

DISEÑO DE UN PUENTE EN BAMBÚ *Guadua angustifolia* Kunth UBICADO EN
LA FINCA EL CENTENARIO PARA LA UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

DAVID HENRÍQUEZ DEFELIPE
FRANKLIN EDUARDO MORÓN SIERRA

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS
BOGOTÁ
2017

DISEÑO DE UN PUENTE EN BAMBÚ *Guadua angustifolia* Kunth UBICADO EN
LA FINCA EL CENTENARIO PARA LA UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

DAVID HENRÍQUEZ DEFELIPE
FRANKLIN EDUARDO MORÓN SIERRA

Trabajo de grado como requisito para la obtención del título de Ingenieros Civiles

Director
Jorge Enrique Franco Carbonell
Ingeniero Civil

Par académico
Caori Patricia Takeuchi Tam
Ingeniera Civil

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS
BOGOTÁ
2017

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Ciudad y fecha (día, mes, año)

DEDICATORIA

A Dios por ser nuestra guía incondicional.

A nuestros padres por confiar en nosotros y apoyarnos en todas las decisiones.

A nuestras familias por acompañarnos moralmente.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por habernos acompañado a lo largo de nuestras vidas, guiándonos para completar las diferentes metas propuestas y dándonos fuerza para superar aquellos momentos difíciles en los que se deseó tirar la toalla. De igual manera, por colocar en nuestro camino a todas las personas, que de alguna u otra manera nos acompañaron y apoyaron para culminar nuestra carrera profesional.

A nuestras familias, por ser un apoyo incondicional, tanto económico como moral, por sus valiosos valores inculcados, por sus enseñanzas y consejos que nos llevaron a formarnos como las personas que somos y seguiremos siendo a lo largo de nuestra vida profesional.

A los ingenieros Jorge Enrique Franco Carbonell (director), Caori Patricia Takeuchi Tam (par) y a Rodolfo Felizzola, quienes nos ayudaron, acompañaron y aconsejaron durante todo este recorrido para sacar adelante este trabajo de grado, gracias por su tiempo y paciencia.

A los docentes, por formarnos de manera integral como ingenieros civiles y acompañarnos a lo largo de la carrera universitaria.

Al