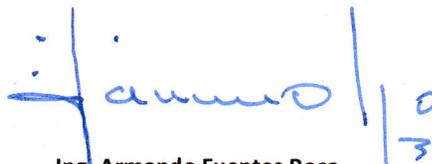
Estimado Ingeniero Aguilar Polanco:

Le informo que he revisado el trabajo de graduación "DISEÑO DE PUENTE PEATONAL UTILIZANDO BAMBÚ ESTRUCTURAL BAJO CARGAS DE SERVICIO REQUERIDAS POR LA GUIA DE ESPECIFICACIONES PARA EL DISEÑO DE PUENTES PEATONALES DE AASHTO"; desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil **Byron René Herrera López**, Registro Académico **201213291**, quién contó con la asesoría del Ing. **Fredy Alexander Contreras Castañaza**.

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

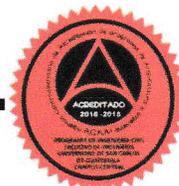
Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

  
Ing. Armando Fuentes Roca  
Coordinador del Departamento de Estructuras

/mrrm.

*Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua*





El Director de la Escuela de Ingeniería Civil y Coordinador del Departamento de Estructuras, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Fredy Alexander Contreras Castañaza al trabajo de graduación del estudiante Byron René Herrera López, **DISEÑO DE PUENTE PEATONAL UTILIZANDO BAMBÚ ESTRUCTURAL BAJO CARGAS DE SERVICIO REQUERIDAS POR LA GUÍA DE ESPECIFICACIONES PARA EL DISEÑO DE PUENTES PEATONALES DE AASHTO**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

Sin otro particular, le saludo muy atentamente.

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. Armando Fuentes Roca  
Director Escuela Ingeniería Civil

Guatemala, agosto 2021  
/mrrm.



DTG.350.2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE PUENTE PEATONAL UTILIZANDO BAMBÚ ESTRUCTURAL BAJO CARGAS DE SERVICIO REQUERIDAS POR LA GUÍA DE ESPECIFICACIONES PARA EL DISEÑO DE PUENTES PEATONALES DE AASHTO**, presentado por el estudiante universitario: **Byron René Herrera López**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada  
Decana



Guatemala, agosto de 2021

/cc

## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por ser la luz que guía mi camino en la vida y por llenarme de bendiciones en todo momento.
<b>Mis padres</b>	Byron Herrera y Nora López, mis más grandes ejemplos en la vida, quienes siempre me han brindado su amor y apoyo incondicional.
<b>Mis hermanos</b>	Fátima y Juan Pablo Herrera, dos amados tesoros por ser fuente de motivación.
<b>Mis abuelos</b>	Domingo Herrera (q. e. p. d.), Mercedes Morataya (q. e. p. d.), Jorge López y Rosa Amelia Monroy (q. e. p. d.), por todo su cariño mostrado y ser parte de mi vida.
<b>Mis primos</b>	Con quienes he compartido toda la vida y han crecido como mis hermanos.
<b>Mi familia en general</b>	A mis tíos y demás familia, quienes por medio de algún consejo u otra manera en su momento me brindaron su apoyo.
<b>Mis amigos de infancia</b>	Andrea Mendoza, Samy Flores, Olga Pérez, Luis Aguirre, Pamela Hernández y Mario Juárez, por siempre estar ahí.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por haberme permitido ser parte de esta gloriosa casa de estudios.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por haber sido mi casa de estudios donde adquirí valioso conocimiento para mi vida profesional.
<b>Mis amigos de la Facultad</b>	Álvaro Ramírez, Gerardo Maldonado, Julio Prado, Kevin Ramírez, Eduardo Zapon, Melvin Pérez, Walter Felipe, Cristian Recinos, Luis Gálvez, Sergio Cabrera, Bayron Telón, Fernando Manzo y demás compañeros por haber compartido conocimiento y momentos valiosos durante la carrera.
<b>Mis primos</b>	Klever López por su apoyo y el conocimiento que compartimos durante la carrera. A Oscar Barrera por haberme apoyado en la realización de ensayos de laboratorio.
<b>Mi asesor</b>	Ing. Fredy Alexander Contreras Castañaza por su ayuda desinteresada y valiosa asesoría para la realización de este trabajo.

**Sección de Tecnología  
de la Madera, CII, USAC**

A Jesiel Enríquez por su ayuda importante para la construcción de los puentes y haberme apoyado de manera desinteresada.

**Ministerio de  
Agricultura, Ganadería y  
Alimentación, MAGA**

Especialmente al ingeniero Enrique Tobar, Gerente del Proyecto industrialización del bambú del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA), quien me brindó su apoyo de manera desinteresada y gestionó la donación del bambú para la realización de este proyecto.

**Misión Internacional de  
la República de China  
(Taiwán) en Guatemala**

Especialmente al arquitecto Julio Chen, por su apoyo técnico y consejos. Agradezco también a los señores Alberto Godoy y Obed Socoy por su importante labor en la construcción de los puentes.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XI
GLOSARIO .....	XV
RESUMEN .....	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
INTRODUCCIÓN .....	XXIII
1. ANTECEDENTES .....	1
1.1. Vigas <i>joist</i> fabricadas de bambú.....	1
1.2. Características físicas y valores de propiedades mecánicas del bambú.....	3
1.3. Ensayos realizados a estructuras de bambú .....	10
2. PUENTES .....	15
2.1. Definición de puente .....	15
2.2. Partes de un puente .....	15
2.2.1. Superestructura .....	15
2.2.2. Subestructura .....	16
2.3. Tipos de puentes .....	17
2.4. Clasificación de los puentes .....	18
2.5. Definición de un puente peatonal .....	19
2.6. Tipos de puentes peatonales.....	20
2.7. Estudios previos al diseño de un puente .....	22

3.	REQUERIMIENTOS Y CARGAS POR AASHTO PARA PUENTES PEATONALES .....	25
3.1.	Cargas de diseño .....	25
3.1.1.	Cargas vivas.....	25
3.1.2.	Vehículo de carga .....	28
3.1.3.	Carga de viento .....	29
3.1.4.	Carga ecuestre .....	30
3.1.5.	Carga por fatiga.....	30
3.2.	Aplicación de cargas .....	31
3.3.	Combinación de cargas.....	31
4.	MÉTODO DE ANÁLISIS PARA LA ESTRUCTURA.....	33
4.1.	Estableciendo combinación de cargas según AASHTO LRFD.....	33
4.1.1.	Resistencia I.....	33
4.1.2.	Fatiga I .....	34
4.2.	Determinación de corte y momento.....	34
4.3.	Diseño estructural .....	35
5.	PROPUESTA DE ARMADO .....	39
5.1.	Baranda.....	41
5.2.	Tablero .....	42
5.3.	Vigas secundarias .....	43
5.4.	Vigas principales .....	44
5.5.	Anclajes.....	46
6.	ANÁLISIS Y DISEÑO ESTRUCTURAL DEL PUENTE .....	49
6.1.	Análisis estructural de las vigas secundarias .....	49
6.2.	Diseño estructural de la viga secundaria.....	52

6.3.	Análisis estructural de las vigas principales.....	55
6.4.	Diseño estructural de la viga principal .....	57
6.5.	Análisis estructural de las vigas secundarias utilizando diámetro de 9 ".....	60
6.6.	Diseño estructural de la viga secundaria de 9 " de diámetro ...	62
6.7.	Análisis estructural de las vigas secundarias utilizando diámetro de 8 " .....	65
6.8.	Diseño estructural de la viga secundaria de 8 " de diámetro ...	67
6.9.	Análisis estructural de las vigas secundarias utilizando diámetro de 7 " .....	70
6.10.	Diseño estructural de la viga secundaria de 7 " de diámetro ...	72
6.11.	Análisis estructural de viga principal a 10 " utilizando diámetro mínimo para viga secundaria de 8 " .....	75
6.12.	Diseño estructural de la viga principal con diámetro de 10 " y viga secundaria de 8 " de diámetro.....	76
6.13.	Análisis estructural de viga principal a 9 " utilizando diámetro mínimo para viga secundaria de 8 " .....	79
6.14.	Diseño estructural de la viga principal con diámetro de 9 " y viga secundaria de 8 " de diámetro.....	81
7.	CONSTRUCCIÓN DEL PUENTE.....	85
8.	DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS .....	87
8.1.	Ensayo de puente peatonal bajo carga de fatiga.....	88
8.2.	Ensayo demostrativo aplicando carga masiva.....	92
9.	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS.....	95
9.1.	Resultados de ensayos a puente peatonal bajo carga de fatiga.....	95

9.2.	Resultados de ensayo de puente sometido a carga masiva ..	120
10.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	123
10.1.	Análisis de los resultados teóricos .....	123
10.2.	Análisis de los resultados de laboratorio .....	126
11.	GUÍA PARA LA ELABORACIÓN DE PUENTE PEATONAL DE BAMBÚ .....	133
11.1.	Herramienta y equipo .....	133
11.1.1.	Equipo de protección personal .....	133
11.1.2.	Herramienta.....	137
11.2.	Selección de materia prima.....	142
11.2.1.	Bambú.....	143
11.2.2.	Anclajes.....	144
11.3.	Lista de materiales .....	145
11.4.	Construcción del puente.....	146
11.4.1.	Vigas principales .....	147
11.4.2.	Colocación de vigas secundarias .....	148
11.4.3.	Colocación de postes verticales de la baranda y vigas principales interiores. ....	150
11.4.4.	Tablero .....	154
11.4.5.	Fijación de postes diagonales .....	157
	CONCLUSIONES.....	161
	RECOMENDACIONES .....	165
	BIBLIOGRAFÍA.....	167

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Lugar de emplazamiento ideal del puente.....	39
2.	Puente peatonal de bambú .....	40
3.	Estructura de puente peatonal de bambú .....	40
4.	Propuesta de baranda.....	42
5.	Propuesta de tablero .....	43
6.	Propuesta de vigas secundarias .....	44
7.	Propuesta de viga principal .....	45
8.	Vista de vigas principales en elevación.....	45
9.	Distribución de pernos en viga principal.....	46
10.	Distribución de pernos en vigas secundarias .....	47
11.	Distribución de pernos en baranda .....	47
12.	Modelo de propuesta de puente peatonal de bambú .....	48
13.	Área tributaria de carga en vigas secundarias .....	49
14.	Área tributaria para viga principal.....	55
15.	Marco de bambú .....	87
16.	Piscina para ensayo de puente .....	88
17.	Medidor volumétrico de agua utilizado para los ensayos .....	89
18.	Deformómetro utilizado para los ensayos .....	90
19.	Carga del puente con agua .....	91
20.	Llenado de puente con carga masiva de agua.....	92
21.	Gráfica de deformación del puente a 0,5 toneladas de carg .....	97
22.	Gráfica de deformación del puente a 1 tonelada de carga.....	98
23.	Gráfica de deformación del puente a 1,5 toneladas de carga .....	98

24.	Gráfica de deformación del puente a 2 toneladas de carga.....	99
25.	Gráfica de deformación del puente a 2,5 toneladas de carga.....	99
26.	Gráfica de deformación del puente a 3 toneladas de carga.....	100
27.	Gráfica de deformación del puente a 3,5 toneladas de carga.....	100
28.	Gráfica de recuperación del puente a 3,5 toneladas de carga.....	103
29.	Gráfica de recuperación del puente a 3 toneladas de carga.....	103
30.	Gráfica de recuperación del puente a 2,5 toneladas de carga.....	104
31.	Gráfica de recuperación del puente a 2 toneladas de carga.....	104
32.	Gráfica de recuperación del puente a 1,5 toneladas de carga.....	105
33.	Gráfica de recuperación del puente a 1 tonelada de carga .....	105
34.	Gráfica de recuperación del puente a 0,5 toneladas de carga.....	106
35.	Gráfica de recuperación instantánea del puente sin carga .....	106
36.	Gráfica de recuperación del puente sin carga pasado 24 horas.....	107
37.	Gráfica de deformación del puente a 0,5 toneladas de carga.....	110
38.	Gráfica de deformación del puente a 1 tonelada de carga .....	110
39.	Gráfica de deformación del puente a 1,5 toneladas de carga.....	111
40.	Gráfica de deformación del puente a 2 toneladas de carga.....	111
41.	Gráfica de deformación del puente a 2,5 toneladas de carga.....	112
42.	Gráfica de deformación del puente a 3 toneladas de carga.....	112
43.	Gráfica de deformación del puente a 3,5 toneladas de carga.....	113
44.	Gráfica de deformación del puente a 3,6 toneladas de carga.....	113
45.	Gráfica de recuperación del puente a 3,6 toneladas de carga.....	116
46.	Gráfica de recuperación del puente a 3 toneladas de carga.....	116
47.	Gráfica de recuperación del puente a 2,5 toneladas de carga.....	117
48.	Gráfica de recuperación del puente a 2 toneladas de carga.....	117
49.	Gráfica de recuperación del puente a 1,5 toneladas de carga.....	118
50.	Gráfica de recuperación del puente a 1 tonelada de carga .....	118
51.	Gráfica de recuperación del puente a 0,5 toneladas de carga.....	119
52.	Gráfica de recuperación del puente sin carga .....	119

53.	Gráfica de recuperación del puente sin carga luego de 24 horas .....	120
54.	Gráfica de deformación a las 6 toneladas de carga .....	121
55.	Gráfica de primer ciclo de carga y descarga en L/2 .....	127
56.	Gráfica de primer ciclo de carga y descarga en L/2 .....	130
57.	Guantes de protección .....	134
58.	Casco de protección.....	134
59.	Calzado industrial.....	135
60.	Lentes de protección .....	136
61.	Mascarilla de protección.....	136
62.	Llave fija combinada.....	138
63.	Sierra de mano con arco .....	138
64.	Machete .....	139
65.	Hacha.....	139
66.	Barreno .....	140
67.	Sierra tipo sable .....	141
68.	Clavadora neumática .....	141
69.	Flexómetro .....	142
70.	Bambú seleccionado para los puentes.....	143
71.	Varilla de hierro galvanizado .....	144
72.	Tuerca hexagonal de hierro galvanizado .....	144
73.	Roldana plana de hierro galvanizado .....	145
74.	Localización de los pernos en las vigas principales .....	147
75.	Ensamblaje de las vigas principales.....	148
76.	Distribución de pernos en vigas secundarias .....	149
77.	Colocación de viga secundaria .....	149
78.	Vigas secundarias colocadas.....	150
79.	Distribución de pernos para anclajes de los postes a las vigas .....	151
80.	Distribución de pernos para anclajes de los postes de la baranda ....	151
81.	Detalle en elevación de distribución de pernos a postes de baranda	152

82.	Postes verticales con boca de pescado .....	152
83.	Tornillos busca rosca .....	153
84.	Montaje de baranda finalizado .....	153
85.	Elaboración de esterilla con ayuda del hacha.....	155
86.	Caña rajada con hacha para elaboración de esterilla .....	155
87.	Esterilla .....	156
88.	Esterilla terminada sin nudos y paredes .....	156
89.	Colocación de la esterilla sobre vigas secundarias .....	157
90.	Distribución de postes diagonales de baranda .....	158
91.	Corte con forma de boca de pescado .....	158
92.	Puente peatonal de bambú terminado .....	159
93.	Puente peatonal de bambú terminado .....	159

## TABLAS

I.	Características físicas de cuatro especies de bambú 1 .....	4
II.	Características físicas de cuatro especies de bambú 2 .....	5
III.	Características físicas de tres especies de bambú .....	5
IV.	Propiedades mecánicas de las especies de bambú .....	9
V.	Lecturas en deformómetros del primer ciclo de carga medidas en centímetros .....	95
VI.	Deformaciones en el puente en función a la carga .....	96
VII.	Lectura de los deformómetros en proceso de descarga del puente ...	101
VIII.	Deformaciones del puente al momento de descarga.....	102
IX.	Lecturas en deformómetros del segundo ciclo de carga medidas en centímetros .....	108
X.	Deformaciones en el puente en función a la carga en segundo ciclo .	109
XI.	Lectura de los deformómetros en proceso de descarga del puente ...	114
XII.	Deformaciones del puente al momento de descarga.....	115

XIII.	Lecturas del deformómetro durante el ensayo .....	120
XIV.	Deformaciones del puente durante el proceso de carga masiva.....	121
XV.	Resumen de resultados de esfuerzos teóricos .....	123
XVI.	Datos de deformómetro a L/2 en primer ciclo de carga y descarga ...	126
XVII.	Datos de deformómetro a L/2 en segundo ciclo de carga y descarga.....	129
XVIII.	Lista de materiales para puente peatonal .....	146



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>A</b>	Área
<b>A<sub>I</sub></b>	Área de la cubierta
<b>W</b>	Carga de diseño
<b>W<sub>M</sub></b>	Carga de diseño mayorada
<b>W<sub>MD</sub></b>	Carga de diseño mayorada distribuida
<b>P<sub>NW</sub></b>	Carga de fatiga por viento
<b>D<sub>LB</sub></b>	Carga muerta de la baranda
<b>D<sub>LVP</sub></b>	Carga muerta de la viga principal
<b>D<sub>LVS</sub></b>	Carga muerta de la viga secundaria
<b>D<sub>LT</sub></b>	Carga muerta del tablero
<b>P<sub>L</sub></b>	Carga peatonal
<b>P<sub>LD</sub></b>	Carga peatonal distribuida linealmente
<b>C<sub>m</sub></b>	Centímetro
<b>C<sub>d</sub></b>	Coefficiente promedio de velocidad de viento
<b>V<sub>MAX</sub></b>	Cortante máximo
<b>Δy</b>	Deformación en el eje y
<b>D<sub>e</sub></b>	Diámetro externo
<b>f<sub>v</sub></b>	Esfuerzo a corte
<b>f<sub>m</sub></b>	Esfuerzo a flexión
<b>F´<sub>v</sub></b>	Esfuerzo permisible a corte
<b>f´<sub>m</sub></b>	Esfuerzo permisible a flexión
<b>t</b>	Espesor promedio del elemento
<b>γ<sub>p</sub></b>	Factor de cargas para cargas permanentes

<b>IF</b>	Factor de fatiga
<b>V</b>	Fuerza cortante
<b>g/cm<sup>3</sup></b>	Gramo entre centímetro al cubo
<b>h</b>	Hora
<b>kg<sub>f</sub></b>	Kilogramo fuerza
<b>kg/cm<sup>2</sup></b>	Kilogramo entre centímetro cuadrado
<b>kg<sub>f</sub>/m</b>	Kilogramo fuerza entre metro
<b>kg<sub>f</sub>/m<sup>2</sup></b>	Kilogramo fuerza entre metro cuadrado
<b>kg<sub>f</sub>/m<sup>3</sup></b>	Kilogramo fuerza entre metro cúbico
<b>y<sub>f</sub></b>	Lectura final en el eje y
<b>y<sub>o</sub></b>	Lectura inicial en el eje y
<b>lb</b>	Libra
<b>lb/ft<sup>2</sup></b>	Libra entre pie cuadrado
<b>L</b>	Longitud total
<b>l</b>	Luz entre apoyos
<b>L<sub>v</sub></b>	Luz libre de vano
<b>Mpa</b>	Megapascales
<b>m</b>	Metro
<b>m<sup>2</sup></b>	Metro cuadrado
<b>m<sup>3</sup></b>	Metro cúbico
<b>mm</b>	Milímetro
<b>mm<sup>3</sup></b>	Milímetro cúbico
<b>mph</b>	Millas por hora
<b>S</b>	Módulo de sección
<b>M<sub>MAX</sub></b>	Momento máximo
<b>N</b>	Newton
<b>N/m<sup>3</sup></b>	Newton entre metro cúbico
<b>N mm</b>	Newton por milímetro
<b>D<sub>L</sub></b>	Peso propio de la estructura

<b>D<sub>LD</sub></b>	Peso propio de la estructura distribuido
<b>ft</b>	Pie
<b>ft<sup>2</sup></b>	Pie cuadrado
<b>%</b>	Porcentaje
<b>“</b>	Pulgada
<b>Ton</b>	Tonelada
<b>u</b>	Unidad
<b>π</b>	Valor de pi
<b>V<sub>mean</sub></b>	Velocidad promedio de viento
<b>Vol<sub>B</sub></b>	Volumen de la baranda



## GLOSARIO

<b>AASHTO</b>	Asociación Americana de Carreteras de Estado y Funcionarios del Transporte en Estados Unidos.
<b>AASHTO LRFD</b>	Guía de especificaciones para factores de diseño de carga y resistencia.
<b>AASHTO Signs</b>	Guía de especificaciones para soportes estructurales de señalización de carreteras, luminarias y señales de tránsito.
<b>Acueducto</b>	Conducto de agua formado por canales y caños subterráneos, o por arcos levantados.
<b>Anclaje</b>	Acción para fijar o sujetar elementos. En la construcción comúnmente se usan varillas roscadas de acero.
<b>Área tributaria</b>	Se refiere al área de carga de servicio distribuida que afecta a un elemento estructural.
<b>Barlovento</b>	Parte de donde viene el viento, con respecto a un punto o lugar determinado.
<b>Caña</b>	Tallo de las plantas gramíneas, por lo común hueco y nudoso.

<b>Carga de diseño</b>	Es la carga que se supone para el diseño de una estructura.
<b>Carga de diseño mayorada</b>	Es la carga de diseño aumentada con un factor de seguridad para el diseño de un elemento estructural.
<b>Carga de viento</b>	Carga provocada por ráfagas de viento sobre un elemento estructural.
<b>Carga ecuestre</b>	Carga provocada por el galope de un caballo sobre un elemento estructural.
<b>Carga muerta</b>	Carga aplicada en una estructura provocada por el peso de la misma estructura y el peso de los elementos permanentes.
<b>Carga viva</b>	Carga movable sobre una estructura que incluye mobiliario, personas, vehículos, entre otros.
<b>Caudal</b>	Cantidad de un fluido que discurre en un determinado lugar por unidad de tiempo.
<b>Culmo</b>	Tallo de las plantas mayoritariamente herbáceas como las cañas de bambú.
<b>Emplazamiento</b>	Acción de colocar o ubicar un elemento.
<b>Factor de carga</b>	Valor para mayorar una carga y establecerla en parámetros de seguridad estructural.

<b>Longitudinal</b>	Que actúa relativo a la longitud del elemento.
<b>Nudo</b>	En algunas plantas y en sus raíces, parte por donde parece que están unidas las partes de las que se compone; como en las cañas y bejucos.
<b>Probeta</b>	Muestra de cualquier sustancia o material para realizar ensayos de laboratorio.
<b>Rizoma</b>	Tallo horizontal y subterráneo.
<b>Tipología estructural</b>	Referente al tipo de modelos de estructuras formados por elementos estructurales como vigas, columnas, losas, entre otros.
<b>Voladizo</b>	Dicho de un elemento: que vuela o sobresale en relación con el resto de la estructura.



## RESUMEN

En Latinoamérica existen muchas comunidades, especialmente rurales, que se encuentran frente a la adversidad de tener problemas de infraestructura. Esto perjudica grandemente el desarrollo de las personas en diferentes ámbitos sociales, en particular el socioeconómico. La manera de afrontar estas situaciones ha motivado a la gente a utilizar diferentes tipos de materiales en la construcción, en busca de una solución económica y funcional, tal es el caso del bambú.

Para el diseño de una estructura de bambú es necesario contar con información sobre las características físicas y propiedades mecánicas de las especies de bambú que se han estudiado, por lo cual se hizo referencia a trabajos de graduación en Guatemala. Dicha información se menciona en el capítulo 1. Así mismo, se hizo referencia a la Norma Técnica Peruana E-100 Bambú con el objeto de utilizar ciertos criterios.

En el capítulo 3 se detallaron los requerimientos y cargas según AASHTO para puentes peatonales. Si bien son cargas requeridas para estructuras de concreto armado, se pretendía demostrar la gran resistencia que el bambú puede presentar ante este tipo de esfuerzos.

Se presentó una propuesta de armado para el puente de uso peatonal. A partir de dicha propuesta, se realizó un análisis estructural y por consiguiente el diseño estructural de la armadura para obtener resultados teóricos del comportamiento de la estructura, y de esta manera definir la especie de bambú que mejor se adapte a las condiciones de carga.

Seguido de ello, se realizó la construcción de dos modelos del puente propuesto. Se llevaron a cabo ensayos demostrativos con carga de fatiga y una carga masiva, con el fin de mostrar a la población la confiabilidad del material en este tipo de estructuras, para aprovechar y obtener datos experimentales sobre el comportamiento de la misma.

Finalmente, se presenta el análisis de resultados tanto teórico como de los ensayos de laboratorio. Se elaboró una guía para la construcción de un puente peatonal utilizando bambú, para que las personas que necesiten construir una estructura como tal, comprendan fácilmente los pasos de fabricación del puente a partir de cada uno de los elementos que lo componen.

# OBJETIVOS

## General

Diseñar un puente peatonal utilizando bambú estructural bajo cargas de servicio requeridas por la guía de especificaciones para el diseño de puentes peatonales de AASHTO.

## Específicos

1. Recopilar información bibliográfica de estudios realizados en el Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería para seleccionar variedades de bambú por utilizar en el diseño, según sus características físicas y mecánicas.
2. Proponer un modelo de estructura del puente.
3. Realizar análisis estructural del modelo propuesto.
4. Proponer diseño de armado para subestructura del puente según características del bambú seleccionado y análisis estructural.
5. Proponer diseño de armado para super estructura del puente, según características del bambú seleccionado y análisis estructural.
6. Realizar ensayo para analizar comportamiento de la estructura bajo condiciones de carga distribuida.

7. Comparar resultados experimentales obtenidos con las condiciones establecidas por la guía de especificaciones para el diseño de puentes peatonales de AASHTO y validar el diseño del puente.
8. Realizar una guía para elaboración de un puente peatonal.

## INTRODUCCIÓN

La necesidad de comunicación y la búsqueda de materiales alternativos para la construcción de estructuras ha llevado a la ingeniería civil a implementar el uso de materiales renovables como el bambú o de fácil obtención como los polímeros. Estos ofrecen gran resistencia estructural y permiten generar elementos de fácil fabricación, bajo costo y relativamente livianos en relación a los materiales tradicionales.

Con vista a lo anterior, se diseñará un puente peatonal estructurado de bambú. Previo al diseño, se realizará un análisis estructural del armado propuesto, determinando cargas y momentos en los puntos críticos del puente.

Así mismo se construirá dos puentes para realizar ensayos demostrativos, con el fin de mostrar a la población en general la confiabilidad de este material cuando es utilizado como materia prima en estructuras que requieren de alta resistencia sometida a grandes esfuerzo.



# 1. ANTECEDENTES

Actualmente no existe una normativa a nivel nacional que rija el diseño estructural utilizando como material estructural el bambú. Sin embargo, en el Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería se han realizado investigaciones con las que se obtuvo resultados que determinaron esfuerzos de compresión, tensión, corte y flexión. Estos datos avalan el bambú como un material estructural de buen comportamiento, dependiendo de la variedad que se analice.

Debido a que estas investigaciones sobre el material ya fueron realizadas se cuenta con datos de resistencias y características del mismo. Es importante aprovechar estos datos para llevar a cabo diseños de estructuras que sean de beneficio para la población presentando soluciones innovadoras.

Si bien AASHTO presenta condiciones para diseño de puentes peatonales de concreto armado, es de mucha importancia adaptar estas condiciones a materiales que de igual manera cumplan con lo requerido.

## 1.1. Vigas *joist* fabricadas de bambú

Una viga *joist* es un elemento estructural con una configuración de alma abierta, la cual se diseña como una estructura que actúa simplemente apoyada. La viga soporta directamente cargas como las de una cubierta o un entrepiso, utiliza elementos longitudinales y transversales, orientados en ángulos constantes, los cuales forman triángulos a lo largo de la luz del elemento.

Tomando como referencia la tesis de Monterroso, realizada en el Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos, se demostró que las especies que presentan mayor ventaja para uso en la fabricación de vigas *joist* son *Guadua Angustifolia* y *Gigantochloa Verticillata*, ya que presentan propiedades óptimas para ser utilizadas en la construcción de dichos elementos estructurales.

La especie de bambú *Guadua Angustifolia* se utilizó en el diseño de vigas *joist* para conformar los cordones longitudinales, tanto superior como inferior, debido a que es la especie con mayor investigación. Es apta para uso en miembros estructurales sometidos a flexión, tensión paralela a la fibra, tensión y compresión perpendicular a las fibras.

La especie de bambú *Gigantochloa Verticillata* se utilizó en el diseño de vigas *joist* para conformar los cordones diagonales, debido a que presenta gran facilidad de encontrarse en diámetros y espesores de pared adecuados, para resistir el esfuerzo cortante inducido al material cuando la viga este en servicio.

La resistencia mecánica de las vigas *joist* que se obtuvo experimentalmente por medio de ensayos de laboratorio y haciendo uso de la Norma Técnica Peruana E-100 Bambú, antes de lograr la deflexión máxima permisible de 15 milímetros fue en un rango de [78 kgf/m – 200 kgf/m]  $\pm$  50 kgf/m. Presenta elementos que se comportan de manera adecuada para requerimientos estructurales.

## **1.2. Características físicas y valores de propiedades mecánicas del bambú**

En el bambú pueden presentarse las siguientes características físicas y propiedades mecánicas.

- Contenido de humedad: los tallos vivos de bambú, al igual que los árboles, poseen una cantidad considerable de humedad gracias a la presencia de savia. En ella se conducen los alimentos de la planta, los cuales son obtenidos del suelo por medio de los rizomas y son indispensable en el crecimiento y vida del bambú. El contenido de humedad en el bambú joven es casi igual en diferentes partes del tallo; a diferencia de los tallos maduros donde el contenido de humedad decrece con su altura.

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

El contenido de humedad del bambú, al igual que el de la madera, se determina como un porcentaje de su peso seco al horno. Puede determinarse por medio del método de secado al horno o bien utilizando medidores eléctricos, si bien estos determinan la humedad de forma rápida, es menos preciso que el método al horno. El método de secado al horno se realiza aproximadamente a una temperatura de 100 grados centígrados.

- Contracción: conforme el tallo del bambú se va secando, empieza a perder agua en las paredes. Como consecuencia, se presentan contracciones volumétricas. Cuando la humedad del bambú se equilibra con la del

medioambiente, la retracción termina, debido a que su efecto es proporcional al contenido de humedad del tallo y del estado higrométrico del medioambiente. Existen varios factores que afectan el secado, tales como especie, condiciones de secado, posición de la muestra respecto al tallo, espesor de la pared del tallo y su grado de madurez.

Los cambios de volumen son mayores en el bambú joven en comparación a los cambios del bambú de mayor edad. Durante el proceso de secado, los bambúes jóvenes con paredes delgadas se deforman sin cambios y sus paredes tienden a aplastarse. Los tallos maduros que tienen paredes de espesores grandes tienden a presentar fisuras en su superficie, especialmente cuando las condiciones de secado son severas. La contracción se produce de manera desigual y su efecto es mayormente notable en los entrenudos del tallo.

- Densidad: la densidad indica el peso del bambú por unidad de volumen. La densidad es diferente para cada especie y su valor varía entre los culmos de una especie, en sus diversos tramos, así como en sus partes internas y externas. El peso y el volumen varían con la cantidad de humedad en la planta y, por consiguiente, con el grado de madurez del tallo.

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

No	Especie	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Contenido de humedad (%)
1	<i>Bambusa textiles</i>	0,77	15,6
2	<i>Bambusa tulda</i>	0,87	14,8
3	<i>Bambusa tuldooides</i>	0,78	14,2

Continuación tabla I.

4	<i>Bambusa vulgaris</i>	0,69	16,6
---	-------------------------	------	------

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

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

No	Especie	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Contenido de humedad (%)
1	<i>Bambusa arundinacea</i>	0,56	14,9
2	<i>Bambusa melocana baccifera</i>	0,73	14,4
3	<i>Bambusa phylostachys bambusoides</i>	0,60	14,6
4	<i>Bambusa chusquea pittieri</i>	0,95	15,5

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

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

No	Especie	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Contenido de humedad (%)
1	<i>Giganteus Apus</i>	0,96	37,3
2	<i>Bambusa giganteochola verticilata</i>	0,63	16,2
3	<i>Bambusa Guadua Angustifolia</i>	0,62	14,3

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

En las tablas I, II y III se muestran características físicas de especies de bambú ya estudiadas.

- Tensión paralela a la fibra: aunque es una excelente propiedad que posee, es poco frecuente ejercer tensión longitudinal a una especie de bambú. Esto se debe a que es muy difícil ajustar los extremos lo suficiente como para lograr desarrollar esfuerzos de tensión al miembro estructural. Debido a que la resistencia a esfuerzos de tensión paralela a la fibra es superior a la resistencia a esfuerzos de compresión y mucho mayor a la resistencia por esfuerzos cortantes, resulta difícil realizar ensayos satisfactorios con tensión paralela a los miembros estructurales.
- Compresión paralela a la fibra: la mayoría del bambú utilizado en la construcción es sometido a compresión paralela a la fibra como sucede en vigas y columnas.

Este tipo de cargas tienden a aplastar y acortar los miembros longitudinalmente. Los ensayos estáticos de compresión son importantes para indicar directamente el desempeño de los miembros bajo cargas de servicio.

La resistencia a esfuerzos de compresión del bambú es relativamente alta, pero carece de sentido si no se especifica el grado de sazónamiento y muy importante la relación entre la longitud y el diámetro del miembro. Es fundamental precisar el grado de sazónamiento ya que, como sucede en la madera, la humedad provoca una disminución en la rigidez de las células fibrosas, reduciendo así las propiedades mecánicas, sobre todo en esfuerzos de compresión y flexión.

De igual manera, debe tomarse en consideración la relación entre la longitud y el diámetro del miembro. Si la longitud de un tallo es demasiado grande en relación con la sección transversal mínima, entonces la resistencia bajo esfuerzos de compresión se reduce considerablemente por un efecto de flambéo. La falla por flambéo lateral o flexión ocurre antes de que se presente por completo la resistencia a compresión.

- Corte paralelo a la fibra: el esfuerzo cortante es la capacidad que posee el bambú a resistir fuerzas que tienden a provocar deslizamiento de una zona del material con relación a otra porción adyacente. El corte es una fuerza que actúa de forma paralela a un plano, a diferencia de la tensión y compresión que son fuerzas que actúan de manera perpendicular al área considerada.

La falla por corte es distinta a la falla por tensión o compresión, ya que no se presenta algún tipo de reducción localizada del área ni se presenta algún tipo de alargamiento. La utilización del bambú en la construcción involucra esfuerzos cortantes y las fuerzas que los provocan pueden actuar a lo largo de la fibra, a través de la fibra, en forma inclinada o en diagonal a la misma.

La mayoría de uniones de miembros de bambú están sujetos a corte paralelo a la fibra. El corte perpendicular a la fibra no produce una falla directamente en el plano de la sección transversal, debido a que las otras propiedades inciden en que la falla ocurra de una u otra manera, causada por aplastamiento a través de la fibra. El efecto del corte oblicuo o en diagonal puede observarse en columnas cortas ensayadas a compresión.

- Tensión perpendicular a la fibra: es la disgregación de las fibras producido por fuerzas que actúan de forma perpendicular. Tienen relación al clivaje por la tendencia de separar el bambú a lo largo de la fibra. También existe una relación al agrietamiento superficial que se produce durante el secado al cual todas las especies de bambú son propensas. Por lo general, las rajaduras en la superficie aparecen cuando los esfuerzos que se producen durante el secado exceden a la resistencia del bambú a la tensión perpendicular a la fibra. Debido a esto, la tendencia del bambú a rajarse limita el uso de clavos o pernos para las uniones.
- Clivaje: esta característica se refiere a la resistencia del bambú al desgarramiento. Se define como la fuerza necesaria para producir una falla por unidad de longitud. Las fuerzas actúan en forma de cuña para producir un hendimiento en el bambú a lo largo de la fibra. La baja resistencia al clivaje permite cortar longitudinalmente las cañas de bambú, mientras que una resistencia alta es requerida para las uniones con pernos y clavos.

La tabla IV muestra propiedades mecánicas de diferentes especies de bambú estudiadas previamente.

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

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

Fuente: MONTERROSO, Josué. *Diseño y evaluación de vigas joist para estructuras de techos livianos, fabricadas con bambú.* p. 30.

### 1.3. Ensayos realizados a estructuras de bambú

En Guatemala existen antecedentes de ensayos a estructuras de bambú, realizados por Batz, Manuel detallados en su tesis *Cubiertas de techo utilizando cañas de bambú mampuestas de 2,5 metros de largo*, ensayos que fueron realizados en la Universidad de San Carlos de Guatemala, los cuales se describen a continuación.

- Impacto: para empezar con el procedimiento del ensayo, es necesario que se coloquen las probetas en posición horizontal sobre la estructura de fijación. Debido a las diferencias de aplicación de cargas, las mediciones que se obtienen a partir de pruebas colocando las probetas de manera horizontal no son comparables con las mediciones que se obtienen a partir de pruebas con las probetas colocadas de manera vertical. Es importante localizar el centro geométrico de las probetas, ya que será el punto donde se producirá el impacto.

Se debe tomar mediciones de deformación en la probeta por cada impacto que se produce, para lo cual se deberá colocar un deflectómetro instantáneo en el lado inferior de la probeta y debe ubicarse en el centro geométrico.

Para producir los impactos, se debe dejar caer una bolsa de cuero, como se especifica en la norma ASTM E-695-03, de diez kilogramos sobre la probeta en el centro geométrico. La bolsa debe dejarse caer tantas veces como sea necesario o hasta que se obtengan los resultados que deseen.

La altura a la cual se debe dejar caer es variable e irá aumentando en intervalos de 20 centímetros por cada impacto. Se deberá de tomar lecturas del deflectómetro instantáneo antes y después de cada impacto.

- Deflexión: para la realización de este ensayo debe contarse con tres probetas, las cuales deberán de identificarse; luego, deben colocarse sobre apoyos en sus extremos, asegurado fuertemente para la estabilidad del sistema y, de esta manera, aplicar de manera correcta las cargas que sean necesarias.
- Una vez se tengan colocadas las probetas sobre los apoyos, se procederá a medir la distancia que existe entre cada uno de los apoyos. De esta manera, se puede proceder a calcular la deflexión máxima permisible de cada una de las probetas.
- Una vez se determine la deflexión máxima permisible, se colocará los deformómetros que indicarán la deformación que existe en las probetas al momento de irle aplicando carga; tal carga se aplicará de forma distribuida sobre el área total de la probeta. La aplicación de la carga consiste en una estructura de madera que servirá como apoyo para colocar un material impermeable lo que permitirá crear una especie de contenedor, el cual estará apoyado de manera independiente a las probetas de bambú. Se procederá a llenar con agua de manera controlada para simular una carga distribuida en toda la probeta. Al mismo tiempo que se coloque la carga sobre cada una de las probetas, se deberá tomar lecturas de los deformómetros los cuales deberán llegar hasta la deflexión máxima permisible por la norma técnica peruana E 100. Por último, se toma el dato de la carga máxima de cada uno de las probetas.

- Absorción: este ensayo se realizó en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química. Se tomó la lectura del peso inicial de cada una de las tres probetas para conocer la cantidad de agua que pueden retener al utilizar bambú en una cubierta de techo. Una vez se registra el peso inicial se procede a colocar las probetas sobre la estructura de fijación. Las probetas a ensayar deben estar colocadas de manera inclinada a un ángulo de  $45^{\circ}$  simulando un techo inclinado. De esta manera se logra que el agua escurra de manera apropiada y que el bambú retenga lo menos posible.

Debe colocarse un artefacto con forma de cuadrícula elaborado con tubos PVC, los cuales deben ir perforados para crear la simulación de lluvia sobre cada una de las probetas. Dicho simulador de lluvia debe estar conectado a una toma de agua; una vez colocado sobre la probeta, se dará paso al flujo de agua. Se debe permitir el flujo de agua por al menos 15 minutos para que la probeta pueda saturarse de agua.

Una vez haya transcurrido el tiempo establecido, se debe retirar el simulador de lluvia para pesar cada una de las probetas. De esta manera se podrá conocer la cantidad de agua que retenga cada una por medio de una simple diferencia de peso.

- Permeabilidad: este ensayo se realizó en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química. Su finalidad es comprobar que las cubiertas de techos elaboradas con bambú puedan evacuar de manera adecuada el agua de lluvia; esto se logra a través de una inspección visual en puntos estratégicos, los cuales son:

- Nudos
- Pasador
- Traslape de cañas

Para realizar el ensayo es necesario contar con tres probetas, las cuales se deben colocar de forma inclinada en un ángulo de 45 °. Lo recomendable para este tipo de cubiertas de techos para que el agua pueda ser evacuada apropiadamente.

Para simular lluvia es necesario crear un artefacto hecho con tubería de PVC de ½" perforados. El simulador de lluvia debe colocarse sobre las probetas y deberá estar conectado a una toma de agua, la cual debe ser previamente aforada para conocer el caudal de dicha toma de agua. Seguidamente se debe darle paso al flujo de agua que se esparcirá sobre la probeta. Es necesario medir el tiempo al cual estarán expuestas las probetas; se debe realizar inspecciones visuales constantemente de las filtraciones que se pudieran presentar durante el lapso de tiempo en que las probetas estarán expuestas al simulador de lluvia.



## **2. PUENTES**

### **2.1. Definición de puente**

Es una estructura que se soporta a sí misma y a las cargas del tráfico vehicular y peatonal que pasan sobre ella. El puente tiene la finalidad de brindar continuidad al camino salvando obstáculos, ya sean naturales o artificiales, tales como ríos, vías de tráfico, barrancos, canales, entre otros.

### **2.2. Partes de un puente**

Las partes de un puente pueden dividirse en superestructura y subestructura.

#### **2.2.1. Superestructura**

- **Carpeta de rodadura:** este elemento es el encargado de absorber el desgaste debido al tránsito que existe dentro del puente, tanto vehicular como peatonal. La carpeta de rodadura es comúnmente constituida ya sea de asfalto, o bien de concreto.
- **Losa:** es el elemento estructural del puente encargado de transmitir la carga móvil a las vigas principales. La losa debe de cumplir con el refuerzo necesario para satisfacer las cargas de servicio impuestas en el diseño. Debido al acabado final, la losa podría también funcionar como carpeta de rodadura.

- Vigas principales: son elementos de gran importancia en la estructura. Son los designados para transmitir toda la carga de la superestructura hacia la subestructura. En puentes de concreto reforzado, estos elementos deben de cumplir con criterios como deformación máxima, acero máximo y mínimo, así como el acero por temperatura.
- Vigas secundarias: también conocidas como vigas diafragmas, permiten darle estabilidad lateral contra el flambeo a las vigas principales. Se deben colocar de forma perpendicular a las vigas para así generar un tope contra el volteo. Adicionalmente, debe colocarse una siempre al inicio y al final de un tramo. Estas permiten que el puente genere una deformación uniforme en su estructura cuando es sometido a cargas de servicio.
- Baranda: en los puentes vehiculares, la baranda debe garantizar que, en un accidente, el impacto que sufran a causa de un vehículo, estos elementos no fallen permitiendo así, garantizar la integridad del conductor y ocupantes del vehículo. Por otro lado, las barandas en los puentes peatonales funcionan como apoyos de pasamanos y disminuyen el riesgo de caída del peatón.
- Aproxes: estos elementos se presentan en puentes vehiculares cuando no se cuenta con un talud de acceso al puente. Son los encargados de brindar un ingreso al puente desde la carretera.

### **2.2.2. Subestructura**

- Topes sísmicos: son los encargados de evitar que exista un desplazamiento de las vigas principales durante un evento sísmico. Son

bloques de concreto que se colocan en los costados entre las vigas principales, de esta manera se genera una restricción en el movimiento.

- Vigas cabezal: sirven de apoyo para las vigas principales. Deben poseer rigidez para garantizar una transmisión uniforme de los esfuerzos. Así mismo también sirven como apoyos de los topes sísmicos que van entre las vigas principales.
- Pilas: son el elemento estructural encargado de transmitir cargas que actúan en la superestructura, hacia la cimentación del puente. Por lo general se colocan en puentes de grandes longitudes, por lo cual sirven de apoyos intermedios.
- Estribos: sirven de protección contra la erosión y protegen los costados de las vigas cabezal. Se encuentran en ambos extremos del puente para evitar una posible falla del material portante.
- Cimentación: son los elementos encargados de transmitir cargas de la estructura al suelo, para distintos casos según lo necesario en diseño, pueden ser pilotes, zapatas o bien losas de cimentación.

### **2.3. Tipos de puentes**

Los puentes pueden clasificarse según su uso. Pueden ser para paso vehicular, los cuales sirven para transportes terrestres; peatonales, para uso de personas, y para transporte de fluidos, como los son oleoductos y acueductos.

## 2.4. Clasificación de los puentes

Los puentes pueden ser clasificados en relación a su longitud total, longitud de vano, calzada, objetivo, materiales y diseño o estructuración.

- Longitud total: de acuerdo con la longitud total (L), los puentes se pueden agrupar de acuerdo con el siguiente criterio de clasificación.
  - Alcantarillas y puentes losas       $0,50 \text{ m} < L < 10,00 \text{ m}$
  - Puentes menores       $10,00 \text{ m} < L < 40,00 \text{ m}$
  - Puentes medianos       $40,00 \text{ m} < L < 200,00 \text{ m}$
  - Puentes mayores       $200,00 \text{ m} < L$
  
- Longitud de vano: según la longitud de la luz libre o vano ( $L_v$ ) las estructuras pueden clasificarse en:
  - Alcantarillas y estructuras menores       $0,50 \text{ m} < L_v < 10,0 \text{ m}$
  - Estructuras medianas       $10,00 \text{ m} < L_v < 70,0 \text{ m}$
  - Estructuras mayores       $70,0 \text{ m} < L_v$
  
- Calzada: según el número de pistas o vías de tránsito para el cual está diseñado el puente, estos pueden clasificarse como puente de una vía, doble vía, triple vía o más.
  
- Objetivo: de acuerdo con su finalidad y objetivo, los puentes pueden ser clasificados en:
  - Puentes rurales
  - Puentes urbanos
  - Viaductos
  - Pasos a desnivel
  - Puentes peatonales o pasarelas

- Puentes ferroviarios
- Puentes provisionales o de emergencia
- Materiales: con relación a los materiales constituyentes del puente, estos podrían ser:
  - De madera
  - De acero
  - De concreto armado
  - De concreto pre-esforzado
  - De mampostería
  - Puentes mixtos, donde se combinan los materiales anteriormente señalados.
- Diseño: según su diseño o estructuración, los puentes pueden ser clasificados de acuerdo a lo siguiente:
  - Puentes de tramos simplemente apoyados, continuos o de vigas en voladizo
  - Puentes en arco
  - Puentes aporticados, marcos
  - Puentes colgantes, con o sin viga rigidizante
  - Puentes atirantados

## **2.5. Definición de un puente peatonal**

El puente es una estructura que da continuidad al camino salvando obstáculos, ya sean naturales o artificiales, tales como ríos, vías de tráfico, barrancos, entre otros. Es una estructura que se soporta a sí misma, destinada a soportar cargas principalmente de tipo peatonal. El puente de uso peatonal puede

también soportar cargas de tipo vehicular las cuales pueden ser bicicletas o algún otro tipo de vehículo que se especifique en el diseño.

## **2.6. Tipos de puentes peatonales**

Para definir la tipología estructural del puente hay que tomar en cuenta una serie de factores. Debe realizarse una evaluación de condiciones generales que pueden afectar al proyecto, dichas condiciones no dependen del diseñador.

La función del puente es una de las condiciones que debe evaluarse y, como punto importante, si se ubicará en un área urbana o en una zona rural. Seguido de ello es importante establecer la finalidad de la estructura, si será de uso peatonal, vehicular, para trenes, entre otros.

Según la geología y geotecnia del lugar, las consideraciones básicas que deben de tomarse en cuenta son el apareamiento de fallas que puedan condicionar apoyos y tipos de cimentación para la estructura, y las bajas resistencias que el suelo pueda presentar ya que esto condiciona el número de claros en el puente.

Es importante resaltar el papel del medio ambiente, ya que las condiciones naturales del lugar podrían dañar la estructura, como el hecho de una exposición excesiva a sales u otros elementos ambientales que pondrían en desventaja el puente. Otra variable a tomar en consideración en relación al medio ambiente, es la susceptibilidad que un río pueda presentar a socavación, ya que esto requeriría de un análisis hidráulico para determinar ubicación y separación de pilas en cauces.

La economía es un factor que no se puede pasar por alto cuando a construir un puente se refiere. El precio de los materiales que constituirán la obra es primordial a tomar en cuenta para este factor. Como punto añadido, la repetitividad de secciones en la estructura podría ayudar a la economía del puente. Cuando este sea terminado, el mantenimiento de la estructura debe también ser económicamente viable.

La determinación de los recursos disponibles consiste en seleccionar de manera idónea los recursos del proyecto y proponer los materiales que presenten mejor adaptabilidad a las condiciones generales mencionadas. Algunas opciones de recursos que comúnmente se utilizan, son:

- Concreto reforzado
- Concreto pre-esforzado
- Acero estructural
- Madera
- Cables de alta resistencia
- Aluminio
- Combinaciones de los recursos ya mencionados

Como los estudios han demostrado por su alta resistencia a diferentes tipos de esfuerzos, el bambú estructural también podría ser considerado dentro de estos recursos.

Una vez se obtengan los resultados de los análisis previos en referencia a las condiciones generales del proyecto y de análisis de los recursos, se procede a definir la tipología estructural del puente.

Los puentes, de acuerdo a su tipología, pueden ser de diferentes tipos. Esto depende del diseño estructural y pueden ser:

- Ejemplos de tipología estructural de puentes en concreto.
  - Losas armadas
  - Losas pre-esforzadas
  - Vigas armadas
  - Arcos armados
  - Cajones en voladizo
  - Puentes atirantados
  
- Ejemplos de tipología estructural de puentes acero
  - Vigas
  - Armaduras sobre el tablero
  - Armaduras bajo el tablero
  - Puentes atirantados
  - Puentes colgantes

## **2.7. Estudios previos al diseño de un puente**

- Estudios topográficos y georreferenciación: permiten realizar una referencia del proyecto y conocer características geomorfológicas del lugar en que se emplaza el puente. Su objetivo es realizar trabajos de campo que permitan elaborar los planos de topografía; adicionalmente, brindan información que sirve de base para los estudios de hidrología, hidráulica, geología y geotecnia. Así mismo se establecen puntos de referencia para el replanteo durante la construcción.

- Estudios de hidrología e hidráulica: permiten estudiar las condiciones que establecen los cursos de agua. El objetivo de estos estudios es dar a conocer las características hidrológicas y factores hidráulicos del cuerpo de agua, lo cual permite una apreciación del comportamiento del mismo y así determinar los requisitos mínimos del puente como su ubicación más adecuada, tomando en consideración niveles de seguridad o riesgos permitidos para la estructura.
- Estudios de geología y geotecnia: los estudios de geología permiten conocer las características del terreno en que se posicionará la estructura; además, determinan características de las diferentes formaciones geológicas que se encuentran en un proyecto, identificando su distribución y sus características geotécnicas. Los estudios de geotecnia permiten conocer la estratigrafía, características geotécnicas, propiedades mecánicas y físicas de los suelos y rocas para el diseño de cimentaciones.
- Estudios de impacto ambiental: su objetivo es desarrollar obras “responsables” con el medio ambiente, de acuerdo con las políticas del Estado. Estos estudios identifican el problema ambiental que se puede ocasionar durante el transcurso de la ejecución de un proyecto, es por ello que busca recomendar especificaciones de diseño, construcción y mantenimiento para poder garantizar la durabilidad del puente y de igual forma evitar un daño ecológico.
- Estudios de trazo y diseño vial: establecen las características técnicas y geométricas del tramo de carretera que enlaza el puente con la carretera existente. Es en esta fase cuando se define el alineamiento horizontal y perfil longitudinal del eje en los tramos de los accesos. También se

determinan las características geométricas como el ancho de calzada, bermas y cunetas en las zonas de corte y relleno de los accesos.

- Estudios de tráfico: definen la sección transversal de la superestructura y en ocasiones la carga móvil de diseño. Para puentes vehiculares, se efectúa un estudio de tráfico correspondiente a volumen y clasificación de tránsito en puntos definidos con el fin de determinar las características de la infraestructura vial y la superestructura del puente.
- Estudios de señalización: se refiere a la definición de las medidas de señalización que son necesarias durante las etapas de construcción y de servicio del puente. Para la señalización debe tomarse como referencia un manual de seguridad vial. Debe especificarse en planos estableciendo dimensiones y secciones de refuerzo de los carteles tomando en cuenta las consideraciones de los elementos de soporte, material de construcción y pintado.

### **3. REQUERIMIENTOS Y CARGAS POR AASHTO PARA PUNTES PEATONALES**

#### **3.1. Cargas de diseño**

La guía de especificaciones para el diseño de puentes peatonales de AASHTO aborda el diseño y construcción de puentes peatonales; los cuales son diseñados y pensados para el uso primariamente de peatones, ciclistas, ecuestres y carga de vehículos livianos no así para el uso de cargas típicas de tránsito pesado. Los puentes peatonales con estructuras colgantes con cables o estructuras atípicas no han sido considerados.

La filosofía de la guía citada está basada en el fundamento de que los puentes peatonales deben ser diseñados para situaciones críticas, con el fin de alcanzar objetivos como la seguridad, utilidad y facilidad de construcción, con las debidas consideraciones acerca de temas como la accesibilidad, economía y la estética de la estructura.

#### **3.1.1. Cargas vivas**

Según la edición de 1997 de la Guía de Especificaciones para el Diseño de Puentes Peatonales de AASHTO, los miembros principales de la estructura tales como vigas, cerchas y arcos, deben ser diseñados para una carga viva de peatones de 85 libras fuerza sobre pie cuadrado en el área de pasarela del puente. La carga viva de los peatones debe aplicarse a varias áreas de la pasarela con el fin de producir la tensión máxima en el miembro que se está diseñando.

El hecho de aplicar una fuerza de tal magnitud se debe a que es lo representado por una persona promedio que ocupa 2 pies cuadrados de área cubierta de puente, por tanto, es considerada una carga viva de servicio razonable y conservadora difícil de superar con tráfico peatonal.

Si el área de la calzada del puente al cual se le aplicará la carga viva peatonal es mayor a 400 pies cuadrados, la carga viva peatonal puede reducirse por la siguiente ecuación:

Ecuación 1

$$W = 85(0,25 + (15/\sqrt{A}))$$

Donde “W” representa la carga de diseño para peatones en libras por pie cuadrado y “A” es el área de la cubierta en pies cuadrados. Sin embargo, por ningún motivo la carga viva de peatones debe ser menor a 65 libras fuerza por pie cuadrado.

En cuanto a miembros secundarios se refiere, los tableros de puentes y el apoyo a los sistemas de piso, incluyendo largueros secundarios, vigas de piso y sus conexiones a los principales miembros de apoyo, deberán ser diseñados para una carga viva de 85 libras por pie cuadrado sin reducción permitida.

El hecho de requerir una carga viva peatonal de 85 libras por pie cuadrado para las cubiertas y los miembros secundarios, considera la probabilidad de lograr cargas máximas en pequeñas áreas dentro de la estructura.

Sin embargo, en la nueva edición de la Guía de Especificaciones para el Diseño de Puentes Peatonales se establece que los puentes peatonales deben ser diseñados para una carga peatonal uniforme de 90 libras fuerza por pie

cuadrado. Esta carga debe ser aplicada para producir esfuerzos máximos en la estructura. El aporte de carga dinámica producida por los peatones no es requerido a tomarse en consideración para el análisis.

Como se mencionó, la edición anterior de la Guía de Especificaciones para el Diseño de Puentes Peatonales de AASHTO utilizaba una carga nominal de 85 libras fuerza por pie cuadrado, la cual podía ser reducida hasta 65 libras fuerza por pie cuadrado en el área de influencia para una carga peatonal. Multiplicado por el factor de mayorado de cargas (2,17), estas darían como resultado 184 y 141 libras fuerza sobre pie cuadrado respectivamente.

Por su lado en códigos europeos se establece una carga nominal más alta con una magnitud de 105 libras fuerza sobre pie cuadrado. Estos permiten reducciones en la carga basados en la longitud de carga; adicional a eso, el factor para cargas mayoradas es de 1,5, por lo que resulta una carga máxima mayorada de 158 libras fuerza sobre pie cuadrado. Para largas longitudes de carga, la carga nominal puede ser reducida hasta 50 libras fuerza por pie cuadrado, dando como resultado una carga mayorada de 75 libras fuerza sobre pie cuadrado. Es importante para el diseñador tomar en cuenta que los valores basados en los códigos europeos con reducciones por efecto de largas longitudes de carga podrían no ser los más adecuados en lugares de mucha concurrencia.

Una consideración de carga que podría tomarse en cuenta es “la carga máxima creíble que un peatón puede aportar”. Existe un límite físico en cuanto a la magnitud de carga estática que puede ser aplicada a un puente peatonal por los usuarios. Esta carga aparenta ser un aproximado de 150 libras fuerza por pie cuadrado. De cualquier manera, no existe información disponible relacionada con la distribución probabilística de la carga viva peatonal. Conociendo la carga máxima creíble, es un parámetro que ayuda a definir límites de carga.

El uso de la carga nominal de 90 libras fuerza por pie cuadrado en combinación con el factor para mayorar la carga de 1,75 da como resultado una magnitud de 158 libras fuerza por pie cuadrado. Proveyendo así un margen considerable en comparación con la carga máxima creíble de 150 libras fuerza por pie cuadrado aportada por los peatones.

### **3.1.2. Vehículo de carga**

Los puentes para peatones/bicicletas deben diseñarse para una sola carga ocasional del vehículo de mantenimiento, siempre y cuando el acceso de los vehículos no esté físicamente impedido. De acuerdo con AASHTO, se colocará un vehículo para reproducir el efecto de la carga máxima que será utilizada si se presentan las siguientes condiciones:

- El ancho de la cubierta se encuentra entre 7 y 10 pies, la carga utilizada será un camión H-5 equivalente a 10 000 libras fuerza.
- El ancho de la cubierta es mayor a 10 pies entonces la carga utilizada será un camión H-10 equivalente a 20 000 libras fuerza.
- Si el ancho de la cubierta es inferior a 7 pies entonces no es necesario ser diseñado para una carga de vehículo de mantenimiento.

AASHTO ha considerado esos valores de carga tomando en cuenta una situación de diseño en la cual la carga del vehículo que transitará sobre la estructura no haya sido especificada para el diseño. Estos valores se consideran cargas dentro de un margen conservador. La carga viva del vehículo de servicio no será colocada en combinación con la carga viva de peatones y tampoco se considera necesario colocar un vehículo de impacto. El aporte de carga dinámica

producida por el camión de servicio no es requerido a tomarse en consideración para el análisis.

### **3.1.3. Carga de viento**

Se debe aplicar una carga de viento horizontal en ángulo recto con el eje longitudinal de la estructura. La carga de viento se aplica en el área vertical proyectada de todos los elementos de la superestructura, incluyendo miembros de la armadura expuestas en el entramado del sotavento.

Para armaduras y arcos la carga que se debe aplicar es de 75 libras por pie cuadrado, mientras para vigas y viguetas la carga que se aplicará es de 50 libras por pie cuadrado.

Para puentes con armadura abierta, se considera que el viento puede pasar fácilmente a través de los elementos que lo componen. Por lo tanto, se considera una carga horizontal mínima de 35 libras por pie cuadrado en el área vertical total proyectada del puente, como si fuese cerrado.

Adicionalmente a la carga de viento, debe aplicarse una línea de carga vertical sobre el ancho del tablero del puente. Determinada como una fuerza causada por una presión de 0,02 kips sobre pie cuadrado ( $0,85 \text{ kgf/m}^2$ ) que actúa sobre todo el ancho del tablero del puente. Esta carga debe de aplicarse a barlovento a un cuarto del ancho del tablero.

### **3.1.4. Carga ecuestre**

El tablero del puente peatonal diseñado para carga ecuestre, debe considerar una carga equivalente a 1 Kip (454,13 kgf) distribuida en un área cuadrada de 4 pulgadas por lado. La carga ecuestre es una carga viva pensada para asegurar la capacidad adecuada de la estructura de un puente peatonal para soportar golpes que producen esfuerzos de corte producidos por el galope de un caballo. Esta carga se deriva de la presión que generan los cascos de los caballos sobre determinada área. La carga más crítica se produce durante el galope del caballo cuando uno de los cascos recibe el cien por ciento del peso del potro. El total de la carga mayorada es de 1,75 kips (794,73 kgf) lo cual es considerado como la carga máxima creíble provocada por el caballo.

### **3.1.5. Carga por fatiga**

El estado límite es fatiga I, debe ser como se encuentra especificado en la sección 11 de AASHTO Signs. La ráfaga de viento natural y la ráfaga de viento causada por un camión están especificados en la sección 11. El viento es considerado como una carga viva de fatiga en puentes peatonales para lo cual debe considerarse únicamente lo que se crea apropiado.

Por otro lado, la carga por fatiga en libras por pie cuadrado, debido a las ráfagas naturales del viento puede ser calculada utilizando la siguiente ecuación:

Ecuación 2

$$P_{NW} = 5,2C_dI_F$$

Donde  $I_F$  representa el factor por fatiga según el tipo de estructura y  $C_D$  representa un coeficiente promedio de velocidad de viento equivalente a

11,2 mph. Si existen lugares donde exista un estudio de velocidades de viento promedio, entonces puede hacerse uso de esa información para encontrar la carga de fatiga por ráfaga de viento en libras por pie cuadrado aplicando la siguiente ecuación:

Ecuación 3

$$P_{NW} = 5,2C_d\left(\frac{V_{mean}}{11,2 \text{ mph}}\right)^2 I_F$$

Donde  $V_{mean}$  representa la velocidad promedio de viento en mph según el estudio del lugar donde se emplazará el puente.

### **3.2. Aplicación de cargas**

Cuando se determina el patrón de la carga viva provocada por peatones, la cual maximiza o minimiza los esfuerzos en cualesquiera de los miembros de la estructura, la menor dimensión para un área cargada será mayor o igual a 2 pies. Esto se debe a que un área de carga con uno de sus lados menor a 2 pies ya no representaría una carga apropiada provocada por peatones.

### **3.3. Combinación de cargas**

Los puentes peatonales deben ser diseñados con combinaciones de carga y factores de carga especificados en *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, tabla 3.4.1-1 con las siguientes excepciones:

- Combinaciones de carga Resistencia II, Resistencia III, Resistencia IV, y Resistencia V no deben ser consideradas.

- El factor de carga para combinación de carga por fatiga debe ser 1,15. La combinación de carga por fatiga II no es necesario ser considerada.

La combinación de carga Resistencia II es aplicada tomando consideraciones de camiones que no aplican a puentes peatonales ya que son vehículos especiales especificados por el dueño. La Resistencia III aplica en condiciones meteorológicas donde se presentan vientos mayores a 90km/h, situación que no se presenta en nuestro país.

Resistencia IV se aplica donde la carga muerta es dominante en las estructuras como lo es en puentes donde su armadura es muy larga. Resistencia V aborda casos donde existe una carga fuerte de viento de 90 km/h combinado con una carga viva muy reducida de vehículos pequeños, lo cual no suele suceder en un puente peatonal. Cuando se presenten casos inusuales, donde las combinaciones de carga que son excluidas se presenten o tengan probabilidades de ocurrir, entonces deben de ser consideradas en el diseño.

## 4. MÉTODO DE ANÁLISIS PARA LA ESTRUCTURA

La Guía de Especificaciones para el Diseño de Puentes Peatonales de AASHTO establece que no es necesario tomar a consideración cargas dinámicas en el análisis estructural del puente. De modo que, para este tipo de estructuras, es únicamente necesario realizar un análisis con cargas estáticas. De tal forma se analizarán los momentos y esfuerzos provocados por las cargas en los miembros del puente.

Partiendo de lo anterior, se procede a definir las cargas de servicio que aplican al proyecto. Por las condiciones de viento y el tipo de carga requerida para el uso de la estructura, las cargas que se aplicarán para el análisis son la carga de fatiga y la carga peatonal.

### 4.1. Estableciendo combinación de cargas según AASHTO LRFD

Para el análisis de una estructura, siempre hay que establecer una combinación de cargas adecuada al uso que se le dará a la obra.

#### 4.1.1. Resistencia I

Combinación de cargas básica que representa el uso normal del puente para lo que fue previsto sin consideraciones de viento.

Ecuación 4

$$W_M = \gamma_P D_L + 1,75 P_L$$

Donde:

$W_M$ : Carga de diseño mayorada.

$\gamma_P$ : Factor de carga para cargas permanentes comprendido entre 0,9 y 1,25.

$D_L$ : Peso propio de la estructura.

$P_L$ : Sobrecarga peatonal.

#### 4.1.2. Fatiga I

De acuerdo como se especificó en la ecuación 2.

$$P_{NW} = 5,2C_dI_F$$

Donde:

$P_{NW}$ : Carga por fatiga provocada por viento.

$C_d$ : Coeficiente promedio de la velocidad del viento equivalente a 11,2mph.

$I_F$ : Factor por fatiga con valor de 1,15.

Lo cual resulta en 66,98 lb/ft<sup>2</sup> (322,24 kg/m<sup>2</sup>).

#### 4.2. Determinación de corte y momento

Primeramente, es necesario determinar las áreas de influencia donde las cargas afectarán a los elementos estructurales, con el objetivo de determinar con exactitud las cargas tributarias a los miembros.

Seguido de ello se procede a determinar el momento máximo y cortante en los elementos, por medio de las siguientes ecuaciones.

Ecuación 5

$$M_{MAX} = \frac{W_{MD}l^2}{8}$$

Donde:

$M_{MAX}$ : representa el momento máximo.

$W_{MD}$ : es la carga de diseño distribuida linealmente en la viga.

$l$ : luz entre apoyos de la viga.

Ecuación 6

$$V_{MAX} = \frac{W_{MD}l}{2}$$

Donde:

$V_{MAX}$ : cortante máximo.

$W_{MD}$ : es la carga de diseño distribuida linealmente en la viga.

$l$ : luz entre apoyos de la viga.

### 4.3. Diseño estructural

Calculados los momentos y cortantes en los elementos estructurales, se procede al cálculo de los esfuerzos en dichos elementos. Estos valores se compararán con esfuerzos permisibles según la norma técnica peruana E100 bambú, la cual fue elaborada específicamente para esfuerzos aplicados a la especie de bambú *Guadua Angustifolia*. Ya que solo se cuenta con esfuerzos permisibles normados para la especie mencionada, la estructura se diseñará teóricamente para dicha especie de bambú.

El cálculo del esfuerzo a flexión se hará de acuerdo con:

Ecuación 7

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

Donde:

$f_m$ : esfuerzo a flexión en Mpa.

$f'_m$ : esfuerzo a flexión admisible en Mpa. (5 Mpa)

$M_{MAX}$ : momento actuante sobre el elemento en N mm

S: módulo de la sección en  $\text{mm}^3$

Donde el módulo de sección se calcula de la siguiente manera:

Ecuación 8

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

Donde:

De: diámetro externo de la sección del elemento en mm.

t: espesor promedio del elemento en mm.

S: módulo de la sección en  $\text{mm}^3$

El cálculo del esfuerzo a corte se hará de acuerdo con:

Ecuación 9

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

Donde:

fv: esfuerzo cortante paralelo a las fibras en Mpa.

A: área de la sección transversal del elemento en mm<sup>2</sup>.

De: diámetro externo de la sección del elemento en mm.

t: espesor promedio del elemento en mm.

F'v: esfuerzo cortante permisible paralelo a las fibras en Mpa. (1 Mpa)

V: fuerza cortante en la sección en N.



## 5. PROPUESTA DE ARMADO

Como se mencionó, para escoger la tipología estructural del puente primeramente hay que tomar consideraciones generales, las cuales no dependen del diseñador sino del entorno donde se emplazará la estructura. Como se pretende establecer un modelo general, se propondrá un modelo de puente peatonal cuyos elementos formen una superestructura. Dicho puente podrá ser emplazado en lugares donde el suelo demuestre tener buena capacidad de carga y estabilidad. Tal es el caso del ejemplo que se muestra en la figura 1.

Figura 1. **Lugar de emplazamiento ideal del puente**



Fuente: Centro educativo del bambú, Instituto de Ciencia de Tecnología Agrícola (ICTA).

En la figura anterior se muestra un puente peatonal de bambú, debajo del cual pasa el caudal de un río. El lugar de emplazamiento es óptimo, ya que el suelo se encuentra estable gracias a una cortina de concreto que lo contiene.

**Figura 2.      Puente peatonal de bambú**



Fuente: Centro educativo del bambú, Instituto de Ciencia de Tecnología Agrícola (ICTA).

**Figura 3.      Estructura de puente peatonal de bambú**



Fuente: Centro educativo del bambú, Instituto de Ciencia de Tecnología Agrícola (ICTA).

Como se muestra en las figuras anteriores, el puente consta de dos vanos y únicamente superestructura, la cual está formada solamente por cañas de bambú que funcionan como tablero y una baranda. Dicho puente, de acuerdo con los lugareños, funciona para uso peatonal y circulación de algunas motocicletas.

El puente peatonal se define como una estructura que da continuidad al camino salvando obstáculos, ya sean naturales o artificiales, tales como ríos, vías de tráfico, barrancos, entre otros. Dicha estructura se encuentra destinada a soportar cargas de tipo peatonal.

Basado en la definición anterior, se propone una estructura de un vano con una luz libre entre apoyos de 6 metros. Debido a que el armado de las estructuras de bambú es similar a una estructura de acero, la tipología estructural del puente que se escogió es con una armadura bajo el tablero y se describe a continuación.

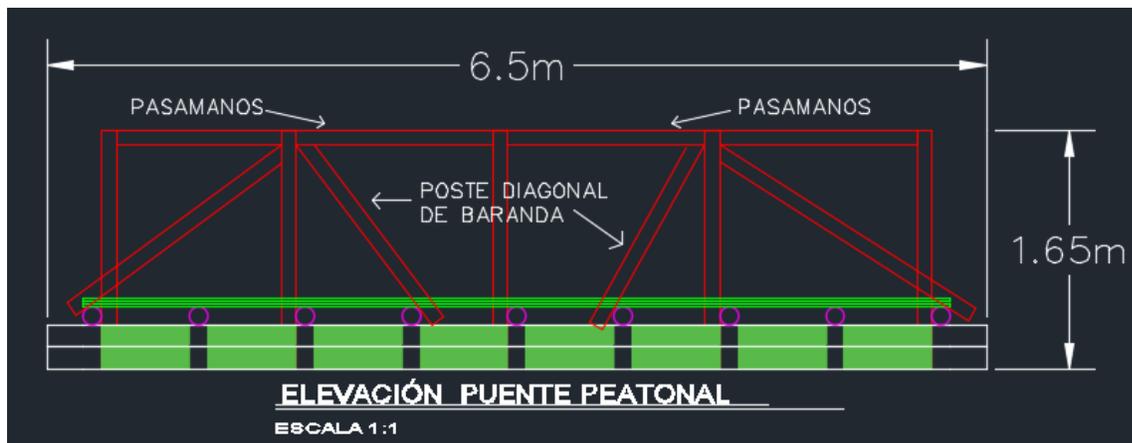
### **5.1. Baranda**

Uno de los objetivos del diseño de una estructura de obra civil es resguardar a los usuarios cuando hagan uso de la misma. La baranda, en este caso, brinda seguridad al peatón de manera que se evite una posible caída al área que el puente está salvando.

Se propone postes verticales y una caña que funcione como pasamanos en sentido longitudinal sobre los postes verticales. En conjunto a estos elementos, se propone colocar cañas en sentido diagonal apoyados en los postes verticales y en las vigas secundarias, de manera que se restrinja el movimiento de la baranda y que brinde seguridad a los usuarios. El diámetro de las cañas que componen la baranda se propone de 4" de diámetro utilizando la especie de bambú *Dendrocalamus Asper*, ya que esta especie de bambú consta de un peso

específico menor a la especie de *Guadua Angustifolia* y eso favorece a la integración de carga muerta. La propuesta se ilustra en la figura 4.

Figura 4. **Propuesta de baranda**

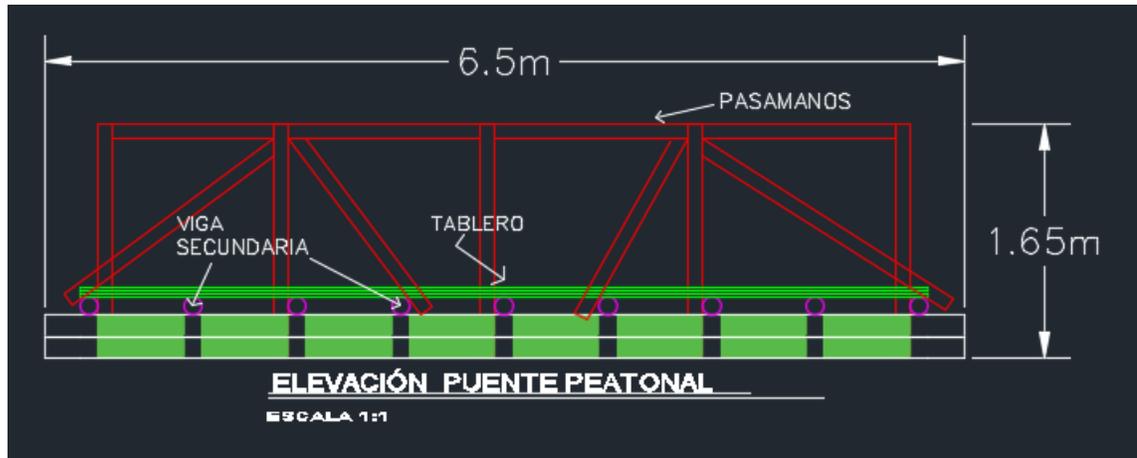


Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD Civil 3D 2016.

## 5.2. Tablero

Es el elemento como superficie de paso que soportará directamente las cargas del tráfico peatonal, para lo cual se propone un armado compuesto por tres camas de esterillas utilizando la especie *Dendrocalamus Asper*, por conveniencia de disminuir la contribución de carga muerta a las vigas secundarias y principales. La primera cama de esterilla con la parte interna de la caña orientada hacia arriba y la segunda cama de la esterilla con la parte interna de la caña orientada hacia abajo, ambas camas colocadas en sentido longitudinal. La tercera cama de esterilla se propone colocarla en sentido transversal con la cara interna de la caña orientada hacia abajo. De esta manera, se formará una especie de membrana que será apoyada sobre las vigas secundarias, como se muestra en la figura 5.

Figura 5. Propuesta de tablero

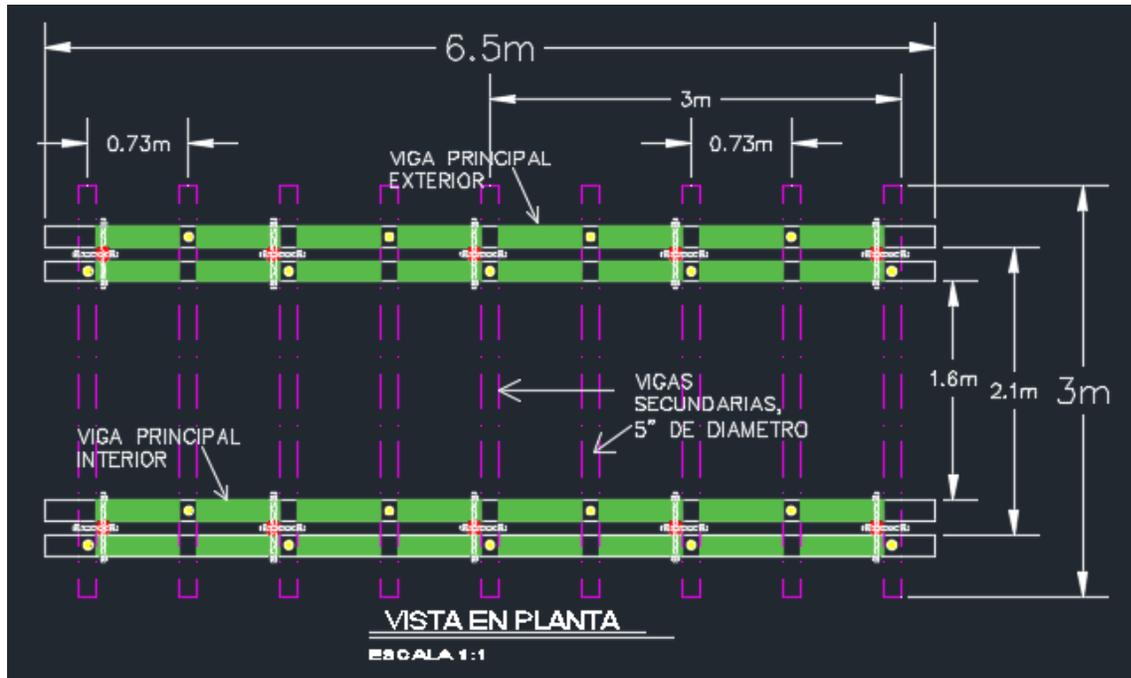


Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD Civil 3D 2016.

### 5.3. Vigas secundarias

Para el análisis y diseño estructural de las vigas se utilizará como referencia de los esfuerzos permisibles la norma peruana E100 Bambú; por lo tanto, se proponen elementos que estarán formados por cañas de la especie *Guadua Angustifolia* de 25 cm (aproximadamente 10 ") de diámetro con una longitud de 3 metros y colocadas en la estructura en sentido transversal a la longitud del puente. Estos elementos soportarán directamente el peso del tablero y la carga del tráfico peatonal transmitida por el mismo. Las vigas secundarias estarán apoyadas sobre las vigas principales, como se muestra en la figura 6.

Figura 6. Propuesta de vigas secundarias



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD Civil 3D 2016.

#### 5.4. Vigas principales

Al igual que para las vigas secundarias, se utilizará como referencia para el análisis y diseño estructural la norma peruana E100 bambú; por lo tanto, para las vigas principales se propone elementos estructurales compuestos de cuatro cañas, porque las vigas puedan soportar los esfuerzos a compresión, tensión y corte que se producen en este tipo de elementos. Se utilizarán cañas de la especie *Guadua Angustifolia* de 25 cm (10" aproximadamente) de diámetro con una longitud de 6,50 metros. En el armado del puente se proponen 2 vigas principales, cada una consta de una viga exterior de dos cañas, una sobre otra, y una viga interior, estructurada una sobre otra, para brindarle estabilidad al puente y una buena distribución de elementos que soporten las cargas actuantes.

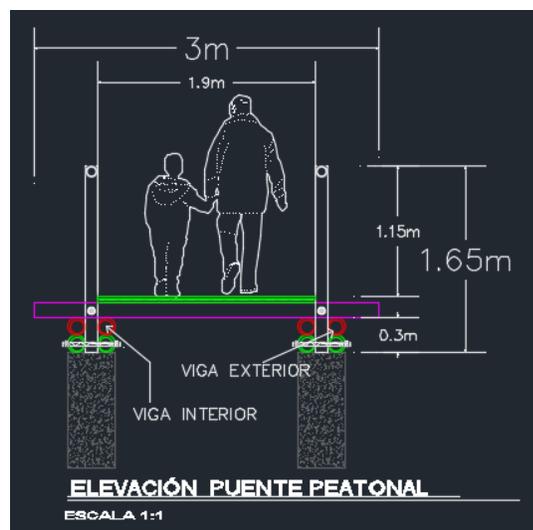
Las cañas que forman la viga principal serán pernadas entre sí, por ende, se considerará como un solo elemento cuando se realice el análisis y diseño estructural.

Figura 7. **Propuesta de viga principal**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD Civil 3D 2016.

Figura 8. **Vista de vigas principales en elevación**



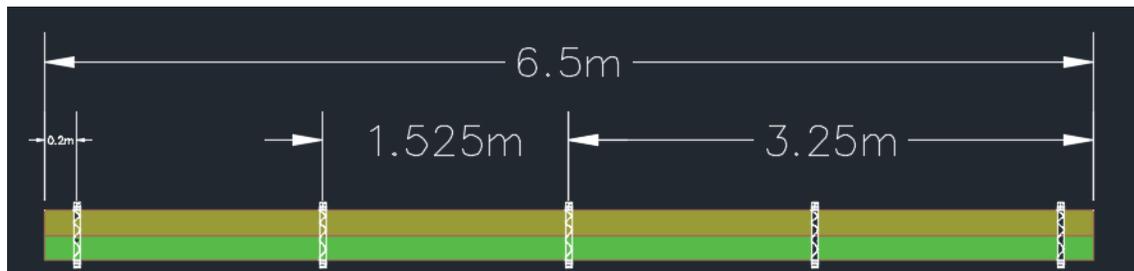
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD Civil 3D 2016.

## 5.5. Anclajes

La propuesta de anclajes para el puente es similar a la que se utiliza con estructuras metálicas. Se proponen varillas roscadas de hierro galvanizado que servirán como pernos de anclajes. Los pernos que sujetarán el conjunto de la baranda, deben ser de un diámetro de  $5/16$  ”; por otra parte, los pernos de anclaje para miembros como las vigas serán de un diámetro de  $3/8$  ”. Todos los anclajes van sujetos con roldanas y tuercas con medidas relacionadas según corresponda al diámetro del perno.

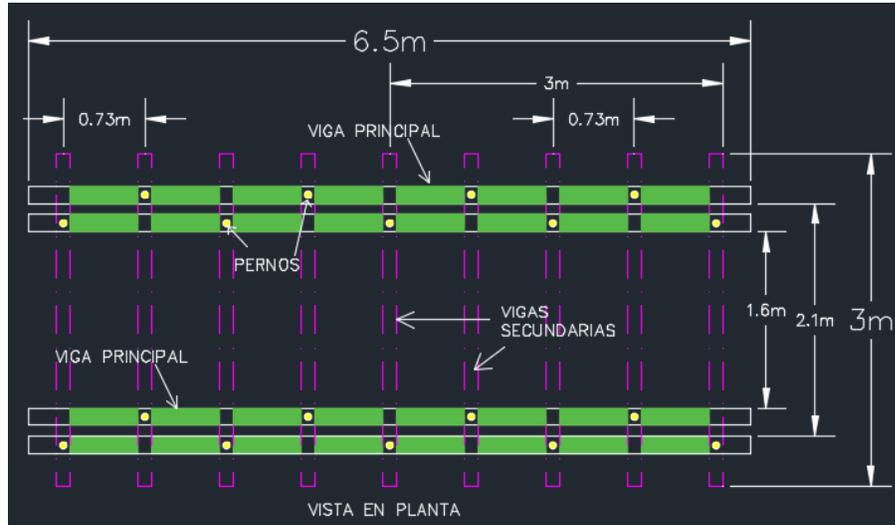
A continuación, se muestra en las siguientes figuras la distribución de pernos propuesta para el puente.

Figura 9. **Distribución de pernos en viga principal**



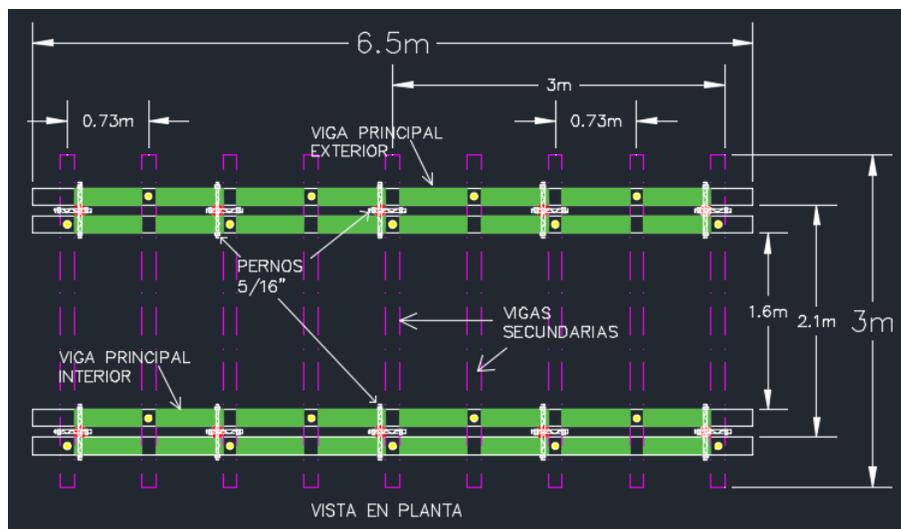
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD Civil 3D 2016.

Figura 10. **Distribución de pernos en vigas secundarias**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD Civil 3D 2016.

Figura 11. **Distribución de pernos en baranda**

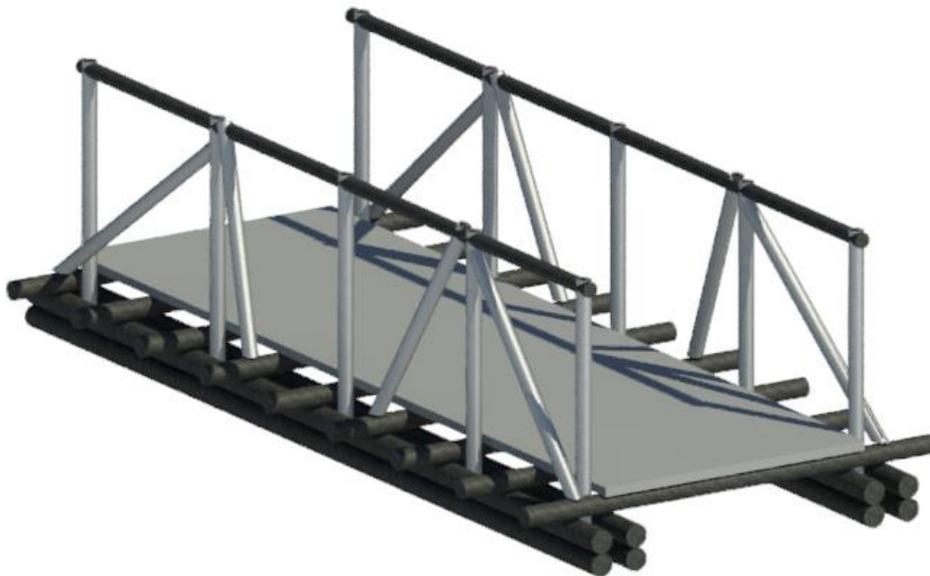


Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD Civil 3D 2016.

Cabe mencionar que, para el anclaje de las cañas longitudinales que servirán como pasamanos sobre los postes verticales de la baranda, no es necesario utilizar pernos de 5/16". La sujeción con tornillos busca rosca será suficiente.

En la figura 12 se muestra un modelo tridimensional de la propuesta del puente.

Figura 12. **Modelo de propuesta de puente peatonal de bambú**



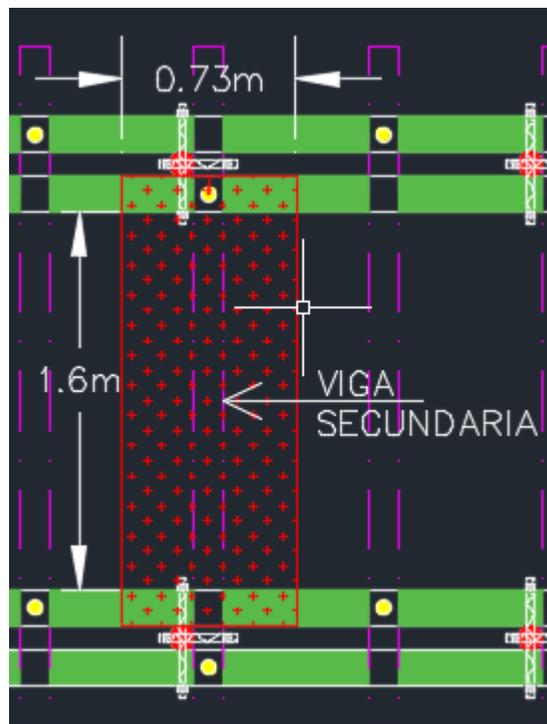
Fuente: elaboración propia, empleando Autodesk Revit 2019.

## 6. ANÁLISIS Y DISEÑO ESTRUCTURAL DEL PUENTE

### 6.1. Análisis estructural de las vigas secundarias

Como primer paso se establece el área tributaria de cargas que afectarán a la viga secundaria. Se muestra marcado en rojo en la figura 13.

Figura 13. Área tributaria de carga en vigas secundarias



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD Civil 3D 2016.

Una vez establecida el área tributaria de  $1,17 \text{ m}^2$ , se procede a realizar la integración de carga muerta que afectará al elemento. Gracias a los resultados

obtenidos por la Ingeniera Norma Calo en su trabajo de graduación, se utilizarán como referencia para el peso específico seco los valores obtenidos en su estudio, para la especie *Dendrocalamus Asper* 4 636,36 N/m<sup>3</sup> y para la especie *Guadua Angustifolia* 5 636,90 N/m<sup>3</sup>.

Considerando que el tablero consta de un espesor de 4,5 centímetros, constituido de la especie de bambú *Dendrocalamus Asper*, su carga tributaria se calcula de la siguiente manera:

$$DL_T = (1,17 \text{ m}^2)(0,045 \text{ m})(473,10 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}^3})$$

$$DL_T = 25,07 \text{ kg}_f$$

Es importante tomar en consideración el peso de la estructura de la baranda como parte de la carga muerta que afectará a las vigas secundarias. Dado que la baranda constará de 10 cañas de 1,65 metros para los postes verticales, 2 cañas de 5,75 metros que funcionarán como pasamanos y 8 cañas de 1,90 metros en diagonal que servirán para restringir el movimiento de la misma, todo conformado por diámetros externos de 4" y un espesor promedio de 1 centímetro. Estos elementos son de *Dendrocalamus Asper*. La totalidad del peso de la baranda se apoya en 7 de las 9 vigas secundarias. Su peso tributario a una viga secundaria se calcula de la siguiente manera:

$$Vol_B = \left[ \left( \frac{\pi((0,1016 \text{ m})^2 - (0,0916 \text{ m})^2)}{4} \right) \right] [(1,65 \text{ m})(10 \text{ u}) + (5,75 \text{ m})(2 \text{ u}) + (1,90 \text{ m})(8 \text{ u})]$$

$$DL_B = \frac{(0,065 \text{ m}^3)(473,10 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}^3})}{7}$$

$$DL_B = 4,39 \text{ kg}_f$$

Como último elemento a tomar en cuenta para la integración de la carga muerta, se debe considerar el peso propio del elemento por diseñar. Para el cálculo del peso propio de la viga secundaria se considera un diámetro de 25 centímetros, un espesor de 2,0 centímetros utilizando la especie de bambú *Guadua Angustifolia* y una longitud de 3 metros para el elemento. El cálculo del peso de la viga secundaria se obtiene de la siguiente manera:

$$DL_{VS} = \frac{[\pi((0,25 \text{ m})^2 - (0,23 \text{ m})^2)]}{4} [(3 \text{ m}) \left( 575,19 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}^3} \right)]$$

$$DL_{VS} = 13,01 \text{ kg}_f$$

Conociendo el peso de los elementos que conforman la carga muerta, se procede a hacer la integración como se muestra a continuación:

$$DL = (25,07 \text{ kg}_f + 4,39 \text{ kg}_f + 13,01 \text{ kg}_f)$$

$$DL = 42,47 \text{ kg}_f$$

Para el diseño estructural se trabaja con una carga distribuida linealmente. La carga muerta se distribuye a lo largo de la luz entre apoyos que hay en la viga secundaria; esta es de 1,60 metros de longitud. Dicha carga distribuida se calcula de la siguiente manera:

$$DL_D = \frac{42,47 \text{ kg}_f}{1,6 \text{ m}}$$

$$DL_D = 26,54 \text{ kg}_f/\text{m}$$

## 6.2. Diseño estructural de la viga secundaria

Realizado el análisis de cargas que afectan a la viga secundaria, se procede a realizar su diseño estructural. Como se estableció anteriormente en el capítulo 3, la carga de servicio que se tomará en cuenta es de 90 lb/ft<sup>2</sup> (440,12 kgf/m<sup>2</sup>), y su área tributaria será de 1,17 m<sup>2</sup> como se mostró en el inciso anterior.

Debido a que para el diseño estructural es necesario contar con la carga distribuida linealmente en el elemento a diseñar, se procede a calcularla de la manera siguiente.

$$PL_D = \frac{[(440,12 \text{ kg}_f)(1,17 \text{ m}^2)]}{1,60 \text{ m}}$$

$$PL_D = 321,84 \text{ kg}_f$$

Conociendo tanto la carga de servicio y la integración de cargas muertas distribuidas linealmente, es posible calcular la combinación de carga denominada Resistencia I, como se estableció en el capítulo 4.

$$W_{MD} = (1) \left( 26,54 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}} \right) + (1,75) \left( 321,84 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}} \right)$$

$$W_{MD} = 589,76 \text{ kg}_f/\text{m}$$

Una vez determinado el valor de la combinación de cargas, es importante definir el momento máximo actuante en la viga, ya que servirá para realizar el

chequeo de esfuerzo permisible, como se estableció en el capítulo 4. Dicho momento se calcula de la siguiente manera:

$$M_{MAX} = \frac{\left(589,76 \frac{kg_f}{m}\right) (1,60 m)^2}{8}$$

$$M_{MAX} = 188,72 kg_f \cdot m$$

El momento máximo obtenido anteriormente se trabajará como un equivalente a 1 849 500,08 N·mm para el cálculo del esfuerzo a flexión. Para este cálculo es importante obtener primero el valor del módulo de sección [S], de la manera siguiente.

$$S = \frac{\pi[(250 mm)^4 - [250 mm - 2(20 mm)]^4]}{32(250 mm)}$$

$$S = 770 255,69 mm^3$$

Al conocer el módulo de sección de la viga, se calcula el esfuerzo a flexión, de la manera siguiente:

$$fm = \frac{1 849 500,08 N \cdot mm}{770 255,69 mm^3}$$

$$fm = 2,40 M_{pa}$$

Recordando que el esfuerzo permisible a flexión según la norma peruana E100 bambú es de 5 M<sub>pa</sub>, entonces puede decirse que la viga secundaria utilizando *Guadua Angustifolia* a un diámetro de 25 cm y un espesor mínimo de

2 cm que presenta un esfuerzo teórico a flexión de 2,40 M<sub>pa</sub>, cumple con el requisito.

Una vez cumplido el chequeo bajo esfuerzo de flexión, se procede a realizar el chequeo bajo esfuerzo de corte. Como primer punto debe definirse el cortante máximo como se estableció en el capítulo 4.

$$V_{MAX} = \frac{\left[ \left( 589,76 \frac{kg_f}{m} \right) (1,6 m) \right]}{2}$$

$$V_{MAX} = 471,81 kg_f$$

Para el cálculo del esfuerzo a corte, se utilizará el valor equivalente del cortante máximo con una magnitud de 4 623,72 N. El esfuerzo a corte se calculará a continuación como se definió en el capítulo 4.

$$f_v = \frac{2(4\ 623,72\ N)}{3(49\ 087,39\ mm^2)} \left( \frac{3(250\ mm)^2 - (4)(250\ mm)(17\ mm) + (4)(17)^2}{(250\ mm)^2 - 2(250\ mm)(17\ mm) + 2(17)^2} \right)$$

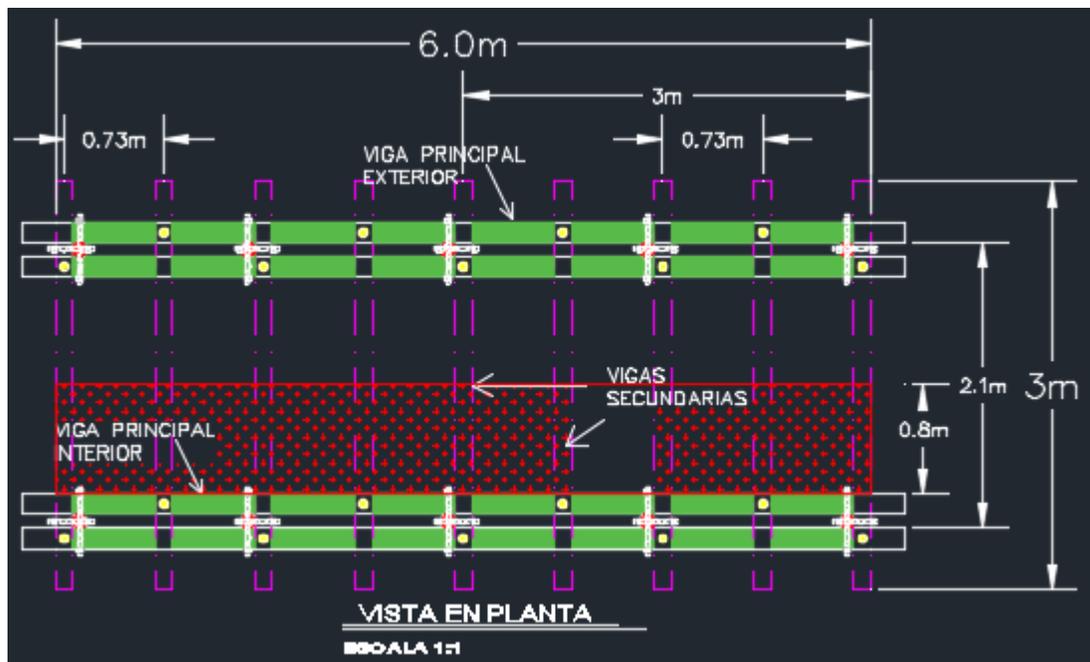
$$f_v = 0,2 M_{pa}$$

El esfuerzo permisible a corte, según la norma peruana E100 bambú, es de 1 M<sub>pa</sub>; entonces, puede decirse que la viga secundaria utilizando *Guadua Angustifolia* a un diámetro de 25 cm y al menos 2 cm de espesor, cumple con el requisito.

### 6.3. Análisis estructural de las vigas principales

Como primer paso para el análisis estructural de las vigas principales, se define el área tributaria. Se considera como una losa que trabaja en dos sentidos, como se muestra marcado en rojo en la figura 14.

Figura 14. Área tributaria para viga principal



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD Civil 3D 2016.

Definida el área tributaria para la viga principal, entonces se procede a realizar el cálculo de las cargas muertas. Es importante recordar que la carga muerta aportada por la baranda y el tablero son de la especie de bambú *Dendrocalamus Asper*, y la carga muerta aportada por las vigas secundarias es de la especie *Guadua Angustifolia*.

A continuación, se calcula el peso tributario aportado por la baranda hacia una de las vigas principales.

$$Vol_B = \left[ \left( \frac{\pi((0,1016 \text{ m})^2 - (0,0916 \text{ m})^2)}{4} \right) \right] [(1,65 \text{ m})(5 \text{ u}) + (5,75 \text{ m})(1 \text{ u}) + (1,90 \text{ m})(4 \text{ u})] = 0,033 \text{ m}^3$$

$$DL_B = (0,033 \text{ m}^3) \left( 473,10 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}^3} \right) = 15,61 \text{ kg}_f$$

Ahora se procederá a calcular el peso tributario del tablero.

$$DL_T = (0,045 \text{ m})(0,8 \text{ m})(6 \text{ m}) \left( 473,10 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}^3} \right) = 102,19 \text{ kg}_f$$

Seguido de ello, se obtendrá el peso muerto tributario de las vigas secundarias hacia la viga principal.

$$DL_{VS} = \frac{[\pi((0,25 \text{ m})^2 - (0,23 \text{ m})^2)]}{4} \left[ (1,50 \text{ m})(9 \text{ u}) \left( 575,19 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}^3} \right) \right] = 50,08 \text{ kg}_f$$

Por último, se obtendrá el peso propio de la viga principal.

$$DL_{VS} = \frac{[\pi((0,25 \text{ m})^2 - (0,23 \text{ m})^2)]}{4} \left[ (6 \text{ m})(4 \text{ u}) \left( 575,19 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}^3} \right) \right] = 104,08 \text{ kg}_f$$

Conociendo el peso de los elementos que conforman la carga muerta, se procede a hacer la integración, como se muestra a continuación:

$$DL = (15,61 \text{ kg}_f + 102,19 \text{ kg}_f + 50,08 \text{ kg}_f + 104,08 \text{ kg}_f) = 271,96 \text{ kg}_f$$

Ya que para el diseño estructural se trabaja con una carga distribuida linealmente, la carga muerta se distribuye a lo largo de la luz entre apoyos que hay en la viga principal, de 6 metros de longitud. Dicha carga distribuida se calcula de la siguiente manera:

$$DL_D = \frac{271,96 \text{ kg}_f}{6 \text{ m}} = 45,33 \text{ kg}_f/\text{m}$$

#### 6.4. Diseño estructural de la viga principal

Una vez realizado el análisis de cargas en la viga principal, se procede a su diseño estructural. Como se estableció en el capítulo 3, la carga de servicio que se tomará en cuenta es de 440,12 kgf/m<sup>2</sup>, y su área tributaria será de 4,80 m<sup>2</sup> según se mostró en el inciso anterior.

Dado que para el diseño estructural es necesario contar con la carga distribuida linealmente en el elemento a diseñar, se procede a calcularla de la manera siguiente:

$$PL_D = \frac{[(440,12 \text{ kg}_f)(4,80 \text{ m}^2)]}{6 \text{ m}} = 352,10 \text{ kg}_f/\text{m}$$

Conociendo tanto la carga de servicio y la integración de cargas muertas distribuidas linealmente, entonces es posible calcular la combinación de carga denominada Resistencia I, como se estableció en el capítulo 4.

$$W_{MD} = (1) \left( 45,33 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}} \right) + (1,75) \left( 352,10 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}} \right) = 661,50 \text{ kg}_f/\text{m}$$

Una vez determinado el valor de la combinación de cargas, es importante definir el momento máximo actuante en la viga, ya que este servirá para realizar el chequeo de esfuerzo permisible, como se estableció en el capítulo 4. Dicho momento se calcula de la siguiente manera:

$$M_{MAX} = \frac{\left(661,50 \frac{kg_f}{m}\right) (6 m)^2}{8} = 2\,976,76 kg_f \cdot m$$

El momento máximo obtenido anteriormente se trabajará como un equivalente a 29 172 252,39 N·mm para el cálculo del esfuerzo a flexión. Considerando que 4 cañas forman la viga principal, cada una de 25 cm de diámetro, se considera un como un solo elemento de 50 cm de diámetro y 4 cm de espesor. Para el cálculo del esfuerzo a flexión, es importante obtener primero el valor del módulo de sección [S], como se muestra a continuación.

$$S = \frac{\pi[(500 mm)^4 - [500 mm - 2(40 mm)]^4]}{32(500 mm)} = 6\,162\,045,50 mm^3$$

Conociendo el módulo de sección de la viga, entonces se calcula el esfuerzo a flexión como se muestra:

$$f_m = \frac{29\,172\,252,39 N \cdot mm}{6\,162\,045,50 mm^3} = 4,73 M_{pa}$$

Recordando que el esfuerzo permisible a flexión según la norma peruana E100 bambú es de 5 M<sub>pa</sub>, entonces puede decirse que la viga principal utilizando 4 cañas de *Guadua Angustifolia* cada una a un diámetro de 25 cm y al menos 2 cm de espesor presentando un esfuerzo teórico a flexión de 4,73 M<sub>pa</sub>, cumple con el requisito del esfuerzo permisible.

Una vez cumplido con el chequeo bajo esfuerzo de flexión, se procede al chequeo bajo esfuerzo de corte. Como primer punto debe definirse el cortante máximo, como se estableció en el capítulo 4.

$$V_{MAX} = \frac{\left[ \left( 661,50 \frac{kg_f}{m} \right) (6 m) \right]}{2}$$

$$V_{MAX} = 1984,50 kg_f$$

Para el cálculo del esfuerzo a corte se utilizará el valor equivalente del cortante máximo con una magnitud de 19 448,10 N. El esfuerzo a corte de la viga se calculará a continuación, como se definió en el capítulo 4.

$$f_v = \frac{2(19\,448,10 \text{ N})}{3(196\,349,54 \text{ mm}^2)} \left( \frac{3(500 \text{ mm})^2 - (4)(500 \text{ mm})(40 \text{ mm}) + (4)(40 \text{ mm})^2}{(500 \text{ mm})^2 - 2(500 \text{ mm})(40 \text{ mm}) + 2(40 \text{ mm})^2} \right)$$

$$f_v = 0,21 M_{pa}$$

Recordando que el esfuerzo permisible a corte según la norma peruana E100 bambú es de 1 M<sub>pa</sub>, entonces puede decirse que la viga principal con 4 cañas de *Guadua Angustifolia*, cada una a un diámetro de 25 cm y al menos 2 cm de espesor y un esfuerzo teórico de 0,21 M<sub>pa</sub>, cumple con el requisito del esfuerzo permisible.

De acuerdo con los diámetros para las vigas secundarias y principales propuestos inicialmente, puede observarse que los resultados obtenidos para los esfuerzos actuantes son relativamente bajos comparándolos con los esfuerzos permisibles, lo cual indica que puede diseñarse con un diámetro menor el cual quede dentro del rango de esfuerzo permisible. Esto se observa principalmente

en los esfuerzos actuantes para las vigas secundarias, por lo que se procederá a definir los diámetros mínimos que cumplen, para este diseño, con los esfuerzos permisibles.

### 6.5. Análisis estructural de las vigas secundarias utilizando diámetro de 9 ”

Como primer paso se establece el área tributaria de cargas que afectarán a la viga secundaria, que como se definió anteriormente, es de 1,17 m<sup>2</sup>. Se procede a realizar la integración de carga muerta que afectará al elemento.

Como se estableció, el peso tributario correspondiente al tablero se calcula de la siguiente manera:

$$DL_T = (1,17 \text{ m}^2)(0,045 \text{ m})(473,10 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}^3})$$

$$DL_T = 25,07 \text{ kg}_f$$

Se considera la misma aportación de carga que proporciona la baranda, como se calculó antes:

$$Vol_B = \left[ \left( \frac{\pi((0,1016 \text{ m})^2 - (0,0916 \text{ m})^2)}{4} \right) \right] [(1,65 \text{ m})(10 \text{ u}) + (5,75 \text{ m})(2 \text{ u}) + (1,90 \text{ m})(8 \text{ u})]$$

$$DL_B = \frac{(0,065 \text{ m}^3)(473,10 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}^3})}{7}$$

$$DL_B = 4,39 \text{ kg}_f$$

Como último elemento a tomar en cuenta para la integración de la carga muerta, es importante considerar el peso propio del elemento a diseñar. Para el cálculo del peso propio de la viga secundaria, en esta ocasión se utilizará un diámetro de 9" —ya que comercialmente utilizan los diámetros en pulgadas, aunque los cálculos se realizarán en centímetros— y un espesor de 1,55 centímetros utilizando la especie de bambú *Guadua Angustifolia* y una longitud de 3 metros para el elemento. El cálculo del peso de la viga secundaria se obtiene de la siguiente manera:

$$DL_{VS} = \frac{[\pi((0,2286\text{ m})^2 - (0,2131\text{ m})^2)]}{4} [(3\text{ m}) \left(575,19 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}^3}\right)]$$

$$DL_{VS} = 9,28\text{ kg}_f$$

Conociendo el peso de los elementos que conforman la carga muerta, se procede a hacer la integración así:

$$DL = (25,07\text{ kg}_f + 4,39\text{ kg}_f + 9,28\text{ kg}_f)$$

$$DL = 38,74\text{ kg}_f$$

Para el diseño estructural se trabaja con una carga distribuida linealmente. La carga muerta se distribuye a lo largo de la luz entre apoyos que hay en la viga secundaria, que es de 1,60 metros de longitud. Dicha carga distribuida se calcula de la siguiente manera:

$$DL_D = \frac{38,74\text{ kg}_f}{1,6\text{ m}}$$

$$DL_D = 24,21 \text{ kg}_f/m$$

## 6.6. Diseño estructural de la viga secundaria de 9" de diámetro

Como se definió, la carga de servicio se calculará de la manera siguiente, tomando en consideración un área tributaria de  $1,17 \text{ m}^2$  y una longitud entre apoyos de  $1,6 \text{ m}$ .

$$PL_D = \frac{[(440,12 \text{ kg}_f)(1,17 \text{ m}^2)]}{1,60 \text{ m}}$$

$$PL_D = 321,84 \text{ kg}_f$$

Conociendo tanto la carga de servicio y la integración de cargas muertas distribuidas linealmente, entonces es posible calcular la combinación de carga Resistencia I, como se estableció en el capítulo 4.

$$W_{MD} = (1) \left( 24,21 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}} \right) + (1,75) \left( 321,84 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}} \right)$$

$$W_{MD} = 587,43 \text{ kg}_f/m$$

Una vez determinado el valor de la combinación de cargas se procede a definir el momento máximo actuante en la viga, ya que este servirá para realizar el chequeo de esfuerzo permisible, como se estableció en el capítulo 4. Dicho momento se calcula de la siguiente manera:

$$M_{MAX} = \frac{\left( 587,43 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}} \right) (1,60 \text{ m})^2}{8}$$

$$M_{MAX} = 187,98 \text{ kg}_f \cdot \text{m}$$

El momento máximo obtenido anteriormente se trabajará como un equivalente a 1 842 185,54 N·mm para el cálculo del esfuerzo a flexión. Para este cálculo es importante obtener primero el valor del módulo de sección [S] de la manera siguiente.

$$S = \frac{\pi[(228,6 \text{ mm})^4 - [228,6 \text{ mm} - 2(15,5 \text{ mm})]^4]}{32(228,6 \text{ mm})}$$

$$S = 518\,068,61 \text{ mm}^3$$

Conociendo el módulo de sección de la viga, entonces se calcula el esfuerzo a flexión, como se muestra a continuación:

$$fm = \frac{1\,842\,185,54 \text{ N} \cdot \text{mm}}{518\,068,61 \text{ mm}^3}$$

$$fm = 3,56 \text{ M}_{pa}$$

Recordando que el esfuerzo permisible a flexión según la norma peruana E100 bambú es de 5 M<sub>pa</sub>, entonces puede decirse que la viga secundaria utilizando *Guadua Angustifolia* a un diámetro de 9" y un espesor mínimo de 1,55 cm presentando un esfuerzo teórico a flexión de 3,56 M<sub>pa</sub>, cumple con el requisito.

Una vez cumplido el chequeo bajo esfuerzo de flexión, se procede a realizar el chequeo bajo esfuerzo de corte. Para esto debe definirse el cortante máximo, como se estableció en el capítulo 4.

$$V_{MAX} = \frac{\left[ \left( 587,43 \frac{kg_f}{m} \right) (1,6m) \right]}{2}$$

$$V_{MAX} = 469,94 kg_f$$

Para el cálculo del esfuerzo a corte se utilizará el valor equivalente del cortante máximo con una magnitud de 4 605,45 N. El esfuerzo a corte se calculará a continuación, como se definió en el capítulo 4.

$$f_v = \frac{2(4\ 605,45\ N)}{3(41\ 043,31\ mm^2)} \left( \frac{3(228,6mm)^2 - (4)(228,6mm)(15,5mm) + (4)(15,5)^2}{(228,6mm)^2 - 2(228,6mm)(15,5mm) + 2(15,5)^2} \right)$$

$$f_v = 0,24 M_{pa}$$

Recordando que el esfuerzo permisible a corte según la norma peruana E100 bambú es de 1 M<sub>pa</sub>, entonces puede decirse que la viga secundaria utilizando *Guadua Angustifolia* a un diámetro de 9" y al menos 1,55 cm de espesor presentando un esfuerzo teórico a corte de 0,24 M<sub>pa</sub>, cumple con el requisito.

De acuerdo con los cálculos obtenidos para los esfuerzos actuantes, puede observarse que aún es posible reducir el diámetro de las vigas secundarias y obtener un valor dentro de los esfuerzos permisibles. Por lo tanto, se procederá a realizar el chequeo para un diámetro de 8".

## 6.7. Análisis estructural de las vigas secundarias utilizando diámetro de 8 ”

Como primer paso se establece el área tributaria de cargas que afectarán a la viga secundaria, que como se definió anteriormente, es de  $1,17 \text{ m}^2$ . Se procede a realizar la integración de carga muerta que afectará al elemento.

Como se estableció, el peso tributario correspondiente al tablero se calcula de la siguiente manera:

$$DL_T = (1,17 \text{ m}^2)(0,045 \text{ m})(473,10 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}^3})$$

$$DL_T = 25,07 \text{ kg}_f$$

Se considera la misma aportación de carga que proporciona la baranda como se calculó antes:

$$Vol_B = \left[ \left( \frac{\pi((0,1016 \text{ m})^2 - (0,0916 \text{ m})^2)}{4} \right) \right] [(1,65 \text{ m})(10 \text{ u}) + (5,75 \text{ m})(2 \text{ u}) \\ + (1,90 \text{ m})(8 \text{ u})]$$

$$DL_B = \frac{(0,065 \text{ m}^3)(473,10 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}^3})}{7}$$

$$DL_B = 4,39 \text{ kg}_f$$

Como último elemento a tomar en cuenta para la integración de la carga muerta, es importante considerar el peso propio del elemento a diseñar. Para el

cálculo del peso propio de la viga secundaria en esta ocasión, se utilizará un diámetro de 8" —ya que comercialmente utilizan los diámetros en pulgadas, aunque los cálculos se realizarán en centímetros— y un espesor de 1,40 centímetros utilizando la especie de bambú *Guadua Angustifolia* y una longitud de 3 metros para el elemento. El cálculo del peso de la viga secundaria se obtiene de la siguiente manera:

$$DL_{VS} = \frac{[\pi((0,2032\text{ m})^2 - (0,1892\text{ m})^2)]}{4} [(3\text{ m}) \left( 575,19 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}^3} \right)]$$

$$DL_{VS} = 7,45\text{ kg}_f$$

Calculado el peso de los elementos que conforman la carga muerta, se procede a hacer la integración como se muestra a continuación:

$$DL = (25,07\text{ kg}_f + 4,39\text{ kg}_f + 7,45\text{ kg}_f)$$

$$DL = 36,91\text{ kg}_f$$

Para el diseño estructural se trabaja con una carga distribuida linealmente. La carga muerta se distribuye a lo largo de la luz entre apoyos que hay en la viga secundaria de 1.60 metros de longitud. Dicha carga distribuida se calcula de la siguiente manera:

$$DL_D = \frac{36,91\text{ kg}_f}{1,6\text{ m}}$$

$$DL_D = 23,07\text{ kg}_f/\text{m}$$

## 6.8. Diseño estructural de la viga secundaria de 8" de diámetro

Como se definió, la carga de servicio se calculará de la manera siguiente, tomando en consideración un área tributaria de  $1,17 \text{ m}^2$  y una longitud entre apoyos de  $1,6 \text{ m}$ .

$$PL_D = \frac{[(440,12 \text{ kg}_f)(1,17 \text{ m}^2)]}{1,60 \text{ m}}$$

$$PL_D = 321,84 \text{ kg}_f$$

Conociendo tanto la carga de servicio y la integración de cargas muertas distribuidas linealmente, es posible calcular la combinación de carga denominada Resistencia I, como se estableció en el capítulo 4.

$$W_{MD} = (1) \left( 23,07 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}} \right) + (1,75)(321,84 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}})$$

$$W_{MD} = 586,29 \text{ kg}_f/\text{m}$$

Una vez determinado el valor de la combinación de cargas, se procede a definir el momento máximo actuante en la viga, ya que este servirá para realizar el chequeo de esfuerzo permisible, como se estableció en el capítulo 4. Dicho momento se calcula de la siguiente manera:

$$M_{MAX} = \frac{\left( 586,29 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}} \right) (1,60 \text{ m})^2}{8}$$

$$M_{MAX} = 187,61 \text{ kg}_f \cdot \text{m}$$

El momento máximo obtenido de  $187,61 \text{ kg}_f \cdot \text{m}$  se trabajará como un equivalente a  $1\,838\,605,44 \text{ N}\cdot\text{mm}$  para el cálculo del esfuerzo a flexión. Para el esfuerzo a flexión, es importante obtener primero el valor del módulo de sección [S] de la manera siguiente.

$$S = \frac{\pi[(203,2 \text{ mm})^4 - [203,2 \text{ mm} - 2(14,4 \text{ mm})]^4]}{32(203,2 \text{ mm})}$$

$$S = 368\,492,84 \text{ mm}^3$$

Conociendo el módulo de sección de la viga, entonces se calcula el esfuerzo a flexión como se muestra a continuación:

$$fm = \frac{1\,838\,605,44 \text{ N} \cdot \text{mm}}{368\,492,84 \text{ mm}^3}$$

$$fm = 4,98 \text{ M}_{pa}$$

Recordando que el esfuerzo permisible a flexión según la norma peruana E100 bambú es de  $5 \text{ M}_{pa}$ , entonces puede decirse que la viga secundaria utilizando *Guadua Angustifolia* a un diámetro de 8" y un espesor mínimo de 1,40 cm presentando un esfuerzo teórico a flexión de  $4,98 \text{ M}_{pa}$ , cumple con el requisito.

Una vez cumplido con el chequeo bajo esfuerzo de flexión, se procede a realizar el chequeo bajo esfuerzo de corte. Como primer punto debe definirse el cortante máximo, como se estableció en el capítulo 4.

$$V_{MAX} = \frac{\left[ \left( 586,29 \frac{kg_f}{m} \right) (1,6 m) \right]}{2}$$

$$V_{MAX} = 469,03 kg_f$$

Para el cálculo del esfuerzo a corte se utilizará el valor equivalente del cortante máximo, con una magnitud de 4 596,51 N. El esfuerzo a corte se calculará a continuación, como se definió en el capítulo 4.

$$f_v = \frac{2(4\,596,51 N)}{3(32\,429,28 mm^2)} \left( \frac{3(203,2 mm)^2 - (4)(203,2 mm)(14,4 mm) + (4)(14,4)^2}{(203,2 mm)^2 - (2)(203,2 mm)(14,4 mm) + (2)(14,4)^2} \right)$$

$$f_v = 0,30 M_{pa}$$

Recordando que el esfuerzo permisible a corte según la norma peruana E100 bambú es de 1 M<sub>pa</sub>, entonces puede decirse que la viga secundaria utilizando *Guadua Angustifolia* a un diámetro de 8" y al menos 1,40 cm de espesor presentando un esfuerzo teórico a corte de 0,30 M<sub>pa</sub>, cumple con el requisito.

Como se puede observar en el cálculo del esfuerzo a flexión utilizando un diámetro de 8" y un espesor de al menos 1,40 cm, el esfuerzo resultante de 4,8 Mpa está sobre el límite permisible. Esto indica que al reducir el diámetro una pulgada, el esfuerzo resultante a flexión no quedará dentro del límite permisible, lo cual se demuestra a continuación.

## 6.9. Análisis estructural de las vigas secundarias utilizando diámetro de 7 ”

Como primer paso se establece el área tributaria de cargas que afectarán a la viga secundaria, que como se definió anteriormente, es de  $1,17 \text{ m}^2$ . Se procede a realizar la integración de carga muerta que afectará al elemento.

Como se estableció, el peso tributario correspondiente al tablero, se calcula de la siguiente manera:

$$DL_T = (1,17 \text{ m}^2)(0,045 \text{ m})(473,10 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}^3})$$

$$DL_T = 25,07 \text{ kg}_f$$

Se considera la misma aportación de carga que proporciona la baranda como se calculó antes:

$$Vol_B = \left[ \left( \frac{\pi((0,1016 \text{ m})^2 - (0,0916 \text{ m})^2)}{4} \right) \right] [(1,65 \text{ m})(10 \text{ u}) + (5,75 \text{ m})(2 \text{ u}) + (1,90 \text{ m})(8 \text{ u})]$$

$$DL_B = \frac{(0,065 \text{ m}^3)(473,10 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}^3})}{7}$$

$$DL_B = 4,39 \text{ kg}_f$$

Como último elemento a tomar en cuenta para la integración de la carga muerta, es importante considerar el peso propio del elemento a diseñar. Para el

cálculo del peso propio de la viga secundaria, en esta ocasión se utilizará un diámetro de 7" —ya que comercialmente utilizan los diámetros en pulgadas, aunque los cálculos se realizarán en centímetros— y un espesor de 1,20 centímetros, utilizando la especie de bambú *Guadua Angustifolia* y una longitud de 3 metros para el elemento. El cálculo del peso de la viga secundaria se obtiene de la siguiente manera:

$$DL_{VS} = \frac{[\pi((0,1778\text{ m})^2 - (0,1658\text{ m})^2)]}{4} [(3\text{ m}) \left( 575,19 \frac{kg_f}{m^3} \right)]$$

$$DL_{VS} = 5,59\text{ kg}_f$$

Calculado el peso de los elementos que conforman la carga muerta, se procede a hacer la integración como se muestra a continuación:

$$DL = (25,07\text{ kg}_f + 4,39\text{ kg}_f + 5,59\text{ kg}_f)$$

$$DL = 35,05\text{ kg}_f$$

Para el diseño estructural se trabaja con una carga distribuida linealmente. La carga muerta se distribuye a lo largo de la luz entre apoyos que hay en la viga secundaria, de 1,60 metros de longitud. Dicha carga distribuida se calcula de la siguiente manera:

$$DL_D = \frac{35,05\text{ kg}_f}{1,6\text{ m}}$$

$$DL_D = 21,91\text{ kg}_f/\text{m}$$

### 6.10. Diseño estructural de la viga secundaria de 7" de diámetro

Como se definió con anterioridad, la carga de servicio se calculará de la manera siguiente, tomando en consideración un área tributaria de  $1,17 \text{ m}^2$  y una longitud entre apoyos de  $1,6 \text{ m}$ .

$$PL_D = \frac{[(440,12 \text{ kg}_f)(1,17 \text{ m}^2)]}{1,60 \text{ m}}$$

$$PL_D = 321,84 \text{ kg}_f$$

Conociendo tanto la carga de servicio y la integración de cargas muertas distribuidas linealmente, entonces es posible calcular la combinación de carga denominada Resistencia I, como se estableció en el capítulo 4.

$$W_{MD} = (1) \left( 21,91 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}} \right) + (1,75)(321,84 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}})$$

$$W_{MD} = 585,13 \text{ kg}_f/\text{m}$$

Una vez determinado el valor de la combinación de cargas, se procede a definir el momento máximo actuante en la viga, ya que este servirá para realizar el chequeo de esfuerzo permisible, como se estableció en el capítulo 4. Dicho momento se calcula de la siguiente manera:

$$M_{MAX} = \frac{\left( 585,13 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}} \right) (1,60 \text{ m})^2}{8}$$

$$M_{MAX} = 187,24 \text{ kg}_f \cdot \text{m}$$

El momento máximo obtenido anteriormente se trabajará como un equivalente a 1 834 967,68 N·mm para calcular el esfuerzo a flexión. Para el cálculo del esfuerzo a flexión es importante obtener primero el valor del módulo de sección [S] de la manera siguiente.

$$S = \frac{\pi[(177,8 \text{ mm})^4 - [177,8 \text{ mm} - 2(12 \text{ mm})]^4]}{32(177,8 \text{ mm})}$$

$$S = 242\,863,36 \text{ mm}^3$$

Conociendo el módulo de sección de la viga, entonces se calcula el esfuerzo a flexión, como se muestra a continuación:

$$f_m = \frac{1\,834\,967,68 \text{ N} \cdot \text{mm}}{242\,863,36 \text{ mm}^3}$$

$$f_m = 7,56 \text{ M}_{pa}$$

Recordando que el esfuerzo permisible a flexión según la norma peruana E100 bambú es de 5 M<sub>pa</sub>, entonces puede decirse que la viga secundaria utilizando *Guadua Angustifolia* a un diámetro de 7" y un espesor mínimo de 1,2 cm presentando un esfuerzo teórico a flexión de 7,56 M<sub>pa</sub>, no cumple con el requisito, como se había anticipado.

Habiendo calculado el esfuerzo de flexión, se procede a realizar el chequeo bajo esfuerzo de corte. Como primer punto debe definirse el cortante máximo, como se estableció en el capítulo 4.

$$V_{MAX} = \frac{\left[ \left( 585,13 \frac{kg_f}{m} \right) (1,6 m) \right]}{2}$$

$$V_{MAX} = 468,10 kg_f$$

Para el cálculo del esfuerzo a corte se utilizará el valor equivalente del cortante máximo, con una magnitud de 4 587,42 N. El esfuerzo a corte se calculará a continuación, como se definió en el capítulo 4.

$$f_v = \frac{2(4\,587,42 N)}{3(24\,828,67 mm^2)} \left( \frac{3(177,8 mm)^2 - (4)(177,8 mm)(12 mm) + (4)(12 mm)^2}{(177,8 mm)^2 - (2)(177,8 mm)(12 mm) + (2)(12 mm)^2} \right)$$

$$f_v = 0,39 M_{pa}$$

Recordando que el esfuerzo permisible a corte según la norma peruana E100 bambú es de 1 M<sub>pa</sub>, entonces puede decirse que la viga secundaria utilizando *Guadua Angustifolia* a un diámetro de 7" y al menos 1,20 cm de espesor presentando un esfuerzo teórico a corte de 0,39 M<sub>pa</sub>, cumple con el requisito.

A pesar que la viga secundaria con los parámetros establecidos anteriormente cumple con el esfuerzo a corte, esta no queda dentro de un esfuerzo permisible a flexión, por lo que se descarta su uso con esas medidas para ser utilizada como viga secundaria en el armado del puente propuesto.

Debido a lo anterior, se establece que el diámetro mínimo para utilizarse como viga secundaria es de 8" a un espesor mínimo de 1,4 cm. Con este

conocimiento se procede a determinar un diámetro mínimo para la viga principal, como se demuestra a continuación.

### 6.11. Análisis estructural de viga principal a 10” utilizando diámetro mínimo para viga secundaria de 8”

Como primer paso para el análisis estructural de las vigas principales se define el área tributaria. Se considera como una losa que trabaja en dos sentidos, como se mencionó, en un área tributaria de 4,8 m<sup>2</sup>. Definida el área tributaria para la viga principal, entonces se calcula las cargas muertas. Es importante recordar que la carga muerta aportada por la baranda y el tablero son de la especie de bambú *Dendrocalamus Asper*, y la carga muerta aportada por las vigas secundarias es de la especie *Guadua Angustifolia*, con un diámetro de 8” y 1,4 cm de espesor.

A continuación, se calcula el peso tributario aportado por la baranda hacia una de las vigas principales.

$$Vol_B = \left[ \left( \frac{\pi((0,1016 m)^2 - (0,0916 m)^2)}{4} \right) \right] [(1,65 m)(5 u) + (5,75 m)(1 u) + (1,90 m)(4 u)] = 0,033 m^3$$

$$DL_B = (0,033 m^3) \left( 473,10 \frac{kg_f}{m^3} \right) = 15,61 kg_f$$

Luego se procederá a calcular el peso tributario del tablero.

$$DL_T = (0,045 m)(0,8 m)(6 m) \left( 473,10 \frac{kg_f}{m^3} \right) = 102,19 kg_f$$

Seguido de ello, se obtendrá el peso muerto tributario de las vigas secundarias hacia la viga principal.

$$DL_{VS} = \frac{[\pi((0,2032 \text{ m})^2 - (0,1892 \text{ m})^2)]}{4} \left[ (1,50 \text{ m})(9 \text{ u}) \left( 575,19 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}^3} \right) \right]$$

$$= 33,50 \text{ kg}_f$$

Por último, se obtendrá el peso propio de la viga principal.

$$DL_{VS} = \frac{[\pi((0,25 \text{ m})^2 - (0,23 \text{ m})^2)]}{4} \left[ (6 \text{ m})(4 \text{ u}) \left( 575,19 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}^3} \right) \right] = 104,08 \text{ kg}_f$$

Determinado el peso de los elementos que conforman la carga muerta, se procede a hacer la integración de la manera siguiente:

$$DL = (15,61 \text{ kg}_f + 102,19 \text{ kg}_f + 33,50 \text{ kg}_f + 104,08 \text{ kg}_f = 255,38 \text{ kg}_f$$

Para el diseño estructural se trabaja con una carga distribuida linealmente. La carga muerta se distribuye a lo largo de la luz entre apoyos que hay en la viga principal, de 6 metros de longitud. Dicha carga distribuida se calcula de la siguiente manera:

$$DL_D = \frac{255,38 \text{ kg}_f}{6 \text{ m}} = 42,56 \text{ kg}_f/\text{m}$$

## 6.12. Diseño estructural de la viga principal con diámetro de 10" y viga secundaria de 8" de diámetro

Una vez realizado el análisis de cargas en la viga principal, se procede a realizar su diseño estructural. Como se estableció en el capítulo 3, la carga de

servicio que se tomará en cuenta es de 440,12 kgf/m<sup>2</sup>, y su área tributaria será de 4,80 m<sup>2</sup>, como se mostró en el inciso anterior.

Dado que para el diseño estructural es necesario contar con la carga distribuida linealmente en el elemento a diseñar, se procede a calcularla de la manera siguiente.

$$PL_D = \frac{[(440,12 \text{ kg}_f)(4,80 \text{ m}^2)]}{6 \text{ m}} = 352,10 \text{ kg}_f/\text{m}$$

Conociendo tanto la carga de servicio y la integración de cargas muertas distribuidas linealmente, entonces es posible calcular la combinación de carga denominada Resistencia I, como se estableció en el capítulo 4.

$$W_{MD} = (1) \left( 42,56 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}} \right) + (1,75) \left( 352,10 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}} \right) = 658,74 \text{ kg}_f/\text{m}$$

Habiendo determinado el valor de la combinación de cargas, es importante entonces definir el momento máximo actuante en la viga, ya que este servirá para realizar el chequeo de esfuerzo permisible como se estableció en el capítulo 4. Dicho momento se calcula de la siguiente manera:

$$M_{MAX} = \frac{\left( 658,74 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}} \right) (6 \text{ m})^2}{8} = 2\,964,31 \text{ kg}_f \cdot \text{m}$$

El momento máximo obtenido anteriormente se trabajará como un equivalente a 29 050 213,50 N·mm para el cálculo del esfuerzo a flexión. Considerando que 4 cañas forman la viga principal, cada una de 10 " de diámetro, se considera como un solo elemento de 50 cm de diámetro y 4 cm de espesor,

debido a las restricciones del anclaje mecánico usado para su conformación. Para el cálculo del esfuerzo a flexión, es importante obtener primero el valor del módulo de sección [S] de la manera siguiente.

$$S = \frac{\pi[(500 \text{ mm})^4 - [500 \text{ mm} - 2(40 \text{ mm})]^4]}{32(500 \text{ mm})} = 6\,162\,045,50 \text{ mm}^3$$

Conociendo el módulo de sección de la viga, entonces se calcula el esfuerzo a flexión como se muestra:

$$f_m = \frac{29\,050\,213,50 \text{ N} \cdot \text{mm}}{6\,162\,045,50 \text{ mm}^3} = 4,71 \text{ M}_{pa}$$

Dado que el esfuerzo permisible a flexión según la norma peruana E100 bambú es de 5 M<sub>pa</sub>, entonces puede decirse que la viga principal utilizando 4 cañas de *Guadua Angustifolia* cada una a un diámetro de 10" y al menos 2 cm de espesor presentando un esfuerzo teórico a flexión de 4,71 M<sub>pa</sub>, cumple con el requisito del esfuerzo permisible.

Una vez cumplido con el chequeo bajo esfuerzo de flexión, se procede a realizar el chequeo bajo esfuerzo de corte. Como primer punto debe definirse el cortante máximo, como se estableció en el capítulo 4.

$$V_{MAX} = \frac{\left[ \left( 658,74 \frac{kg_f}{m} \right) (6 \text{ m}) \right]}{2}$$

$$V_{MAX} = 1\,976,22 \text{ kg}_f$$

Para el cálculo del esfuerzo a corte se utilizará el valor equivalente del cortante máximo, con una magnitud de 19 366,96 N. El esfuerzo a corte de la viga se calculará a continuación como se definió en el capítulo 4.

$$f_v = \frac{2(19\,366,96\text{ N})}{3(196\,349,54\text{ mm}^2)} \left( \frac{3(500\text{ mm})^2 - (4)(500\text{ mm})(40\text{ mm}) + (4)(40\text{ mm})^2}{(500\text{ mm})^2 - 2(500\text{ mm})(40\text{ mm}) + 2(40\text{ mm})^2} \right)$$

$$f_v = 0,21\text{ M}_{pa}$$

Recordando que el esfuerzo permisible a corte según la norma peruana E100 bambú es de 1 M<sub>pa</sub>, entonces puede decirse que la viga principal utilizando 4 cañas de *Guadua Angustifolia* cada una a un diámetro de 25 cm o 10" y al menos 2 cm de espesor presentando un esfuerzo teórico a corte de 0,21 M<sub>pa</sub>, cumple con el requisito del esfuerzo permisible.

Puede observarse que tanto las vigas principales como las secundarias, utilizando diámetros de 10" y 8" respectivamente, cumplen con los esfuerzos permisibles. Según los datos obtenidos para los esfuerzos, podría anticiparse que reduciendo el diámetro de la viga principal a 9" ya no cumplirá con el esfuerzo permisible a flexión; sin embargo, se procede a calcular a continuación.

### **6.13. Análisis estructural de viga principal a 9" utilizando diámetro mínimo para viga secundaria de 8"**

Como se definió, el área tributaria es de 4,8 m<sup>2</sup> para una losa en dos direcciones. Definida el área tributaria para la viga principal, entonces se procede a realizar el cálculo de las cargas muertas. Es importante recordar que la carga muerta aportada por la baranda y el tablero son de la especie de bambú

*Dendrocalamus Asper*, y la carga muerta aportada por las vigas secundarias es de la especie *Guadua Angustifolia* con un diámetro de 8" y 1,4 cm de espesor.

A continuación, se calcula el peso tributario aportado por la baranda hacia una de las vigas principales.

$$Vol_B = \left[ \left( \frac{\pi((0,1016\text{ m})^2 - (0,0916\text{ m})^2)}{4} \right) \right] [(1,65\text{ m})(5\text{ u}) + (5,75\text{ m})(1\text{ u}) + (1,90\text{ m})(4\text{ u})] = 0,033\text{ m}^3$$

$$DL_B = (0,033\text{ m}^3) \left( 473,10 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}^3} \right) = 15,61\text{ kg}_f$$

Luego se procederá a calcular el peso tributario del tablero.

$$DL_T = (0,045\text{ m})(0,8\text{ m})(6\text{ m}) \left( 473,10 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}^3} \right) = 102,19\text{ kg}_f$$

Seguido de ello, se obtendrá el peso muerto tributario de las vigas secundarias hacia la viga principal.

$$DL_{VS} = \frac{[\pi((0,2032\text{ m})^2 - (0,1892\text{ m})^2)]}{4} \left[ (1,50\text{ m})(9\text{ u}) \left( 575,19 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}^3} \right) \right] = 33,50\text{ kg}_f$$

Por último, se obtendrá el peso propio de la viga principal.

$$DL_{VP} = \frac{[\pi((0,2286\text{ m})^2 - (0,2131\text{ m})^2)]}{4} \left[ (6\text{ m})(4\text{ u}) \left( 575,19 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}^3} \right) \right] = 74,23\text{ kg}_f$$

Conociendo el peso de los elementos que conforman la carga muerta, se procede a hacer la integración de la manera siguiente:

$$DL = (15,61 \text{ kg}_f + 102,19 \text{ kg}_f + 33,50 \text{ kg}_f + 74,23 \text{ kg}_f = 225,53 \text{ kg}_f$$

Como se ha mencionado en repetidas ocasiones, para el diseño estructural se trabaja con una carga distribuida linealmente. La carga muerta se distribuye a lo largo de la luz entre apoyos que hay en la viga principal de 6 metros de longitud. Dicha carga distribuida se calcula de la siguiente manera:

$$DL_D = \frac{225,53 \text{ kg}_f}{6 \text{ m}} = 37,59 \text{ kg}_f/\text{m}$$

#### **6.14. Diseño estructural de la viga principal con diámetro de 9" y viga secundaria de 8" de diámetro**

Una vez realizado el análisis de cargas en la viga principal, se procede a realizar su diseño estructural. Como se estableció en el capítulo 3, la carga de servicio que se tomará en cuenta es de 440,12 kgf/m<sup>2</sup>, y su área tributaria será de 4,80 m<sup>2</sup>, como se mostró en el inciso anterior.

Dado que para el diseño estructural es necesario contar con la carga distribuida linealmente en el elemento a diseñar, se procede a calcularla de la manera siguiente.

$$PL_D = \frac{[(440,12 \text{ kg}_f)(4,80 \text{ m}^2)]}{6 \text{ m}} = 352,10 \text{ kg}_f/\text{m}$$

Conociendo tanto la carga de servicio y la integración de cargas muertas distribuidas linealmente, entonces es posible calcular la combinación de carga denominada Resistencia I, como se estableció en el capítulo 4.

$$W_{MD} = (1) \left( 37,59 \frac{kg_f}{m} \right) + (1,75) \left( 352,10 \frac{kg_f}{m} \right) = 653,76 kg_f/m$$

Una vez determinado el valor de la combinación de cargas, es importante entonces definir el momento máximo actuante en la viga, ya que este servirá para realizar el chequeo de esfuerzo permisible, como se estableció en el capítulo 4. Dicho momento se calcula de la siguiente manera:

$$M_{MAX} = \frac{\left( 653,76 \frac{kg_f}{m} \right) (6 m)^2}{8} = 2 941,94 kg_f \cdot m$$

El momento máximo obtenido anteriormente se trabajará como un equivalente a 28 830 963,00 N·mm para el cálculo del esfuerzo a flexión. Considerando que 4 cañas forman la viga principal, cada una de 9 " de diámetro, se considera como un solo elemento de 45,72 cm de diámetro y 3 cm de espesor debido a las restricciones del anclaje mecánico usado para su conformación. Para el cálculo del esfuerzo a flexión, es importante obtener primero el valor del módulo de sección [S] de la manera siguiente.

$$S = \frac{\pi[(457,2 mm)^4 - [457,2 mm - 2(30 mm)]^4]}{32(457,2 mm)} = 4 037 709,88 mm^3$$

Conociendo el módulo de sección de la viga, entonces se calcula el esfuerzo a flexión, como se muestra:

$$f_m = \frac{28\,830\,963,00 \text{ N} \cdot \text{mm}}{4\,037\,709,88 \text{ mm}^3} = 7,14 \text{ M}_{pa}$$

Recordando que el esfuerzo permisible a flexión según la norma peruana E100 bambú es de 5 M<sub>pa</sub>, entonces puede decirse que la viga principal utilizando *Guadua Angustifolia* a un diámetro de 9" y un espesor mínimo de 1,55 cm con un esfuerzo teórico a flexión de 7,14 M<sub>pa</sub>, no cumple con el requisito, como se había anticipado.

Una vez calculado el esfuerzo de flexión, se procede a realizar el chequeo bajo esfuerzo de corte. Como primer punto debe definirse el cortante máximo, como se estableció en el capítulo 4.

$$V_{MAX} = \frac{\left[ \left( 653,76 \frac{kg_f}{m} \right) (6 \text{ m}) \right]}{2}$$

$$V_{MAX} = 1\,961,28 \text{ kg}_f$$

Para el cálculo del esfuerzo a corte, se utilizará el valor equivalente del cortante máximo con una magnitud de 19 220,54 N. El esfuerzo a corte de la viga, se calculará a continuación, como se definió en el capítulo 4.

$$f_v = \frac{2(19\,220,54 \text{ N})}{3(164\,173,22 \text{ mm}^2)} \left( \frac{3(457,2 \text{ mm})^2 - (4)(457,2 \text{ mm})(30 \text{ mm}) + (4)(30 \text{ mm})^2}{(457,2 \text{ mm})^2 - 2(457,2 \text{ mm})(30 \text{ mm}) + 2(30 \text{ mm})^2} \right)$$

$$f_v = 0,25 \text{ M}_{pa}$$

Dado que el esfuerzo permisible a corte según la norma peruana E100 bambú es de 1 M<sub>pa</sub>, entonces puede decirse que la viga principal utilizando 4

cañas de *Guadua Angustifolia* cada una a un diámetro de 9" y al menos 1,55 cm de espesor presentando un esfuerzo teórico a corte de 0,25 M<sub>pa</sub>, cumple con el requisito del esfuerzo permisible.

A pesar que la viga principal con los parámetros establecidos cumple con el esfuerzo a corte, esta no queda dentro de un esfuerzo permisible a flexión, por lo que se descarta su uso con esas medidas para ser utilizada como viga principal en el armado del puente propuesto.

Debido a lo anterior, se establece que el diámetro mínimo para utilizarse como viga principal es de 10" a un espesor mínimo de 2 cm.

## 7. CONSTRUCCIÓN DEL PUENTE

Debido a que se realizaron dos ensayos, se construyeron dos puentes, uno para cada tipo de ensayo. Gracias a la colaboración del Ministerio de Ambiente y Ganadería (MAGA) en conjunto con la Misión Internacional China en Taiwán, a través de ICDF (International Cooperation and Development Fund) en el marco del proyecto Industrialización del bambú, entidades que donaron material para la construcción de los puentes, se procedió a la construcción utilizando en su totalidad como materia prima bambú de la especie *Dendrocalamus Asper*.

Aunque para esta especie de bambú aún no se cuenta con esfuerzos permisibles en el diseño estructural, se procedió a realizar ensayos demostrativos para mostrar la gran capacidad del bambú como material estructural, específicamente en esta especie en particular.

Dicho lo anterior se procedió a la construcción del puente utilizando diámetros de 4 pulgadas para la baranda, 5 pulgadas para las vigas secundarias y 6 pulgadas para las cañas de las vigas principales, considerando un espesor de esterilla de 4,5 centímetros para el tablero. El procedimiento de la construcción de los puentes se detalla en el capítulo 11, en la guía para la elaboración de puente peatonal de bambú.



## 8. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

Debido a que la población en general desconoce la capacidad extraordinaria que presentan ciertas especies de bambú para soportar distintos tipos de esfuerzos, se desarrollaron ensayos demostrativos para respaldar la gran capacidad que el bambú tiene cuando se construyen estructuras sometidas a cargas.

Cabe mencionar que, debido a limitaciones en cuanto al área para ensayar estructuras de este tipo, se construyeron marcos de bambú para soportar los puentes durante los procesos de ensayo.

Figura 15. **Marco de bambú**



Fuente: Sección de materiales prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Dicho lo anterior, para el desarrollo de los ensayos se construyeron dos puentes, uno bajo carga de fatiga y el segundo para demostrar la capacidad para soportar grandes cargas.

### **8.1. Ensayo de puente peatonal bajo carga de fatiga**

Este ensayo se llevó a cabo por la Sección de tecnología de la madera, en la Sección de materiales prefabricados de la Facultad de Ingeniería, USAC. Para su realización, se construyeron paredes de madera en todo el perímetro del tablero del puente. Seguido de ello se colocó un nylon sobre el tablero y las paredes de madera para formar una especie de tanque o piscina.

**Figura 16. Piscina para ensayo de puente**



Fuente: Sección de materiales prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Una vez la piscina estuvo lista, se procedió a realizar una conexión hidráulica con mangueras hacia la toma de agua más cercana en el sitio. Al otro extremo de la conexión se localizó un medidor volumétrico de agua para registrar el volumen de agua al cual se cargaría al puente.

Figura 17. **Medidor volumétrico de agua utilizado para los ensayos**



Fuente: Sección de materiales prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Se localizaron 4 deformómetros bajo el puente para tomar lectura de la deformación de la estructura: un deformómetro a  $1/3$ , otro a  $2/3$  de  $l$ , donde  $l$  representa la longitud de luz libre entre apoyos, y dos al centro del puente.

Figura 18. **Deformómetro utilizado para los ensayos**



Fuente: Sección de materiales prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Una vez se colocaron los deformómetros, se abrió paso al agua para comenzar a llenar el puente. Para cada media tonelada registrada por el contador de agua, se fueron tomando lecturas en los deformómetros ubicados bajo el puente. Cuando se alcanzó la carga de fatiga, se procedió a dejar el puente cargado por un período de veinticuatro horas. La carga de fatiga es de  $322,24 \text{ kg/m}^2$ , considerando que el área tributaria de carga de la piscina construida en el puente es  $11 \text{ m}^2$ , se estableció para efectos de laboratorio una carga mínima de fatiga de  $3\,500 \text{ kg}$  ( $3,5 \text{ T}$ ).

Figura 19. **Carga del puente con agua**



Fuente: Sección de materiales prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Pasadas las veinticuatro horas de carga continua, se procedió a realizar el vaciado del puente por medio de las mangueras que se utilizaron para cargar el mismo, para simular lo que sería el actuar de un ciclo de carga de fatiga en la estructura. Cada media tonelada vaciada por las mangueras, se tomó lectura en los deformómetros para registrar la recuperación del puente. Una vez vaciado se realizó toma de lecturas en los deformómetros para registrar la regresión total que sufrió la estructura.

Se realizaron dos ciclos de carga de fatiga, por lo que antes de realizar el segundo ciclo, se procedió a una nueva toma de lecturas en los deformómetros.

Luego de este ensayo, el puente no registró daños en su estructura que pusieran en riesgo su integridad.

## 8.2. Ensayo demostrativo aplicando carga masiva

Este ensayo se realizó con ayuda del personal de la Sección de tecnología de la madera, en la Sección de materiales prefabricados de la Facultad de Ingeniería, USAC. Al igual que el ensayo donde se aplicó carga de fatiga, en este caso se construyó una piscina de la misma manera, utilizando madera y nylon para contener el agua, que sirvió como elemento de carga para la estructura.

En este caso únicamente se colocó un deformómetro en el centro del puente para registrar la deformación de la estructura en un intervalo de cada media tonelada. De forma que, para cargar el puente, se utilizó de igual manera una conexión hidráulica con mangueras y un medidor volumétrico para registrar la carga producida por el agua.

En este caso se cargó el puente hasta un nivel máximo que permitió la estructura de la piscina.

Figura 20. **Llenado de puente con carga masiva de agua**



Fuente: Sección de materiales prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Como último paso se procedió al vaciado del puente y se tomó lectura en el deformómetro para registrar la recuperación instantánea de la estructura. Pasadas 24 horas, se tomó nuevamente lectura en el deformómetro para registrar si existió alguna recuperación del puente luego de un tiempo de realizado el ensayo.

Finalizado este ensayo, no se registró ningún tipo de falla en la estructura que pusiera en riesgo la integridad del puente.



## 9. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

En este capítulo se muestran los resultados que se obtuvieron tras la elaboración de los ensayos.

### 9.1. Resultados de ensayos a puente peatonal bajo carga de fatiga

A continuación, se muestran los resultados del primer ciclo con carga de fatiga para el puente, registrados a cada media tonelada de carga.

Tabla V. **Lecturas en deformómetros del primer ciclo de carga medidas en centímetros**

Carga (toneladas)	Deformómetro a l/3 (cm)	Deformómetro al centro (cm)	Deformómetro al centro (cm)	Deformómetro a 2l/3 (cm)
0	101,2	11	3,1	6,1
0,5	101,3	11,3	3,3	61,3
1	101,7	11,95	4,0	61,7
1,5	102,1	12,5	4,3	62,1
2	102,7	13,1	5,0	62,5
2,5	103,2	13,8	5,7	63,1
3	103,7	14,5	6,4	63,5
3,5	104,1	14,9	7,0	64,0

Fuente: elaboración propia.

Con los datos obtenidos por medio de las lecturas de los deformómetros, se calcula la deformación en función a la carga, de acuerdo a la ecuación 10:

Ecuación 10

$$\Delta y = y_f - y_o$$

Donde:

$\Delta y$ : deformación en el eje y

$y_f$ : lectura final en el eje y

$y_o$ : lectura inicial en el eje y

Tabla VI. **Deformaciones en el puente en función a la carga**

Carga (toneladas)	$\Delta y$ (1/3)	$\Delta y$ al centro	$\Delta y$ al centro	$\Delta y$ (2/3)	$\Delta y$ promedio al centro
0,5	0,1	0,3	0,2	0,2	0,25
1	0,5	0,95	0,9	0,6	0,925
1,5	0,9	1,5	1,2	1	1,35
2	1,5	2,1	1,9	1,4	2
2,5	2	2,8	2,6	2	2,7
3	2,5	3,5	3,3	2,4	3,4
3,5	2,9	3,9	3,9	2,9	3,9

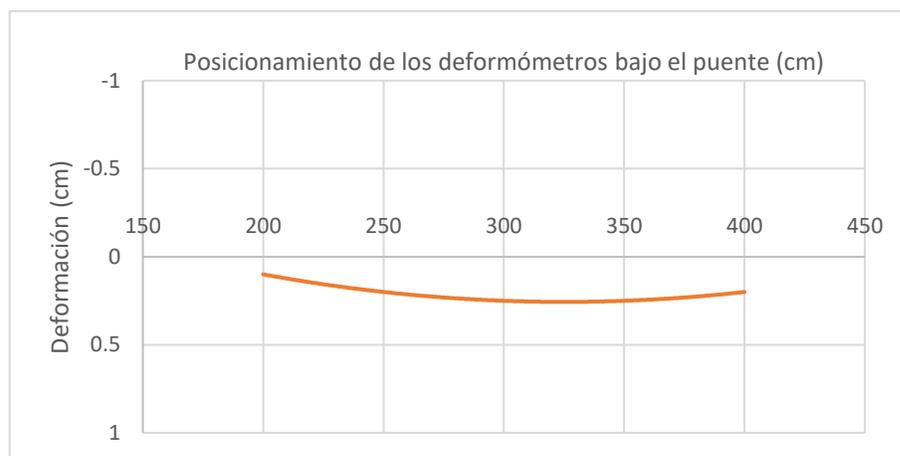
Fuente: elaboración propia.

Con la obtención de las deformaciones y sabiendo la localización de los deformómetros, es posible realizar las gráficas correspondientes para una

apreciación de lo que sucede en la estructura con respecto a las variaciones de carga.

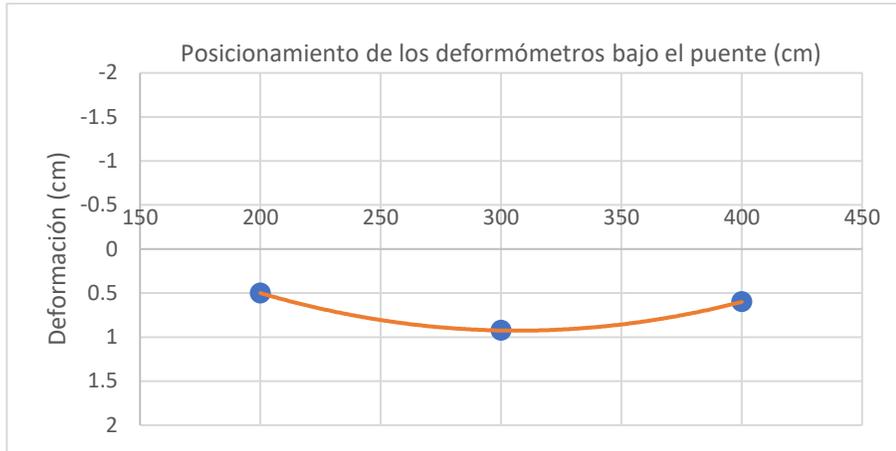
Tanto el eje de posicionamiento de los deformómetros como el eje de la deformación se mostrarán en centímetros. El cambio de escala en relación a los dos ejes es inminente para mostrar una mejor visualización, aunque de manera exagerada, de su deformación. Para tener todavía un mejor concepto de la deformación del puente, se colocará el eje de la deformación en orden inverso, con el motivo de tener una línea de tendencia de deformación semejante a la realidad.

Figura 21. **Gráfica de deformación del puente a 0,5 toneladas de carga**



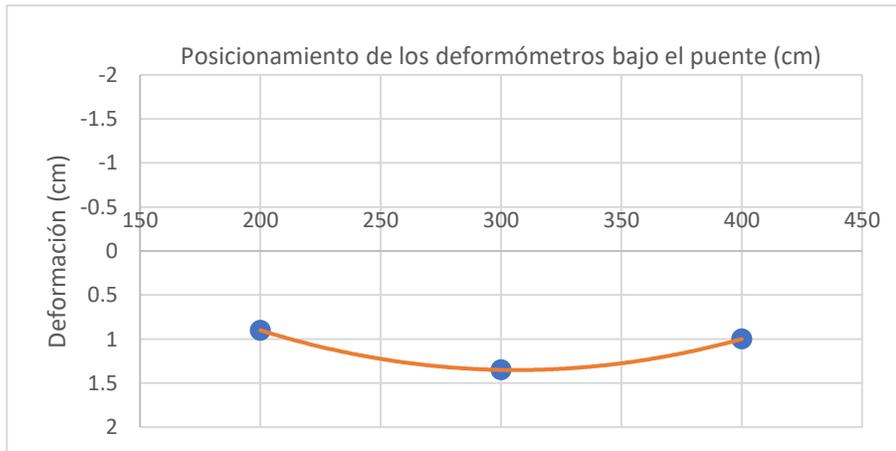
Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Gráfica de deformación del puente a 1 tonelada de carga**



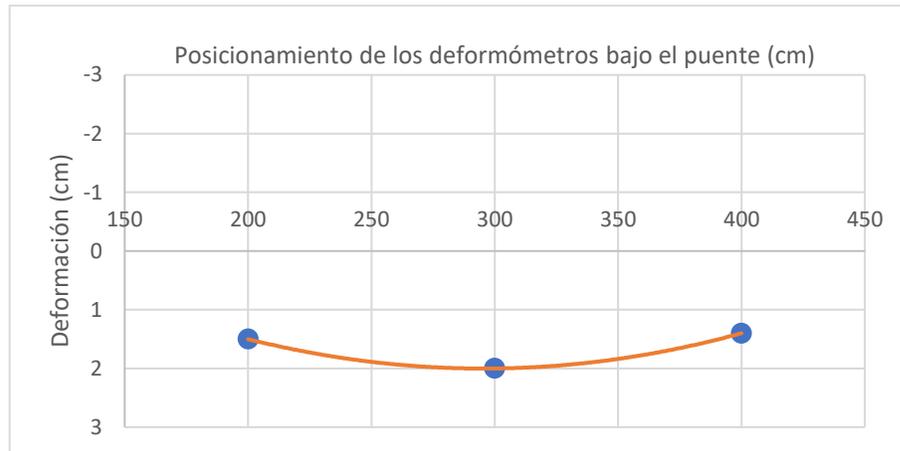
Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **Gráfica de deformación del puente a 1,5 toneladas de carga**



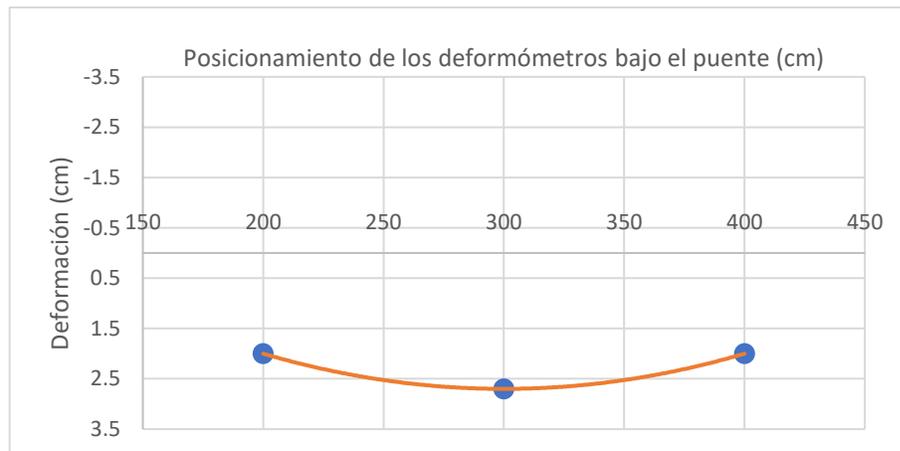
Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Gráfica de deformación del puente a 2 toneladas de carga**



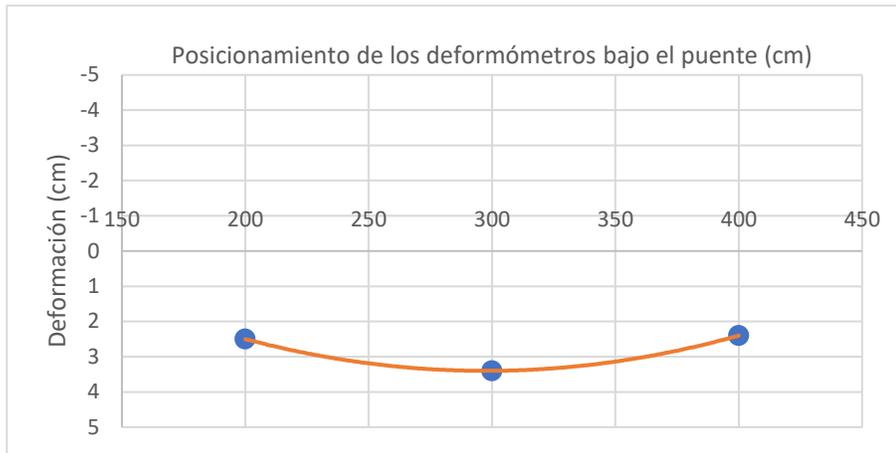
Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Gráfica de deformación del puente a 2,5 toneladas de carga**



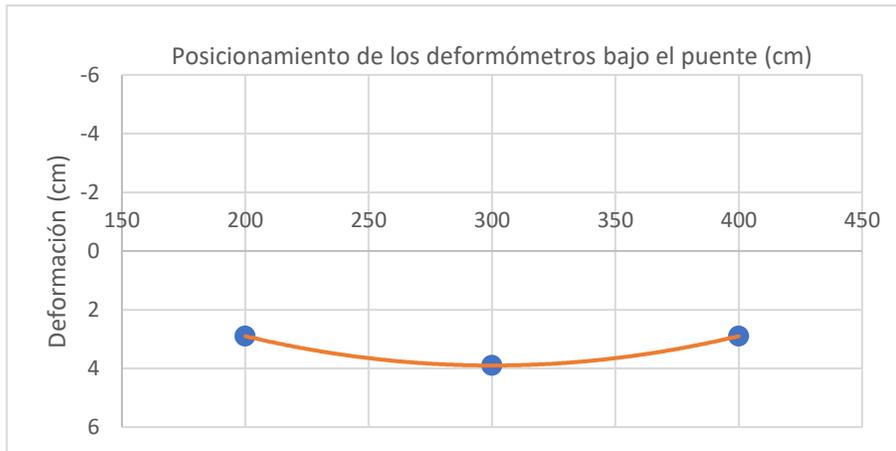
Fuente: elaboración propia.

Figura 26. **Gráfica de deformación del puente a 3 toneladas de carga**



Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Gráfica de deformación del puente a 3,5 toneladas de carga**



Fuente: elaboración propia.

Con las gráficas mostradas se pretende demostrar que existe una deformación uniforme en el puente cuando es sometido a carga. Por lo tanto, la distribución de los elementos estructurales y su dimensionamiento es adecuado.

A continuación se muestra los datos de las lecturas en los deformómetros en el primer proceso de descarga del puente bajo carga de fatiga, luego de 24 horas de sostenimiento continuo de la misma.

**Tabla VII. Lectura de los deformómetros en proceso de descarga del puente**

Carga (toneladas)	Deformómetro a l/3 (cm)	Deformómetro al centro (cm)	Deformómetro al centro (cm)	Deformómetro a 2l/3 (cm)
Inicial	101,2	11	3,1	61,1
3,5	104,3	15,6	7,8	64,3
3	104,1	15,3	7,5	64,1
2,5	104	15,1	7,2	64
2	103,7	14,8	6,7	63,7
1,5	103,45	14,4	6,5	63,45
1	103	13,9	6,1	63,05
0,5	102,25	13,1	5,4	62,45
0	101,8	12,8	4,8	62
0 toneladas 24 horas después	101,8	12,35	4,2	61,7

Fuente: elaboración propia.

Al igual que se hizo anteriormente, se procederá a calcular las deformaciones con la ecuación 10.

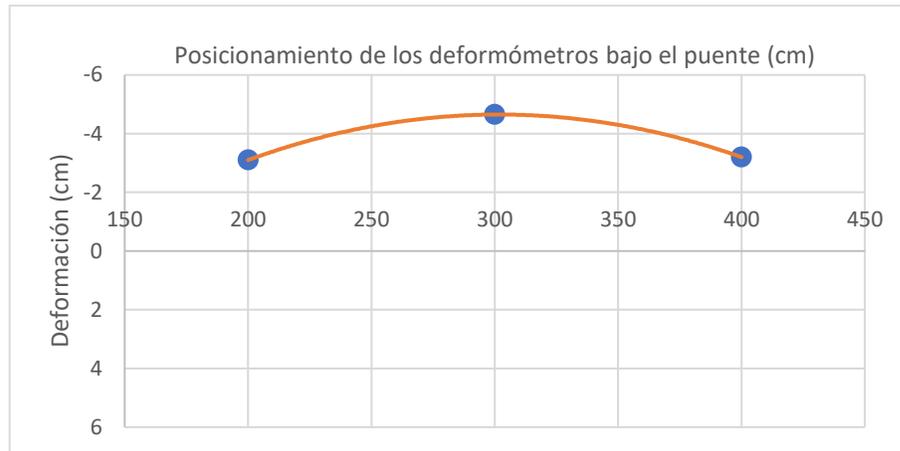
**Tabla VIII. Deformaciones del puente al momento de descarga**

Carga (toneladas)	$\Delta y$ (1/3)	$\Delta y$ al centro	$\Delta y$ al centro	$\Delta y$ (2/3)	$\Delta y$ promedio al centro
3,5	3,1	4,6	4,7	3,2	4,65
3	2,9	4,3	4,4	3	4,35
2,5	2,8	4,1	4,1	2,9	4,1
2	2,5	3,8	3,6	2,6	3,7
1,5	2,25	3,4	3,4	2,35	3,4
1	1,8	2,9	3	1,95	2,95
0,5	1,05	2,1	2,3	1,35	2,2
0	0,6	1,8	1,7	0,9	1,75
0 toneladas 24 horas después	0,6	1,35	1,1	0,6	1,225

Fuente: elaboración propia.

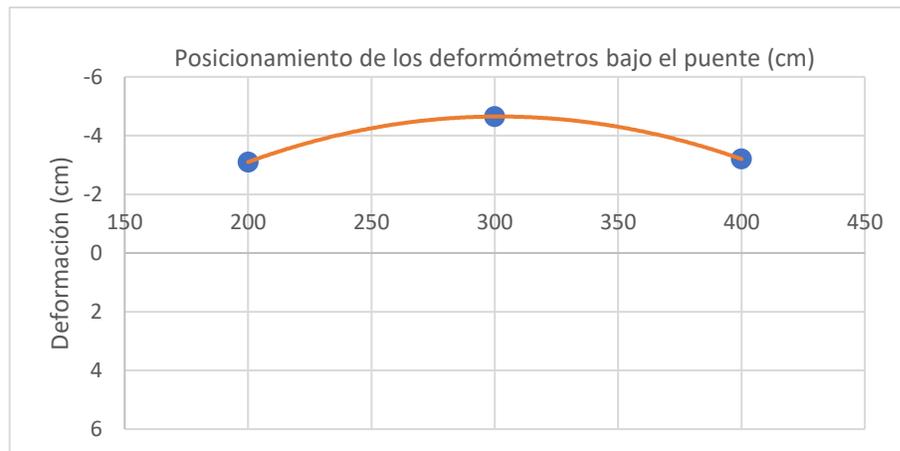
A partir de la sucesión de las gráficas se aprecia la forma en que el puente fue recuperando su estado, con una tendencia a su posición inicial. A diferencia de las gráficas de carga, los datos de descarga se graficaron con el eje invertido para diferenciar los procesos de carga y descarga.

Figura 28. **Gráfica de recuperación del puente a 3,5 toneladas de carga**



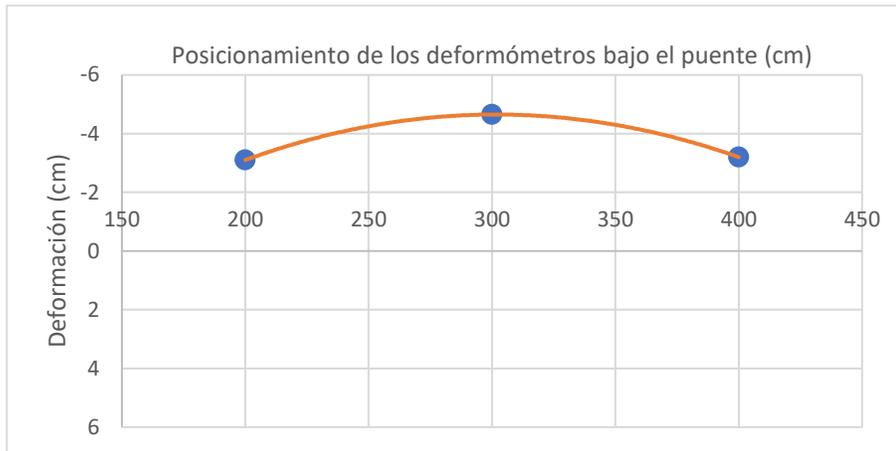
Fuente: elaboración propia.

Figura 29. **Gráfica de recuperación del puente a 3 toneladas de carga**



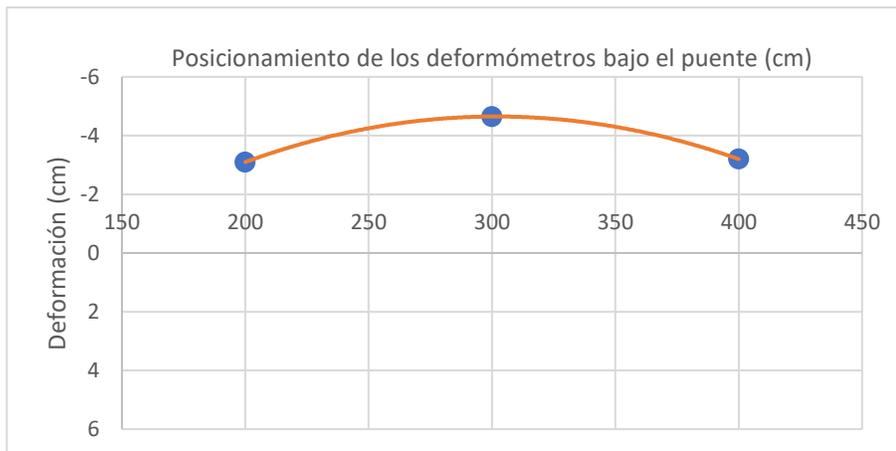
Fuente: elaboración propia.

Figura 30. **Gráfica de recuperación del puente a 2,5 toneladas de carga**



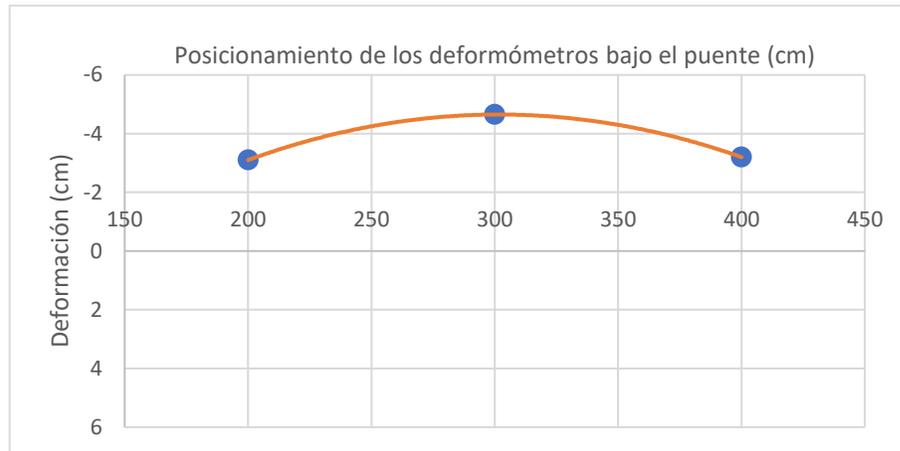
Fuente: elaboración propia.

Figura 31. **Gráfica de recuperación del puente a 2 toneladas de carga**



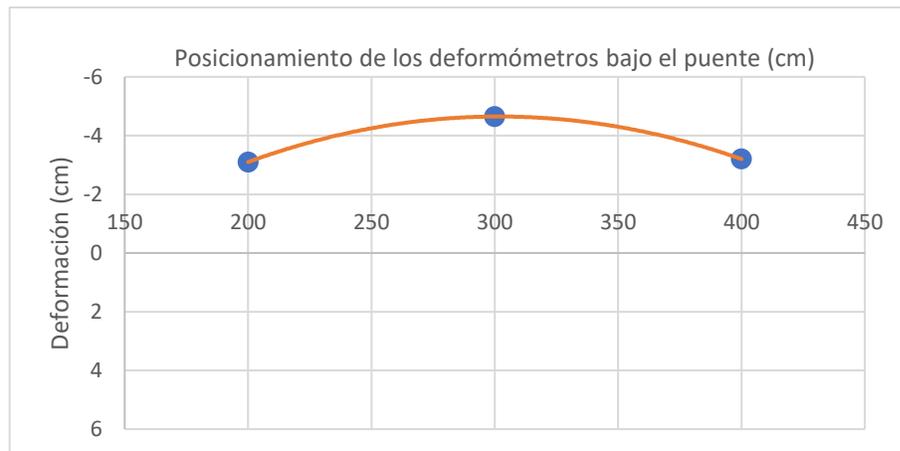
Fuente: elaboración propia.

Figura 32. **Gráfica de recuperación del puente a 1,5 toneladas de carga**



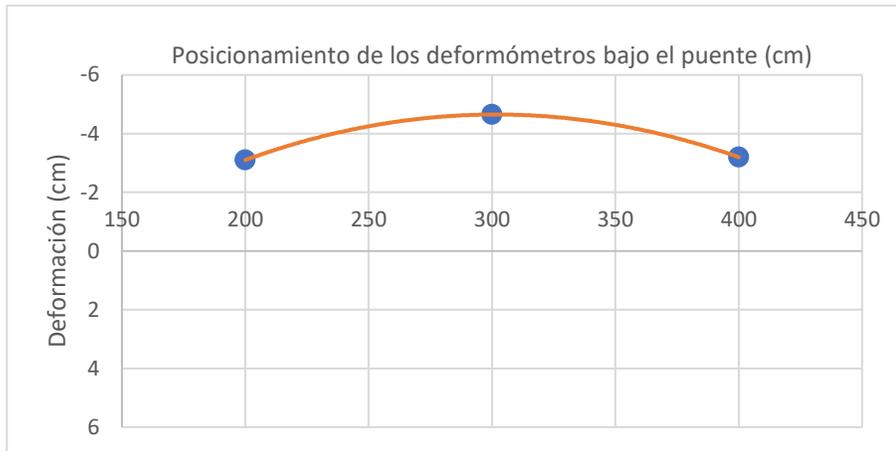
Fuente: elaboración propia.

Figura 33. **Gráfica de recuperación del puente a 1 tonelada de carga**



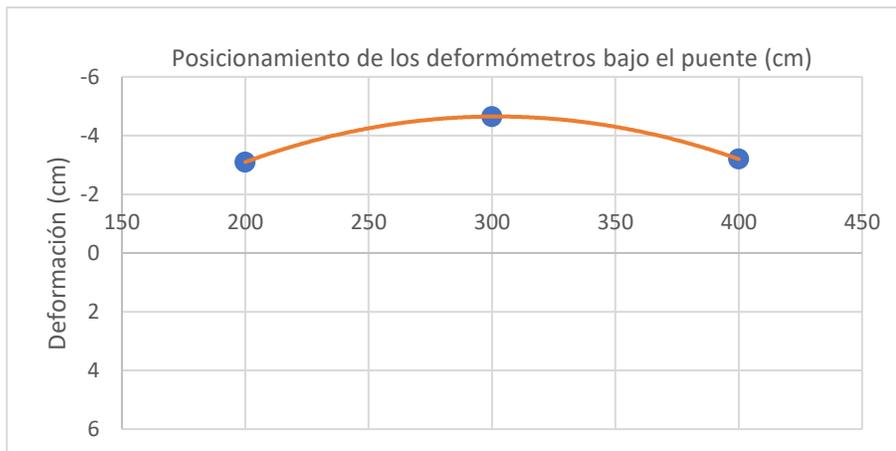
Fuente: elaboración propia.

Figura 34. **Gráfica de recuperación del puente a 0,5 toneladas de carga**



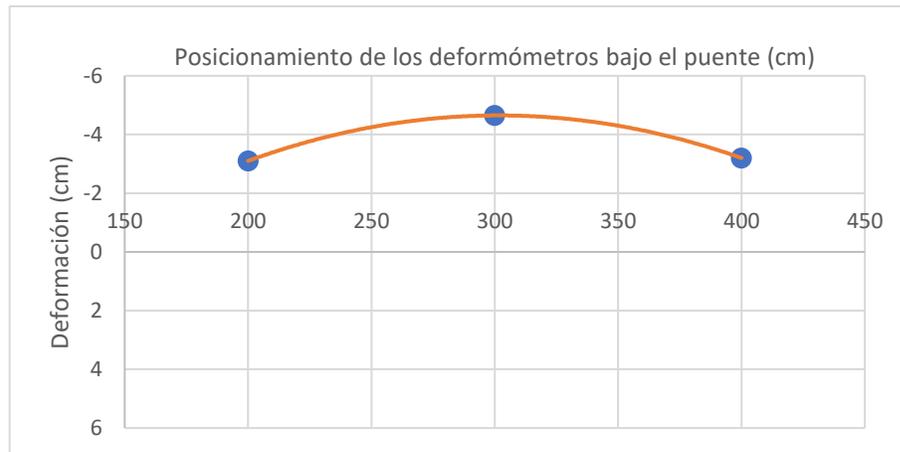
Fuente: elaboración propia.

Figura 35. **Gráfica de recuperación instantánea del puente sin carga**



Fuente: elaboración propia.

Figura 36. **Gráfica de recuperación del puente sin carga pasado 24 horas**



Fuente: elaboración propia.

A continuación, se muestran los resultados del segundo ciclo con carga de fatiga para el puente, registrados a cada media tonelada de carga.

Tabla IX. **Lecturas en deformómetros del segundo ciclo de carga medidas en centímetros**

Carga (toneladas)	Deformómetro a 1/3 (cm)	Deformómetro al centro (cm)	Deformómetro al centro (cm)	Deformómetro a 2/3 (cm)
0	101,8	12,35	4,2	61,7
0,5	102,2	12,8	4,8	61,8
1	102,4	13,2	5,3	62,1
1,5	103,1	13,8	5,8	62,4
2	103,3	14,2	6,2	62,7
2,5	103,6	14,7	6,7	63,15
3	104,0	15,2	7,2	63,5
3,5	104,4	15,7	7,6	63,9
3,6	104,5	15,8	7,7	64,0

Fuente: elaboración propia.

Con los datos obtenidos por medio de las lecturas de los deformómetros, se procede a realizar los cálculos de deformación en función a la carga, de acuerdo a la ecuación 11.

Tabla X. **Deformaciones en el puente en función a la carga en segundo ciclo**

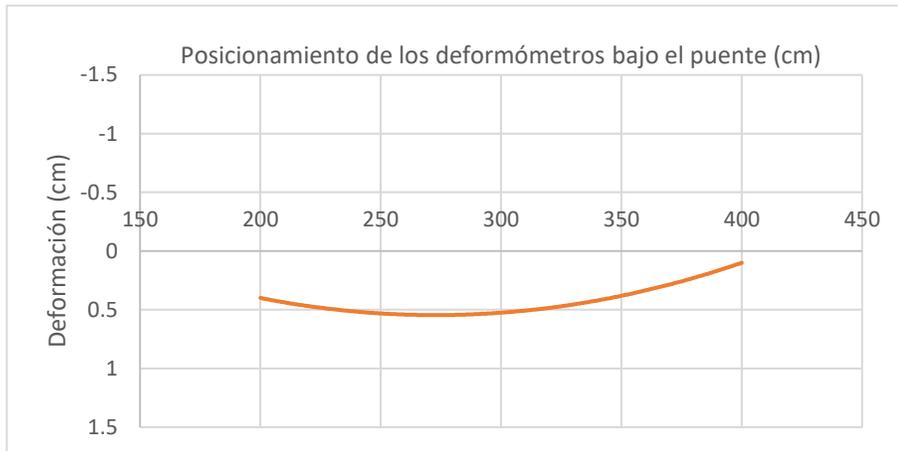
Carga (toneladas)	$\Delta y$ (l/3)	$\Delta y$ al centro	$\Delta y$ al centro	$\Delta y$ (2l/3)	$\Delta y$ promedio al centro
0,5	0,4	0,45	0,6	0,1	0,525
1	0,6	0,85	1,1	0,4	0,975
1,5	1,3	1,45	1,6	0,7	1,525
2	1,5	1,85	2	1	1,925
2,5	1,8	2,35	2,5	1,45	2,425
3	2,2	2,85	3	1,8	2,925
3,5	2,6	3,35	3,4	2,2	3,375
3,6	2,7	3,45	3,5	2,3	3,475

Fuente: elaboración propia.

Con la obtención de las deformaciones y al saber la localización de los deformómetros, es posible realizar las gráficas correspondientes para una apreciación de lo que sucede en la estructura con respecto a las variaciones de carga.

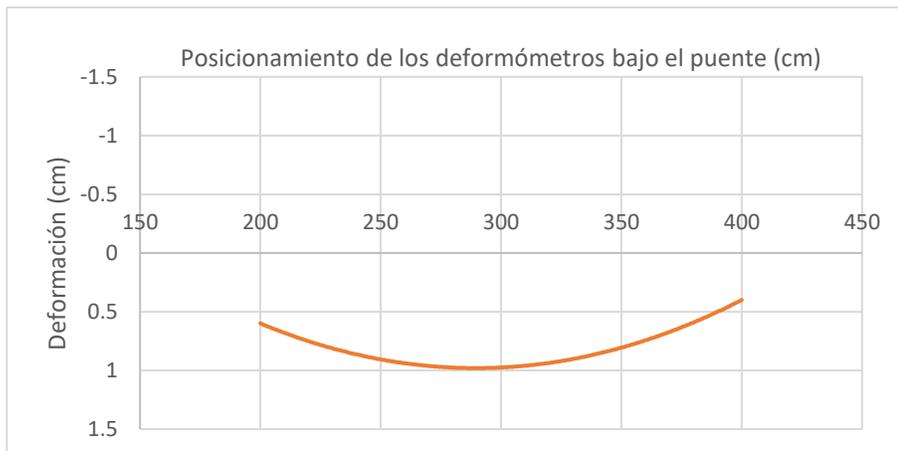
Tanto el eje de posicionamiento de los deformómetros como el eje de la deformación se mostrarán en centímetros. El cambio de escala en relación a los dos ejes es inminente para mostrar una mejor visualización, aunque de manera exagerada, de su deformación. Para tener todavía un mejor concepto de la deformación del puente, se colocará el eje de la deformación en orden inverso, con el motivo de tener una línea de tendencia de deformación semejante a la realidad.

Figura 37. **Gráfica de deformación del puente a 0,5 toneladas de carga**



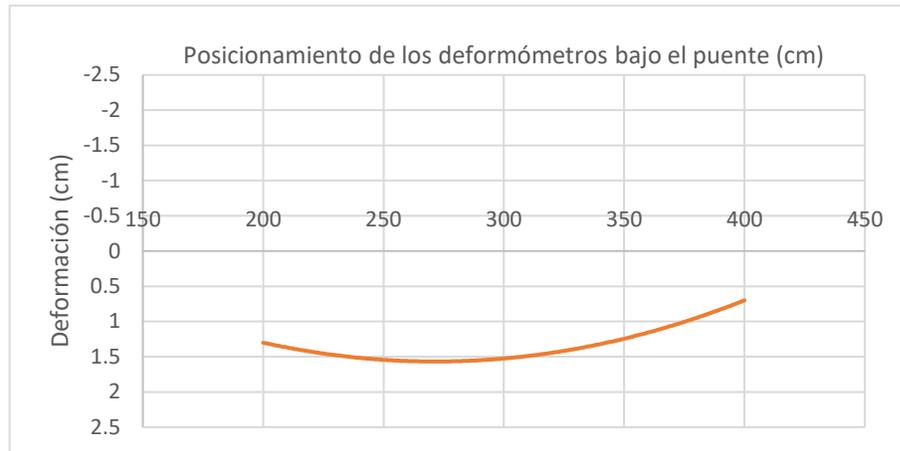
Fuente: elaboración propia.

Figura 38. **Gráfica de deformación del puente a 1 tonelada de carga**



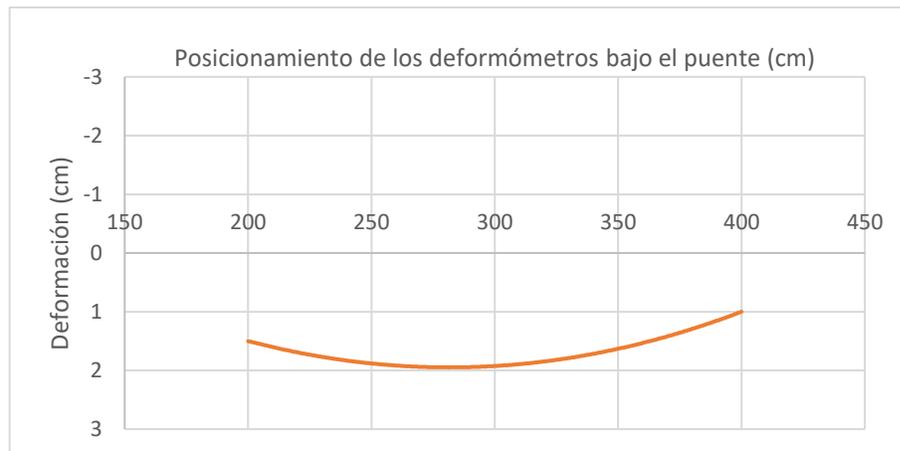
Fuente: elaboración propia.

Figura 39. **Gráfica de deformación del puente a 1,5 toneladas de carga**



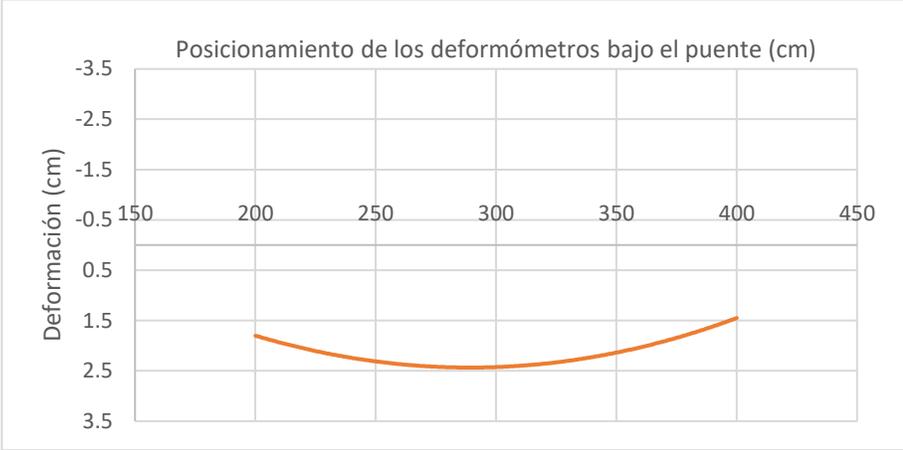
Fuente: elaboración propia.

Figura 40. **Gráfica de deformación del puente a 2 toneladas de carga**



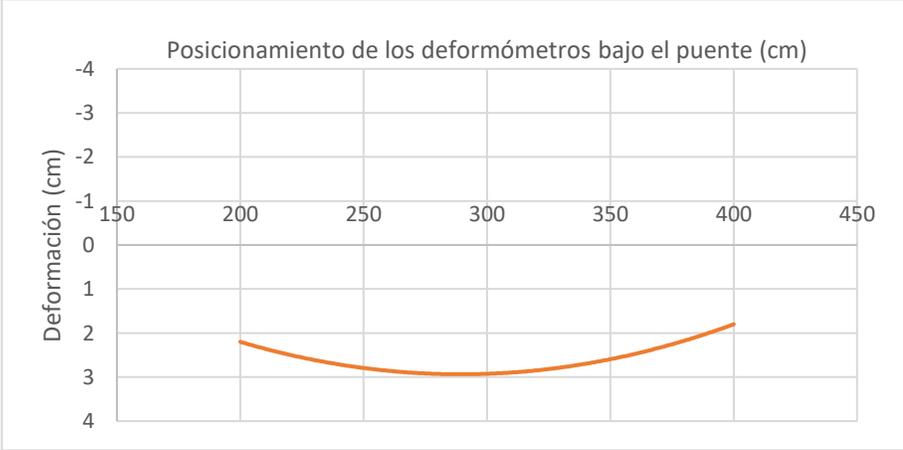
Fuente: elaboración propia.

Figura 41. **Gráfica de deformación del puente a 2,5 toneladas de carga**



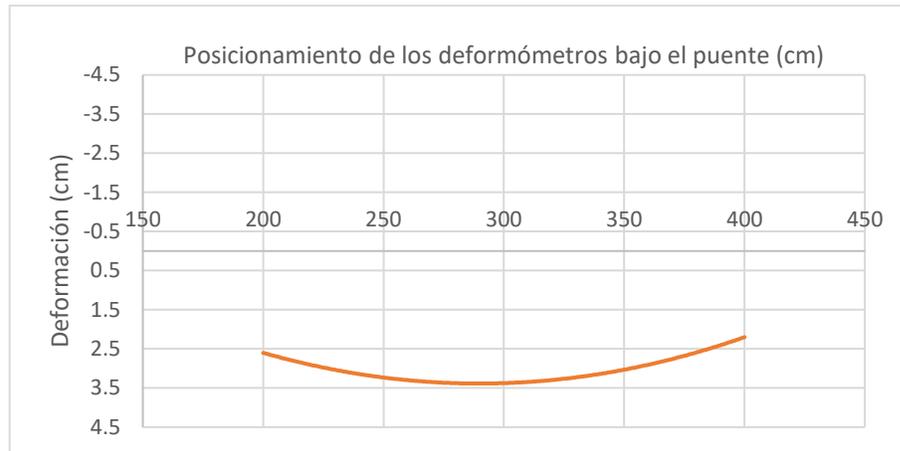
Fuente: elaboración propia.

Figura 42. **Gráfica de deformación del puente a 3 toneladas de carga**



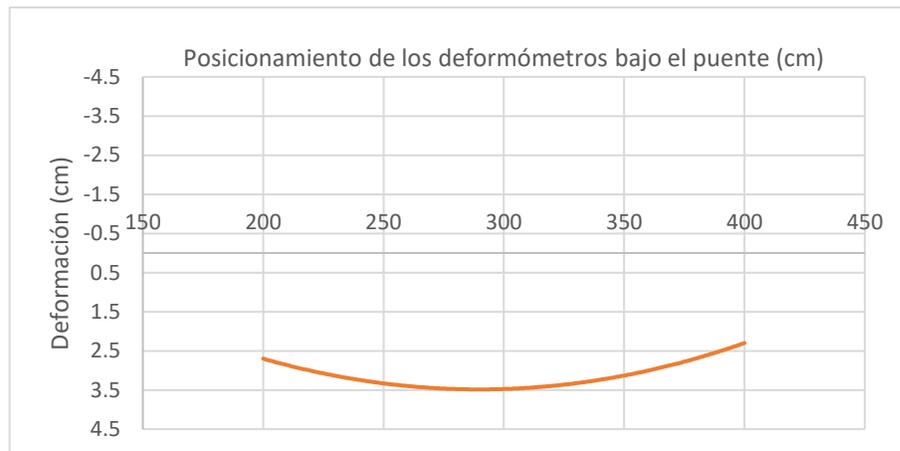
Fuente: elaboración propia.

Figura 43. **Gráfica de deformación del puente a 3,5 toneladas de carga**



Fuente: elaboración propia.

Figura 44. **Gráfica de deformación del puente a 3,6 toneladas de carga**



Fuente: elaboración propia.

Las gráficas mostradas anteriormente demuestran nuevamente que existe una deformación uniforme en el puente cuando es sometido a carga.

A continuación, se muestran los datos de las lecturas en los deformómetros en el segundo proceso de descarga del puente bajo carga de fatiga, luego de 24 horas de sostenimiento continuo de la misma.

Tabla XI. **Lectura de los deformómetros en proceso de descarga del puente**

Carga (toneladas)	Deformómetro a 1/3 (cm)	Deformómetro al centro (cm)	Deformómetro al centro (cm)	Deformómetro a 2/3 (cm)
Inicial	101,8	12,35	4,2	61,7
3,6	104,4	16,0	8,0	64,1
3,0	104,2	15,8	7,7	64,0
2,5	104,0	15,6	7,5	63,8
2	103,8	15,2	7,2	63,6
1,5	103,4	14,8	6,8	63,3
1	103,0	14,4	6,4	62,9
0,5	102,5	13,8	5,9	62,5
0	102,0	13,2	5,2	61,9
0 toneladas 24horas después	101,8	13,1	5,0	61,8

Fuente: elaboración propia.

Al igual que se hizo anteriormente, se procederá a calcular las deformaciones con la ecuación 11.

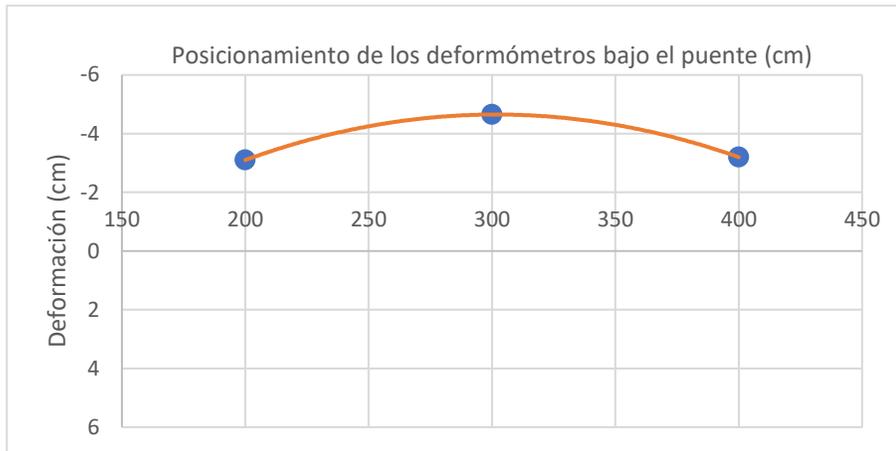
Tabla XII. **Deformaciones del puente al momento de descarga**

Carga (toneladas)	$\Delta y$ (l/3)	$\Delta y$ al centro	$\Delta y$ al centro	$\Delta y$ (2l/3)	$\Delta y$ promedio al centro
3,6	2,6	3,65	3,8	2,4	3,725
3	2,4	3,45	3,5	2,3	3,475
2,5	2,2	3,25	3,3	2,1	3,275
2	2	2,85	3	1,9	2,925
1,5	1,6	2,45	2,6	1,6	2,525
1	1,2	2,05	2,2	1,2	2,125
0,5	0,7	1,45	1,7	0,8	1,575
0	0,2	0,85	1	0,2	0,925
0 toneladas 24 horas después	0	0,75	0,8	0,1	0,775

Fuente: elaboración propia.

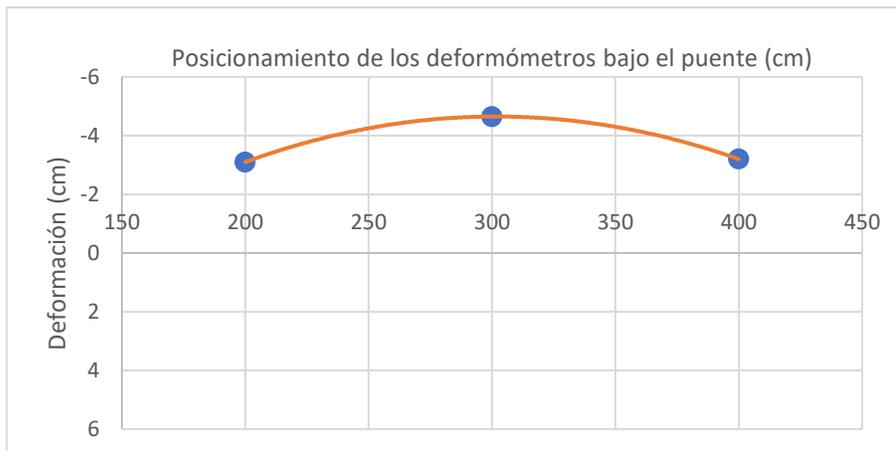
A partir de la sucesión de las gráficas se aprecia la forma en que el puente fue recuperando su estado con una tendencia a su posición inicial, luego del segundo ciclo de descarga de fatiga.

Figura 45. **Gráfica de recuperación del puente a 3,6 toneladas de carga**



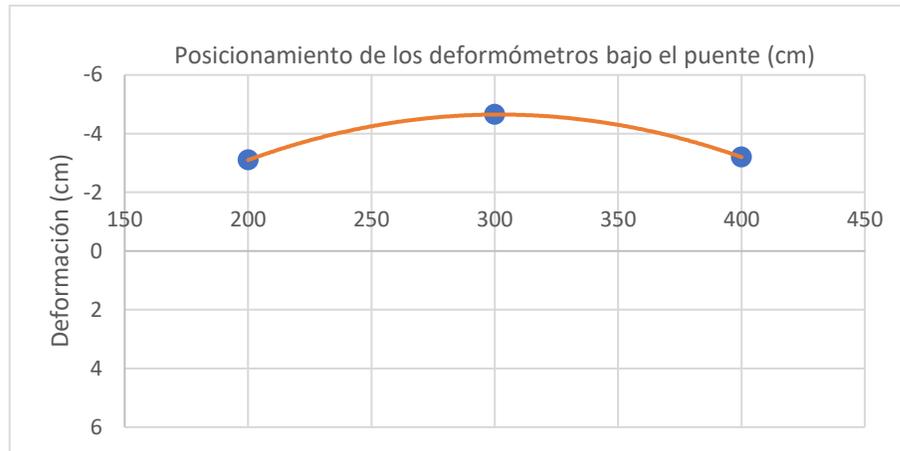
Fuente: elaboración propia.

Figura 46. **Gráfica de recuperación del puente a 3 toneladas de carga**



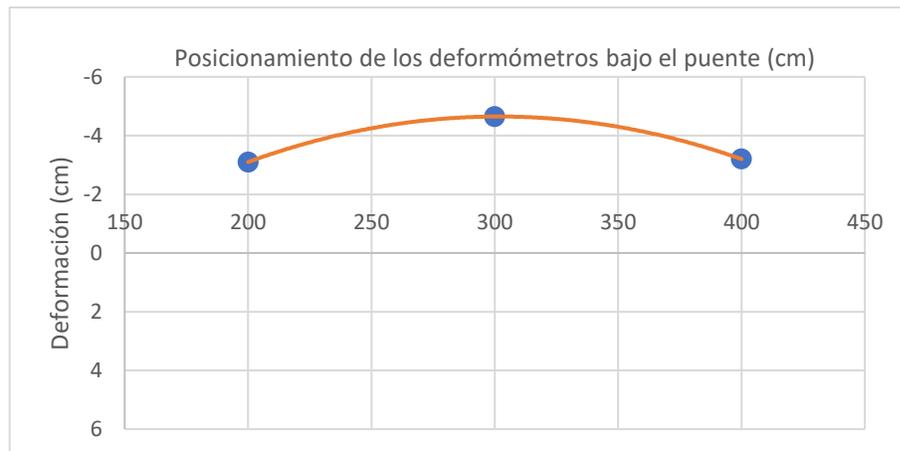
Fuente: elaboración propia.

Figura 47. **Gráfica de recuperación del puente a 2,5 toneladas de carga**



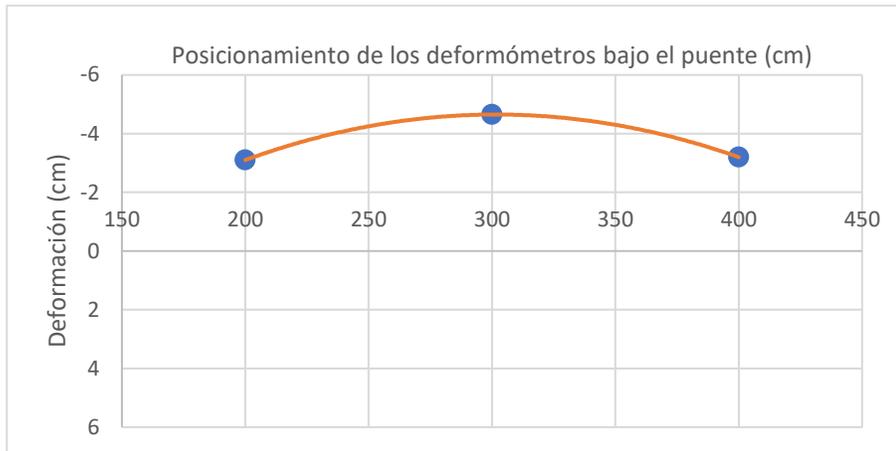
Fuente: elaboración propia.

Figura 48. **Gráfica de recuperación del puente a 2 toneladas de carga**



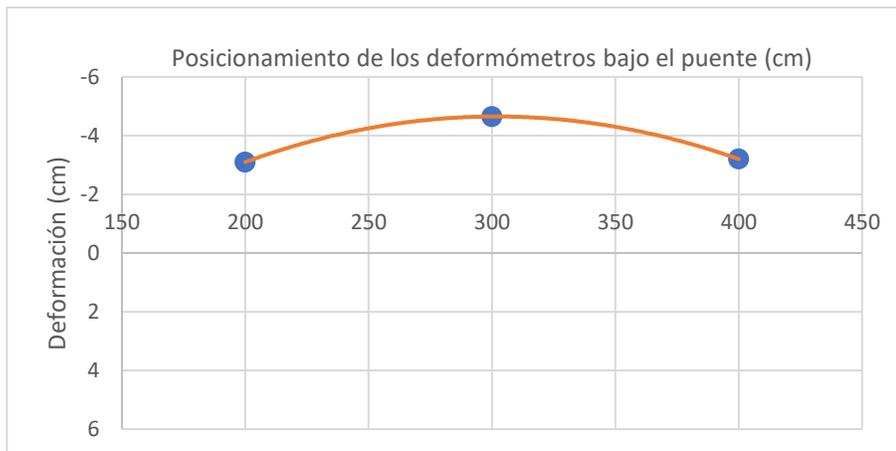
Fuente: elaboración propia.

Figura 49. **Gráfica de recuperación del puente a 1,5 toneladas de carga**



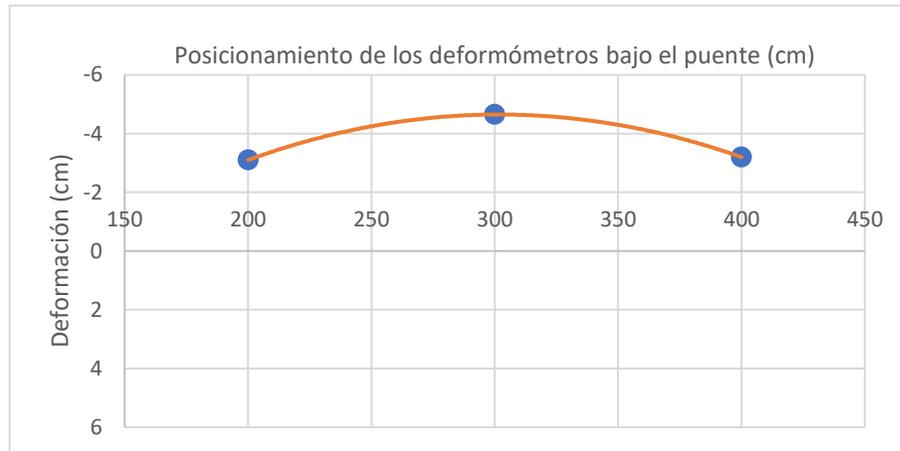
Fuente: elaboración propia.

Figura 50. **Gráfica de recuperación del puente a 1 tonelada de carga**



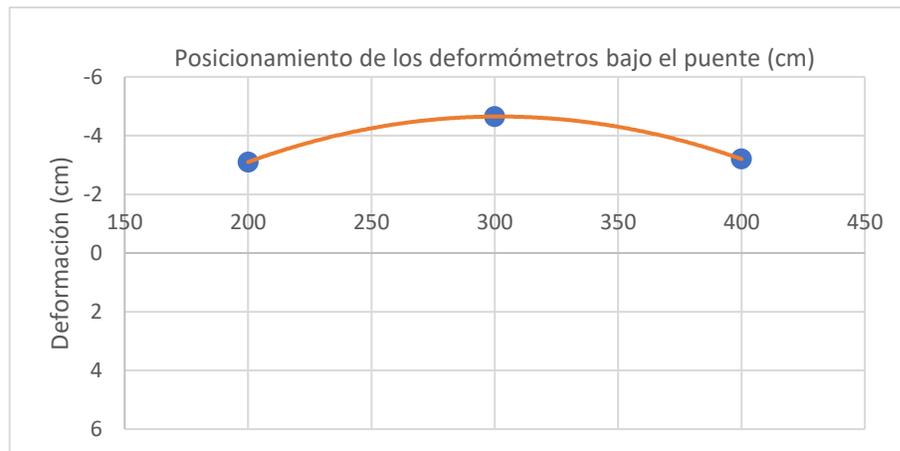
Fuente: elaboración propia.

Figura 51. **Gráfica de recuperación del puente a 0,5 toneladas de carga**



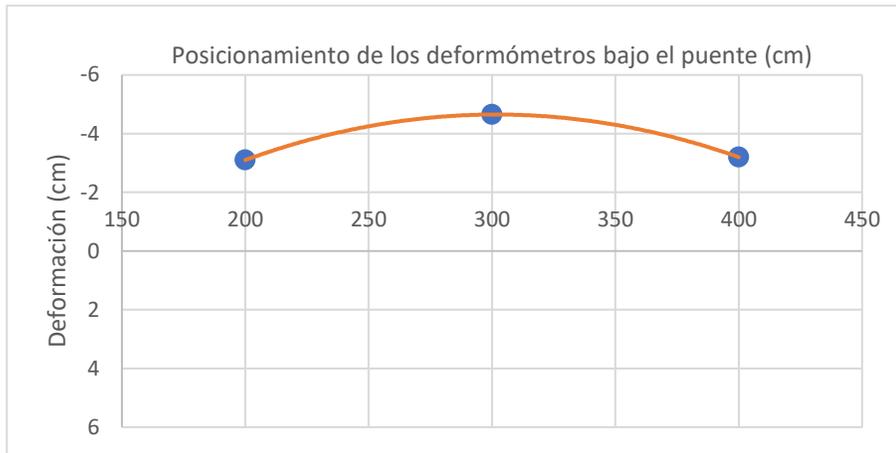
Fuente: elaboración propia.

Figura 52. **Gráfica de recuperación del puente sin carga**



Fuente: elaboración propia.

Figura 53. **Gráfica de recuperación del puente sin carga luego de 24 horas**



Fuente: elaboración propia.

## 9.2. Resultados de ensayo de puente sometido a carga masiva

A continuación, se muestra los datos de las lecturas tomadas del deformómetro ubicado al centro del puente. Las lecturas fueron tomadas con intervalos de una tonelada.

Tabla XIII. **Lecturas del deformómetro durante el ensayo**

Carga (toneladas)	Lectura de deformómetros (cm)
0	32,2
1	33,0
2	33,9
3	35,2
4	36,4
5	37,4
6	38,5

Fuente: elaboración propia.

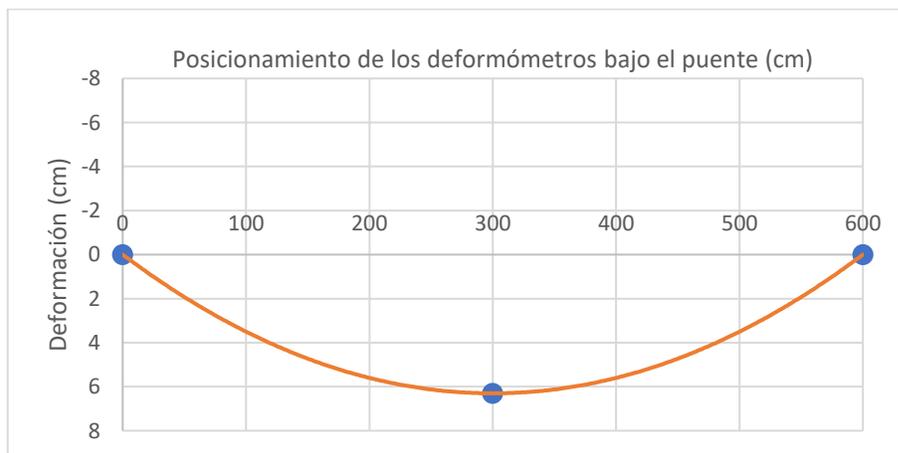
Al igual que se hizo anteriormente, se procederá a calcular las deformaciones con la ecuación 10.

Tabla XIV. **Deformaciones del puente durante el proceso de carga masiva**

Carga (toneladas)	Deformación (cm)
1	0,8
2	1,7
3	3
4	4,2
5	5,2
6	6,3

Fuente: elaboración propia.

Figura 54. **Gráfica de deformación a las 6 toneladas de carga**



Fuente: elaboración propia.

Debido a que se conoce el comportamiento de la estructura gracias al primer ensayo realizado con carga de fatiga, para este ensayo únicamente se utilizó un deformómetro, el cual se ubicó en el centro para conocer las deformaciones máximas en ese punto en función a la carga que se sometió el puente.

Es importante resaltar que, al momento de descarga del puente, luego de soportar 6,2 toneladas, este registró una deformación instantánea de 2,2 centímetros con respecto a su punto inicial. Luego de 24 horas después de realizada la descarga de 6,2 toneladas, la estructura registró una deformación de 0,6 centímetros con respecto a su punto inicial.

## 10. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 10.1. Análisis de los resultados teóricos

A continuación, se presenta una tabla resumen de los resultados teóricos de los esfuerzos a corte y flexión. Considerar que, para los resultados de las vigas principales aquí mostrados, se utilizó en el análisis y diseño estructural un diámetro de 8 " para las vigas secundarias como diámetro óptimo de diseño.

Tabla XV. Resumen de resultados de esfuerzos teóricos

Tipo de viga	Diámetro (")	Espesor [t] (cm)	Esfuerzo a flexión (Mpa)	Esfuerzo a corte (Mpa)
Secundaria	10	1,70	2,62	0,19
Secundaria	9	1,55	3,56	0,23
Secundaria	8	1,40	4,99	0,30
Secundaria	7	1,20	7,55	0,38
Principal	10	2,00	4,58	0,20
Principal	9	1,55	6,97	0,24

Fuente: elaboración propia.

Es importante recordar que los valores permisibles según la norma peruana E100 bambú para esfuerzo a flexión y esfuerzo a corte son cinco y un mega pascales, respectivamente, utilizando la especie de bambú *Guadua Angustifolia*.

Para la viga secundaria, con un diámetro de 10 pulgadas y un espesor mínimo en la punta de la caña de 1,70 centímetros, presenta esfuerzos admisibles tanto a flexión como a corte; sin embargo, puede considerarse como un sobredimensionamiento en la estructura, lo cual aportaría un valor de carga muerta más alto y menor facilidad de manejo en los elementos, cuando a construcción se refiere.

Sin embargo, como se demostró en los cálculos, aun utilizando el diámetro de 10" para las vigas secundarias, a pesar de aportar más carga para las vigas principales, el esfuerzo teórico a flexión obtenido para la viga principal resulta permisible con un valor de 4,75 Mpa. Son estas vigas las que soportan los esfuerzos más críticos.

Como se observa en la tabla resumen mostrada, para las vigas secundarias el esfuerzo a flexión teórico obtenido de 2,62 Mpa y el esfuerzo teórico a corte de 0,19 Mpa a un diámetro de 10", lo cual queda bastante distante de los límites de permisibilidad. Da la idea que podría reducirse el diámetro hasta determinar uno que sea óptimo en cuanto a los límites permitidos.

Se determinó que el diámetro óptimo para las vigas secundarias es de 8" utilizando la especie de bambú *Guadua Angustifolia*, presentando esfuerzos dentro del límite de permisibilidad de 4,99 Mpa y 0,30 Mpa para esfuerzos teóricos de flexión y corte, respectivamente.

Como se observa en los cálculos, al obtener resultados justo en el límite de permisibilidad, al momento de reducir el diámetro a 7" era de esperarse que los resultados de los esfuerzos teóricos no quedasen dentro del límite permisible. Los resultados fueron de 7,55 Mpa y 0,38 Mpa para esfuerzos teóricos de flexión y corte, respectivamente.

De acuerdo con el mismo análisis y diseño estructural que se siguió, si se quisiese utilizar un diámetro de 7" en vigas secundarias, habría que contar con un espesor de pared de la caña de al menos 2,15 centímetros, condiciones que sería muy raro encontrar en la naturaleza para la especie de *Guadua Angustifolia*.

Es por ese análisis que se puede demostrar la importancia del espesor de pared de las cañas, ya que esto favorecería el aumento del módulo de sección, de la inercia del elemento y ayudaría a disminuir la magnitud de los esfuerzos actuantes en las vigas.

Basado en lo anterior, considerando 8" el diámetro de las vigas secundarias con un espesor de pared de al menos 1,40 centímetros, condiciones que sí se encuentran en la especie de *Guadua Angustifolia*, se establece como el diámetro óptimo para el este elemento.

Luego de determinar el diámetro óptimo de diseño para las vigas secundarias, se realizó el análisis y diseño estructural de las vigas principales con un diámetro de 10" y al menos 2 centímetros de espesor. Se obtuvo como resultado 4,58 Mpa y 0,20 Mpa para los esfuerzos teóricos de flexión y corte, respectivamente. Debido a que las vigas principales son los elementos que soportan los esfuerzos más críticos, podía intuirse que al reducir el diámetro a 9", los esfuerzos teóricos quedarían fuera de lo permitido.

Sin embargo, se procedió a calcular los esfuerzos para obtener pruebas teóricas, lo que dio como resultado 6,97 Mpa y 0,24 Mpa para los esfuerzos teóricos de flexión y corte. Se confirmó de esta manera que el diámetro óptimo para las vigas principales es de 10".

Puede observarse que el esfuerzo a flexión es el más crítico en los elementos. Aunque en todos los casos mostrados el esfuerzo a corte siempre fue permisible, no pueden considerarse como aptos para la construcción del modelo del puente propuesto aquellos elementos donde únicamente el esfuerzo a corte fue permisible, ya que, si se tomaran en consideración, esto pondría en riesgo la funcionalidad de la estructura, y la seguridad de los usuarios.

## 10.2. Análisis de los resultados de laboratorio

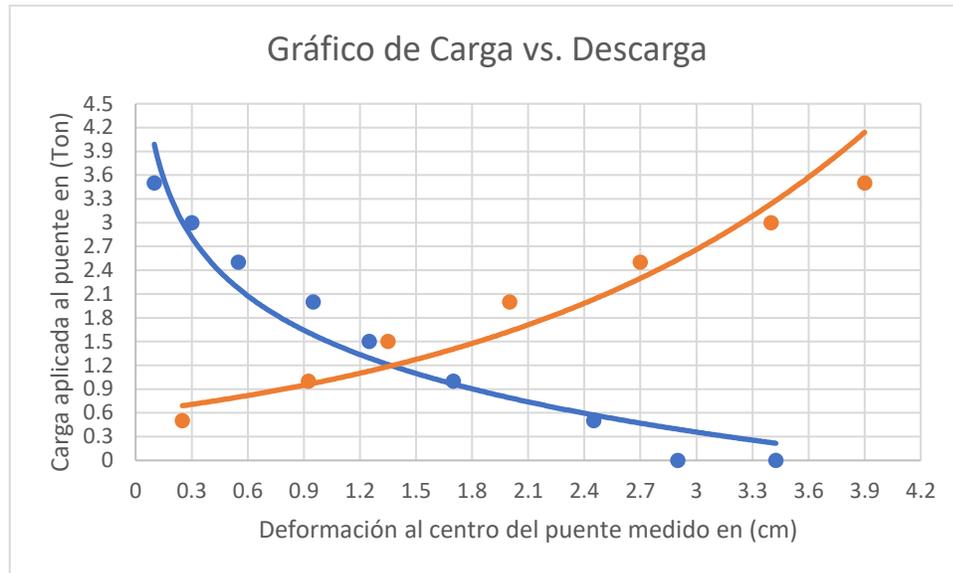
Considerando que a L/2 del puente se registran los esfuerzos, deformaciones máximas y mayor recuperación del puente debido a las cargas actuantes en la estructura, se realizó una gráfica carga vs deformación y carga vs recuperación en el mismo cuadrante, con el fin de realizar un análisis de lo sucedido en los ciclos de carga y descarga.

Tabla XVI. **Datos de deformómetro a L/2 en primer ciclo de carga y descarga**

Carga (Ton)	Deformación (cm)	Descarga (Ton)	Recuperación (cm)
0	0	3,5	0,1
0,5	0,25	3	0,3
1	0,93	2,5	0,55
1,5	1,35	2	0,95
2	2	1,5	1,25
2,5	2,7	1	1,7
3	3,4	0,5	2,45
3,5	3,9	0	2,9
		0 (24h después)	3,43

Fuente: elaboración propia.

Figura 55. **Gráfica de primer ciclo de carga y descarga en L/2**



Fuente: elaboración propia.

En el gráfico mostrado pueden observarse las curvas correspondientes al ciclo de carga y descarga. El de carga está marcado en color naranja y el de descarga, en color azul.

Puede apreciarse que el puente presentó una tendencia de deformación de 1cm al centro por cada tonelada de carga aplicada. Con esa tendencia de deformación uniforme, se demuestra que el modelo del puente propuesto presenta una buena distribución y buen dimensionamiento de los elementos.

Por otro lado, en cuanto al ciclo de descarga se refiere, pasadas 24 horas de realizado el ensayo el puente recuperó 3,43 cm de los 3,9 cm que se deformó, lo cual resulta una deformación por carga de fatiga de 0,47 cm luego de cargar 3,5 toneladas durante 24 horas continuas.

El punto de intersección entre las dos curvas de la gráfica se interpreta como la carga donde se producen los esfuerzos permisibles a nivel experimental, lo que da como resultado una carga de 1,2 toneladas según las curvas de tendencia trazadas. Se observa que realmente el punto de intersección ocurre en una carga de 1,5 toneladas y una deformación a L/2 de 1,25 cm.

De acuerdo con la norma peruana E100 bambú, la deformación admisible debe ser como máximo 1,3 cm. Según la Guía de especificaciones para puentes peatonales de AASHTO, la deformación admisible debe ser de L/500. Para este diseño es de 1,2 cm. Partiendo de lo anterior, se considera, para este estudio, el resultado de la deformación experimental como un valor admisible.

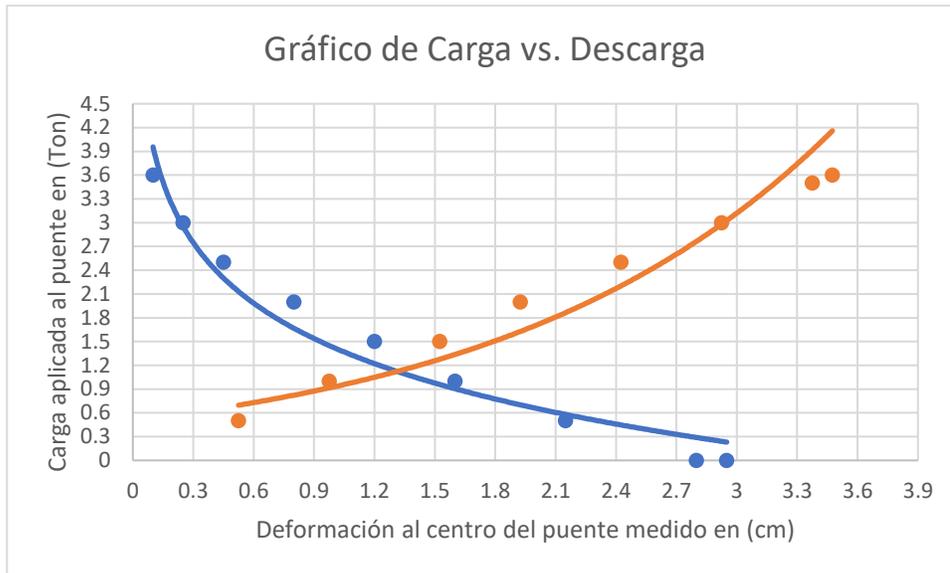
De la misma manera que se hizo en el primer ciclo de carga y descarga, se realizó una gráfica carga vs deformación y carga vs recuperación en el mismo cuadrante.

Tabla XVII. **Datos de deformómetro a L/2 en segundo ciclo de carga y descarga**

Carga (Ton)	Deformación (cm)	Descarga (Ton)	Recuperación (cm)
0,5	0,53	3,6	0,1
1	0,98	3	0,25
1,5	1,53	2,5	0,45
2	1,93	2	0,8
2,5	2,43	1,5	1,2
3	2,93	1	1,6
3,5	3,38	0,5	2,15
3,6	3,48	0	2,8
		0 (24h después)	2,95

Fuente: elaboración propia.

Figura 56. **Gráfica de primer ciclo de carga y descarga en L/2**



Fuente: elaboración propia.

En el gráfico anterior se observa las líneas de tendencia de los datos correspondientes al ciclo de carga y descarga. El de carga está marcado en color naranja y el de descarga, en color azul.

Al igual que sucedió en el primer ciclo de carga, puede apreciarse en el segundo ciclo que el puente presentó una tendencia de deformación de 1cm al centro por cada tonelada de carga aplicada. Se demuestra una tendencia de deformación uniforme y confirma que el modelo del puente propuesto presenta buena distribución y un dimensionamiento adecuado de los elementos.

Por otro lado, en cuanto al ciclo de descarga se refiere, pasadas 24 horas de realizado el ensayo, el puente recuperó 2,95 cm de los 3,48 cm que se deformó, lo cual resulta una deformación por carga de fatiga de 0,53 cm luego de cargar 3,6 toneladas durante 24 horas continuas.

Como se esperaba, el segundo ciclo de carga vs descarga presentó mayor deformación a causa de la carga de fatiga, de 0,53 cm, 6 mm más que lo obtenido en el primer ciclo.

El punto de intersección entre las dos curvas de la gráfica se interpreta como la carga donde se producen los esfuerzos permisibles a nivel experimental, dando como resultado una carga de 1,2 toneladas según las curvas de tendencia trazadas, y una deformación a L/2 de 1,25 cm.

Como se mencionó, de acuerdo con la norma peruana E100 bambú, la deformación admisible debe ser como máximo 1,3 cm. Según la Guía de especificaciones para puentes peatonales de AASHTO, la deformación admisible debe ser de L/500, para este diseño fue de 1,2 cm. Partiendo de lo anterior, se considera que, para este estudio, el resultado de la deformación experimental tiene un valor admisible.



## **11. GUÍA PARA LA ELABORACIÓN DE PUENTE PEATONAL DE BAMBÚ**

Con el objetivo de que cualquier comunidad en donde se cuente con la materia prima apropiada y las herramientas adecuadas pueda construir un puente peatonal de bambú como se diseñó en este trabajo, se realizó esta guía de fácil comprensión para uso de los interesados. No es el único método para construir el modelo. De cualquier manera, se recomienda que la distribución de los elementos estructurales sea la misma a la que se propuso en diseño para que los resultados de laboratorio sean correspondidos a lo construido.

### **11.1. Herramienta y equipo**

Para la construcción de cualquier estructura es de suma importancia contar con la herramienta y equipo adecuado, tanto manual como mecánico, que asegure tanto un buen desempeño durante la construcción como la seguridad de quienes participan en ella.

#### **11.1.1. Equipo de protección personal**

El equipo de protección personal puede ser compuesto por dispositivos, materiales e indumentaria personal destinados a cada trabajador, para protegerlo de uno o varios riesgos presentes en el área de trabajo que puedan amenazar su seguridad y salud. Es importante resaltar que el equipo de protección personal no elimina los riesgos: es un complemento a la protección; por lo tanto, se recomienda que se gestionen los riesgos presentes para disminuir la probabilidad de un accidente en el área de trabajo.

- Guantes: su uso durante toda la construcción del puente es muy importante, ya que protegen las manos durante la manipulación del bambú y el uso de herramientas como el machete, sierras de mano, manipulación de sierra sable entre otros.

Figura 57. **Guantes de protección**



Fuente: Senyals. *Guantes de protección*. <http://www.senyals.com>. Consulta: 19 de junio de 2019.

- Casco: durante la construcción se presentan situaciones donde la manipulación de elementos pesados alzados en el aire presenta un riesgo en caída, donde un golpe en la cabeza podría ser letal. La utilización del casco es de suma importancia ya que, en caso de un golpe en la cabeza, este reduce la gravedad de la consecuencia y brinda seguridad al usuario.

Figura 58. **Casco de protección**



Fuente: Kleintools. *Casco de protección*. <http://www.kleintools.com.mx>. Consulta: 19 de junio de 2019.

- Calzado: la manipulación y el movimiento constante del material durante el desarrollo del proyecto es inevitable. Debido a esto se presenta un riesgo constante de caída de una caña de bambú, la cual podría impactar directamente en los pies. Por el peso propio del material, un golpe en los pies podría ser muy doloroso y quizá causar algún tipo de lesión. Por tanto, se recomienda el uso de calzado industrial con punta de acero, que protegerá a la perfección los pies sin riesgo de alguna lesión. Además, la suela de este tipo de calzado evita que clavos o algún tipo de herramienta corto punzante se introduzca por debajo, evitando algún tipo de corte en los pies.

Figura 59. **Calzado industrial**



Fuente: Vidri. *Calzado industrial*. <http://www.vidri.com.sv>. Consulta: 19 de junio de 2019.

- Lentes: la actividad durante el corte de una pieza de bambú o durante el trabajo de esterilla con machete y hacha pueden ocasionar que fibras o trozos pequeños de bambú reviren de las cañas al momento de producir un impacto o corte con las herramientas mencionadas. El riesgo de que un trozo pequeño de material pueda introducirse por los ojos es potencialmente alto, así que el uso de los lentes de protección es indispensable para proteger la vista.

Figura 60. **Lentes de protección**



Fuente: Safetydepot. *Lentes de protección*. <http://www.safetydepot.com.mx>. Consulta: 19 de junio de 2019.

- **Mascarilla:** durante el proceso de cortes de bambú e incluso el corte de los pernos de hierro galvanizado se desprenden pequeñas partículas de los materiales, y pueden ser dañinas para el sistema respiratorio. Esto podría presentar complicaciones para respirar si las cantidades de inhalación de estos residuos es excesiva. El uso de mascarilla durante el proceso de corte debe ser obligatorio para evitar cualquier tipo de complicaciones en la salud.

Figura 61. **Mascarilla de protección**



Fuente: Cesco. *Mascarilla de protección*. <http://www.cesco.es>. Consulta: 19 de junio de 2019.

Adicional al equipo de seguridad mencionado, se recomienda trabajar con camisa de mangas largas y pantalón de lona, ya que este tipo de indumentaria puede ayudar proteger de cualquier corte en brazos o piernas. También se recomienda, como medida de seguridad, revisar que el equipo por utilizar se encuentre en buenas condiciones para garantizar que cumpla su función de proteger y brindar seguridad. De igual manera se recomienda que la herramienta se encuentre en óptimas condiciones, ya que esto disminuye el riesgo de cualquier accidente durante las actividades.

### **11.1.2. Herramienta**

Las herramientas son todos los utensilios que ayudan a mejorar la capacidad de realizar tareas, facilitando el proceso de la construcción. En este caso, podemos encontrar diferentes actividades tales como cortes, perforaciones o montajes, por mencionar algunas. A continuación, se nombran las herramientas que pueden ser de utilidad para el proceso de construcción.

- Llave fija combinada: es un tipo de llave que posee una boca abierta y la otra cerrada en sus extremos, respectivamente. Sus aperturas variadas en los extremos permiten facilidad de trabajo según la necesidad que se presente durante un ensamblaje. Por el tipo de perno y tuerca que se utilizará durante la construcción del puente, se recomienda tener llaves número 14 para las tuercas de 3/8 " y llaves número 13 para las tuercas de 5/16 ".

Figura 62. **Llave fija combinada**



Fuente: Cadena88. *Llave fija combinada*. <http://www.cadena88.com>. Consulta: 19 de junio de 2019.

- Sierra: se utiliza para realizar cortes. En este caso servirá para los pernos; gracias a su peso ligero es fácil manipularla y de gran utilidad.

Figura 63. **Sierra de mano con arco**



Fuente: Espacio-industria. *Sierra de mano*. <http://www.espacio-industria.com>. Consulta: 19 de junio de 2019.

- Machete: permite realizar cortes de un solo golpe. Será de mucha ayuda para trabajar en el proceso de la esterilla.

Figura 64. **Machete**



Fuente: Grainger. *Machete*. <http://www.grainger.com.mx>. Consulta: 19 de junio de 2019.

- Hacha: será utilizada durante el proceso del trabajo con esterilla. Permite realizar cortes que requieran mayor fuerza.

Figura 65. **Hacha**



Fuente: Roviraferreteria. *Hacha*. <http://www.roviraferreteria-suministros.com>. Consulta: 19 de junio de 2019.

- Barreno: es una herramienta esencial para el desarrollo del proyecto. Con este se realizan perforaciones en el bambú para insertar pernos que formen conexiones y ensamblajes entre los elementos estructurales. Las brocas por utilizar con el barreno son especiales para acero o para madera, con las medidas de los pernos correspondientes; en este caso, de 5/16" y de 3/8". Una broca para concreto es inútil en este caso, debido a que no perfora el bambú.

Figura 66. **Barreno**



Fuente: CELASA. *Barreno*. <http://www.celasa.com.gt>. Consulta: 19 de junio de 2019.

- Sierra tipo sable: es esencial para realizar cortes rápidos y de gran precisión. Facilita el trabajo enormemente y brinda una optimización en la tarea de manera efectiva. Es útil para realizar cortes con forma de boca de pescado, mismos que se implementarán en los postes de la baranda, o bien para realizar cortes en las cañas de bambú a la medida que se necesite.

Figura 67. **Sierra tipo sable**



Fuente: Superchollos. *Sierra tipo sable*. <http://www.superchollos.online>. Consulta: 19 de junio de 2019.

- Clavadora neumática: es de mucha utilidad ya que, en cuestión de segundos, permite insertar una cantidad grande de clavos. Será de gran ayuda durante el proceso de colocación de la esterilla. Es importante contar con un compresor para utilizar esta herramienta. De forma alternativa puede trabajarse con ayuda de un martillo, pero el proceso de esta manera resulta sin duda mucho más tardado y laborioso.

Figura 68. **Clavadora neumática**



Fuente: Lideresa. *Clavadora neumática*. <http://www.lidersa.com>. Consulta: 19 de junio de 2019.

- Flexómetro: es una herramienta básica que no puede hacer falta durante la construcción del puente. Debido a las distancias a considerar en este proyecto, se recomienda contar con un metro plegable que alcance 8 metros de longitud para mayor facilidad en la toma de mediciones.

Figura 69. **Flexómetro**



Fuente: Bricolemar. *Flexómetro*. <http://www.bricolemar.com>. Consulta: 19 de junio de 2019.

Con lo anterior no se pretende limitar únicamente el uso de las herramientas mencionadas. El objetivo es dar una lista de herramientas mínimas que pueden ser de utilidad para la construcción del puente.

## 11.2. Selección de materia prima

A continuación, se presentan consideraciones importantes para la selección de la materia prima. Factores importantes a tomar en cuenta ya que favorecerá a que la estructura del puente se comporte estructuralmente de manera similar a lo estudiado.

### 11.2.1. Bambú

La selección del bambú es un tema muy importante a tomar en consideración, por lo que se recomienda atender a los criterios que se mencionan a continuación. Para que el comportamiento de la estructura sea similar al estudiado en esta investigación, debe seleccionarse bambú de la especie *Dendrocalamus Asper*, comúnmente conocida como *Asper*, ya que esta especie fue la utilizada para la estructura del proyecto. Como segundo punto, se debe seleccionar los diámetros especificados en la propuesta de armado, ya que estos influyen en el comportamiento de la estructura. Es importante no seleccionar bambú que tenga agujeros hechos por insectos o que presente pudrición. Para facilidad de ensamblaje y mejor comportamiento del material, se recomienda que los culmos de las cañas se encuentren lo más rectos posible.

Figura 70. **Bambú seleccionado para los puentes**



Fuente: Sección de materiales prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

### 11.2.2. Anclajes

El anclaje en este tipo de estructuras es muy similar como se hace con las estructuras de acero. Los puentes construidos para esta investigación llevan pernos roscados de hierro galvanizado con tuerca y roldana del mismo material. El diámetro de los anclajes se especifica más adelante, según el tipo de elementos que vaya a ensamblarse.

Figura 71. **Varilla de hierro galvanizado**



Fuente: Indasa. *Varilla de hierro galvanizado*. <http://www.indasa.com.mx>. Consulta: 19 de junio de 2019.

Figura 72. **Tuerca hexagonal de hierro galvanizado**



Fuente: Magnosphere. *Tuerca hexagonal*. <http://www.magnosphere.es>. Consulta: 19 de junio de 2019.

Figura 73. **Roldana plana de hierro galvanizado**



Fuente: Grupoferreterocho. *Roldana plana*. <http://www.grupoferreterocho.com.mx>. Consulta: 19 de junio de 2019.

### **11.3. Lista de materiales**

En la tabla XVIII se muestra una lista de los elementos de bambú a utilizar en la construcción del puente. Se identifica para qué elementos servirán las cañas, su diámetro, cantidad, longitud y material.

Tabla XVIII. **Lista de materiales para puente peatonal**

No.	Descripción	Cantidad	Material	Diámetro
1	Viga principal	8 cañas de 6.5m c/u	<i>D. Asper</i>	6 "
2	Viga secundaria	9 cañas de 3m c/u	<i>D. Asper</i>	5 "
3	Esterilla de 3 capas	15 cañas de 6m c/u	<i>D. Asper</i>	5 "
4	Poste vertical de baranda	10 cañas de 1.65m c/u	<i>D. Asper</i>	4 "
5	Larguero de baranda	2 cañas de 6m c/u	<i>D. Asper</i>	4 "
6	Poste diagonal de baranda	8 cañas de 1.9m c/u	<i>D. Asper</i>	4 "
7	Varilla roscada	8 varillas de 3m c/u	Hierro galvanizado	3/8 "
8	Varilla roscada	3 varillas de 3m c/u	Hierro galvanizado	5/16 "
9	Tuercas y roldanas	1 ciento	Hierro galvanizado	3/8 "
10	Tuercas y roldanas	1 ciento	Hierro galvanizado	5/16 "

Fuente: elaboración propia.

Como recomendación, se sugiere colocar varillas, tuercas y roldanas de aluminio, ya que soportan mejor la corrosión.

#### **11.4. Construcción del puente**

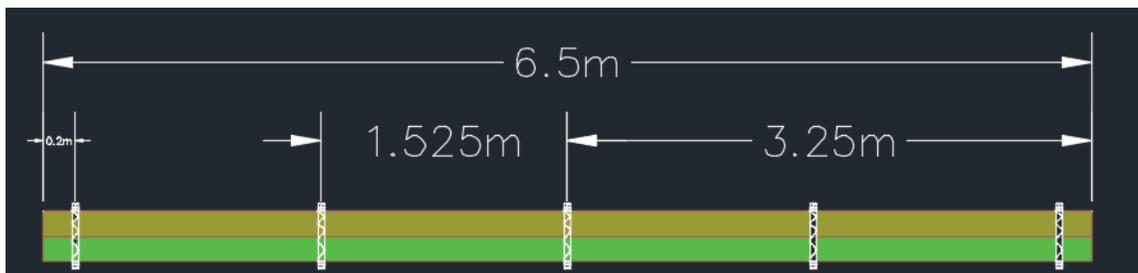
Una vez se haya definido el lugar de emplazamiento del puente, puede procederse a su construcción. Es importante identificar los elementos que forman

parte de la estructura y se nombran a continuación: vigas principales, vigas secundarias, tablero y baranda.

#### 11.4.1. Vigas principales

Las vigas principales del puente constan de dos cañas, cada una de 6,50 metros de longitud y 6 pulgadas de diámetro. Para emparejar las cañas se debe utilizar el barreno con la broca de 3/8". Los pernos deben quedar localizados a una distancia de  $L/4$ , donde  $L$  representa la luz libre entre apoyos de las cañas. Se recomienda que los pernos de los extremos queden localizados por lo menos 20 centímetros separados de los extremos y que las cañas terminen en nudo. De no ser posible ubicar un nudo en los extremos, se recomienda que el nudo quede a no más de 50 centímetros del extremo de la caña, para evitar cualquier tipo de aplastamiento en la misma. A continuación, se muestra un ejemplo de la localización de los pernos en las vigas principales.

Figura 74. Localización de los pernos en las vigas principales



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD Civil 3D 2016.

Figura 75. **Ensamblaje de las vigas principales**

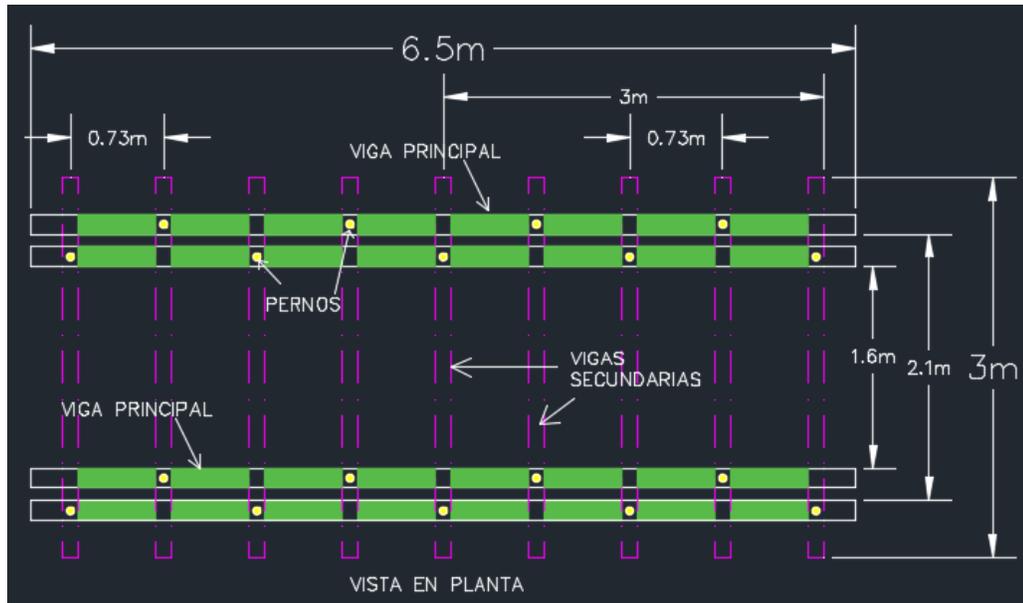


Fuente: Sección de materiales prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

#### **11.4.2. Colocación de vigas secundarias**

Las vigas secundarias deben ser de 3 metros de longitud, con un diámetro de 5 pulgadas. Estas irán colocadas sobre las vigas principales, dejando de cada lado 30 centímetros salidos de la estructura. Estas vigas van perñadas con la varilla de 3/8". La distribución de los pernos se muestra en la figura 76.

Figura 76. **Distribución de pernos en vigas secundarias**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD Civil 3D 2016.

Figura 77. **Colocación de viga secundaria**



Fuente: sección de materiales prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

En este paso, se recomienda únicamente colocar los pernos correspondientes a las vigas principales que se encuentran en el exterior. Para las vigas principales del interior se sugiere realizar la fijación luego de colocar los pernos de los postes verticales de la baranda, para que la distancia entre las vigas principales y los postes sea la adecuada.

Figura 78. **Vigas secundarias colocadas**

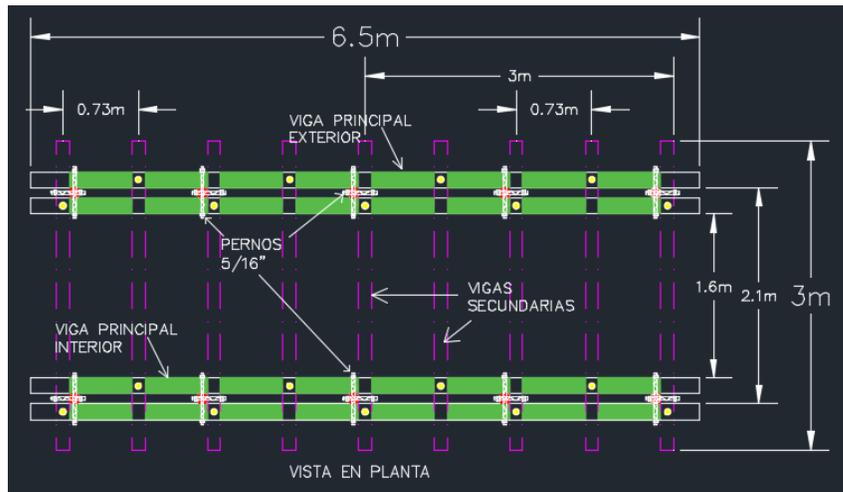


Fuente: Sección de materiales prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

#### **11.4.3. Colocación de postes verticales de la baranda y vigas principales interiores.**

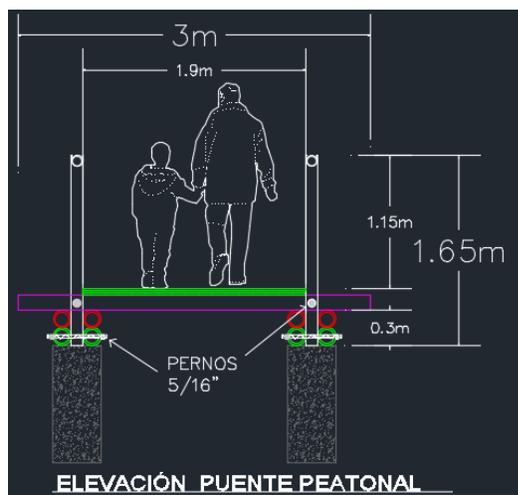
Es importante realizar un corte en forma de boca de pescado a los postes verticales para que puedan cargar los largueros que servirán para el pasamanos. Una vez las vigas principales exteriores sean ensambladas con las vigas secundarias que corresponden, se coloca los postes verticales de la baranda. Estos van fijados con perno de 5/16" y deben ser ensamblados en conjunto con las vigas principales interiores y exteriores, como se muestra en la figura 79.

Figura 79. **Distribución de pernos para anclajes de los postes a las vigas**



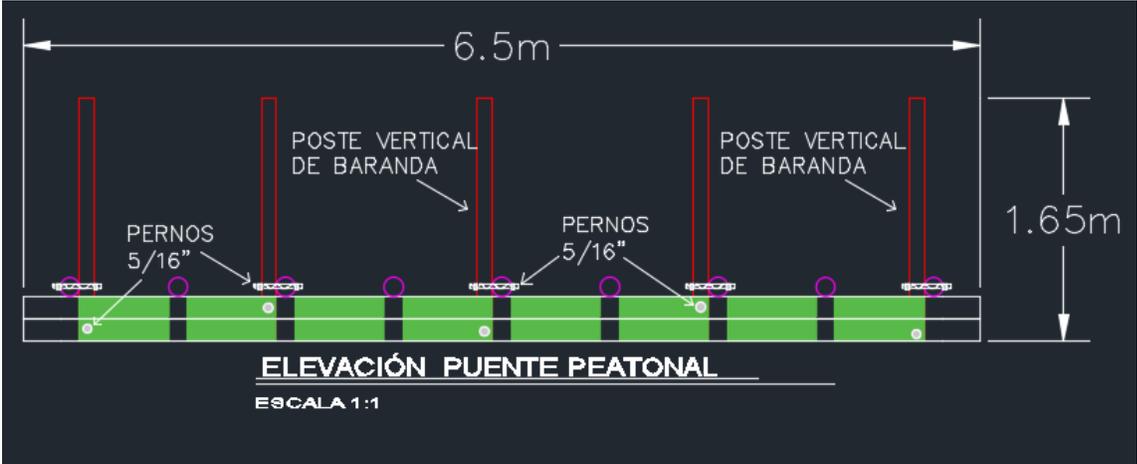
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD Civil 3D 2016.

Figura 80. **Distribución de pernos para anclajes de los postes de la baranda**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD Civil 3D 2016.

Figura 81. **Detalle en elevación de distribución de pernos a postes de baranda**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD Civil 3D 2016.

Figura 82. **Postes verticales con boca de pescado**



Fuente: Sección de materiales prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Seguidamente, se fija los largueros que servirán de pasamanos. Cada larguero va fijado sobre los postes verticales que se colocaron anteriormente. Estos pueden ir fijados con tornillo busca rosca.

Figura 83. **Tornillos busca rosca**



Fuente: Muchomaterial. *Tornillo busca rosca*. <http://www.muchomaterial.com>. Consulta: 20 de junio de 2019.

Figura 84. **Montaje de baranda finalizado**



Fuente: Sección de materiales prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

#### **11.4.4. Tablero**

La estructura del tablero consta de tres capas de esterilla: las primeras dos se deben colocar en sentido longitudinal, la primera con la parte interior de la caña viendo hacia arriba y la segunda capa con la parte interior de la caña viendo hacia abajo, con el objetivo de contrarrestar esfuerzos. La última capa debe colocarse en sentido transversal del puente con la parte interior de la caña viendo hacia abajo.

Para el trabajo de la esterilla deben seleccionarse cañas entre 4 a 6 pulgadas de diámetro para reducir tiempo en el proceso de la esterilla, ya que se cubre mayor área con menor número de cañas.

Para iniciar con el trabajo de esterilla se recomienda seleccionar cañas sin pandeos, lo más rectas posible en toda su longitud, ya que así es más fácil cubrir el área del tablero sin necesidad de realizar cortes extras que tomen más tiempo en la fabricación.

Debe colocarse la caña sobre el suelo y con la ayuda de un hacha se comienza a partir haciendo cortes longitudinales alrededor de la caña, como se muestra en la figura 85 y en la figura 86.

Figura 85. **Elaboración de esterilla con ayuda del hacha**



Fuente: Sección de materiales prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 86. **Caña rajada con hacha para elaboración de esterilla**



Fuente: Sección de materiales prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Cuando se tenga la caña como se muestra en la figura 86, una vez más, con ayuda del hacha, se corta por un lado a modo de tener una esterilla, como se muestra en la figura 87.

**Figura 87. Esterilla**



Fuente: Sección de materiales prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Teniendo la esterilla como se observa, se procede a retirar con un machete las paredes de los nudos hasta lograr una cama de esterilla, como se muestra en la figura 88.

**Figura 88. Esterilla terminada sin nudos y paredes**



Fuente: Sección de materiales prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Una vez se tenga la cantidad suficiente de esterilla para formar las tres capas del tablero, se coloca sobre las vigas secundarias. En el proceso de construcción para esta investigación se utilizó una clavadora neumática con ayuda de un compresor para insertar clavos de aluminio de 2" de largo. Se logró así un proceso mucho más rápido en la colocación de la esterilla.

Figura 89. **Colocación de la esterilla sobre vigas secundarias**



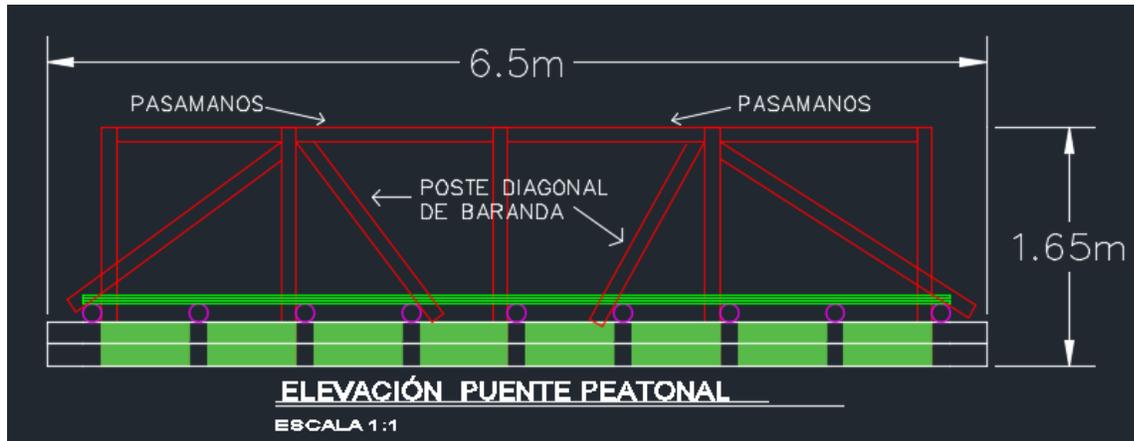
Fuente: Sección de materiales prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Si no se cuenta con una clavadora y un compresor, se recomienda clavar de manera tradicional la esterilla con un martillo y clavos de 2" que se utilizan para trabajar con madera.

#### **11.4.5. Fijación de postes diagonales**

Al igual que los largueros del pasamanos, los postes diagonales de la baranda van fijados con los tornillos busca rosca. En la figura 90 se muestra la distribución de los postes diagonales en el puente.

Figura 90. **Distribución de postes diagonales de baranda**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD Civil 3D 2016.

Debido al tipo de unión de los postes diagonales, es necesario hacer cortes en forma de boca de pescado para lograr las conexiones con los postes verticales y los largueros del pasamanos, como se muestra en la figura 91.

Figura 91. **Corte con forma de boca de pescado**



Fuente: Sección de materiales prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Una vez los postes diagonales y los pasamanos hayan sido fijados, el puente estará terminado, como se muestra en la figura 92.

Figura 92. **Puente peatonal de bambú terminado**



Fuente: Sección de materiales prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 93. **Puente peatonal de bambú terminado**



Fuente: Sección de materiales prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.



## CONCLUSIONES

1. Se diseñó un puente peatonal con bambú estructural bajo cargas de servicio requeridas por la Guía de especificaciones para el diseño de puentes peatonales de AASHTO. Se utilizó como carga de servicio peatonal  $440,12 \text{ kgf/m}^2$  y la combinación de cargas Resistencia I establecido por AASHTO.
2. Se recopiló información bibliográfica de estudios realizados en el Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería, en especial por la sección de Tecnología de la madera, para seleccionar variedades de bambú por utilizar en el diseño, según sus características físicas y mecánicas. Se consideró la especie *Guadua Angustifolia* para el análisis y diseño estructural.
3. Se propuso una estructura de un vano con una luz libre entre apoyos de 6 metros. Dado que el armado de las estructuras de bambú es similar a una estructura de acero, la tipología estructural del puente que se escogió es con una armadura bajo el tablero, como se describe en el capítulo 5 y se muestra en la figura 12.
4. Se realizó el análisis estructural del modelo propuesto con diferentes diámetros de diseño, tanto para las vigas secundarias como para las vigas principales. Se determinaron las áreas tributarias de carga, cargas muertas, cargas vivas, los cortantes máximos y momentos máximos como se muestra en el capítulo 6.

5. Debido a la tipología escogida para el modelo del puente, no fue necesario contar con una subestructura que soportara las cargas de la súper estructura. Sin embargo, como se mencionó en el capítulo 5, el suelo del lugar de emplazamiento del puente debe contar con buena capacidad de carga para soportar los esfuerzos provocados por la súper estructura y por las cargas de servicio.
6. De acuerdo con lo establecido en el capítulo 5, la baranda estará conformada por cañas con diámetro de al menos 4 pulgadas no importando su espesor, utilizando la especie *Dendrocalamus Asper*. Como se demostró en el capítulo 6, en el diseño estructural, el diámetro óptimo para las vigas secundarias es de 8" y al menos 1,4 cm de espesor, presentando esfuerzos teóricos de 4,99 Mpa y 0,30 Mpa a flexión y corte, respectivamente, resultados obtenidos al utilizar la especie *Guadua Angustifolia*. Por otro lado, para las vigas principales, se demostró que el diámetro óptimo es de 10" y al menos 2 cm de espesor, presentando esfuerzos teóricos de 4,56 Mpa y 0,2 Mpa a flexión y corte respectivamente, utilizando la especie de bambú *Guadua Angustifolia*.
7. Se realizaron dos tipos de ensayos de carga distribuida en toda la estructura, ensayo bajo carga de fatiga y ensayo demostrativo bajo carga masiva. Para el ensayo bajo carga de fatiga, se realizaron dos ciclos de carga y descarga de 3,5 toneladas en el primer ciclo y 3,6 toneladas en el segundo ciclo. Ambos ensayos son descritos en el capítulo 8. El análisis de los resultados para entender el comportamiento de la estructura bajo las condiciones de carga de los ensayos, es mostrado en el capítulo 10.
8. En el capítulo 10 mediante el análisis de resultados, se comparó los resultados experimentales obtenidos de los ensayos con las condiciones

establecidas por la guía de especificaciones para el diseño de puentes peatonales de AASHTO y la norma peruana E100 Bambú, concluyendo que las cargas permisibles experimentales, obtenidas de los gráficos de las figuras 55 y 56, ocasionan una deflexión permisible en la estructura por lo que se da como válido el diseño del puente tanto experimental como teórico.

9. Con el fin de que se puedan replicar y puedan ser utilizados por comunidades, se elaboró una guía de lineamientos específicos para la construcción de un puente peatonal utilizando cañas de bambú de la especie *Dendrocalamus Asper* como materia prima. Dicha guía se encuentra en el capítulo 11.



## RECOMENDACIONES

1. Aplicar, previo a la construcción del puente, tratamiento preventivo al bambú para aumentar la durabilidad del material y evitar problemas de pudrición por humedad, desarrollo de hongo o problemas de insectos. De esta manera se prolonga la vida útil de la materia.
2. Seguir, al momento de ensamblar el puente, la distribución sugerida de los pernos y los diámetros especificados para que, al momento que las cargas de servicio se apliquen, la estructura tenga un comportamiento similar al obtenido en las pruebas de laboratorio. Es altamente recomendable no hacer más perforaciones que las especificadas en este documento, ya que esto podría disminuir la resistencia de los elementos frente a las cargas de servicio.
3. Evitar sobrecargar el puente cuando este presente una deflexión mayor a  $L/500$ , con el fin de que la estructura se mantenga en un rango de deflexión seguro de acuerdo con la norma peruana E-100 Bambú.
4. Elegir únicamente la especie *Guadua Angustifolia* o *Dendrocalamus Asper*, ya que, en la estructura propuesta del puente, demuestran soportar los esfuerzos teóricos y prácticos, respectivamente. Si se desea utilizar una especie de bambú distinta, que primero se someta a pruebas de laboratorio para asegurar que cumple con los parámetros de cargas de servicio para puentes peatonales de AASHTO.

5. Evitar utilizar espesores de caña menores a los propuestos en este estudio, ya que como se demuestra en los cálculos, esto podría disminuir drásticamente la resistencia de los elementos a esfuerzos de flexión.
6. Evitar utilizar cañas de bambú que demuestren tener algún daño en su estructura por putrefacción o estén picados por insectos. Esto afecta la vida útil del material y disminuye su capacidad de resistencia a esfuerzos.
7. Evitar perforar y realizar cortes en los nudos de las cañas que servirán como vigas, ya que son fundamentales para dar resistencia a los esfuerzos de corte y flexión.

## BIBLIOGRAFÍA

1. American Association of State Highway and Transportation Officials. *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*. Estados Unidos: United States of America, 2009. 1 005 p.
2. \_\_\_\_\_. *Interim Revisions to the LRFD Specifications for Structural Supports for Highway Signs, Luminaires and Traffic Signals*. Estados Unidos: United States of America, 2017. 40 p.
3. \_\_\_\_\_. *LRFD Guide Specifications For Design Of Pedestrian Bridges*. Estados Unidos: United States of America, 1997. 15 p.
4. \_\_\_\_\_. *LRFD Guide Specifications For Design Of Pedestrian Bridges*. Estados Unidos: United States of America, 2009. 14 p.
5. BATZ CÚN, Manuel Antonio. *Cubiertas de techo utilizando cañas de bambú mampuestas de 2,5 metros de largo*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2017. 124 p.
6. CALO ROSALES, Norma Elizabeth. *Caracterización física y mecánica de tres especies de bambú aptas para la construcción en Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2018. 186 p.

7. CASTILLÓN VALDEZ, Brigitte; MALAVER ZAPATA, Diego. *Procedimientos de ensayo para la determinación de las propiedades físico-mecánicas de la guadua*. Trabajo de graduación de Ing. Civil y Agrícola. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, 2012. 94 p.
8. IXCOLÍN OROXOM, Carlos Armando. *Estado actual del bambú como material de construcción en Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1999. 189 p.
9. MAGA. *Proyecto Industrialización del Bambú en Guatemala*. [en línea]. <<https://www.maga.gob.gt/proyecto-de-bambu-promueve-desarrollo-rural/>>. [Consulta: 18 marzo 2020].
10. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento de Perú. *Norma Técnica Peruana E-100, Bambú*. Lima Perú: 2000. 58 p.
11. MONTERROSO SALAZAR, Josué Jonattan. *Diseño y evaluación de vigas joist para estructuras de techos livianos, fabricados con bambú*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2014. 185 p.
12. OLIVIA MAYORGA, Gustavo Adolfo. *Evaluación de las propiedades físico-mecánicas de cuatro especies de bambú*. Trabajo de graduación de Agronomía. Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1989. 97 p.

13. ORDOÑEZ, Víctor Rubén. et. al. *Manual para la construcción sustentable con bambú*. México: Comisión Nacional Forestal, 2002. 98 p.
14. Real Academia de Lenguas. [en línea]. <<http://rae.es/>>. [Consulta: 18 marzo 2020].
15. UBIDIA MORÁN, Jorge. *Construir con bambú “Caña de Guayaquil”*. *Manual de construcción*. Perú: 2015. 79 p.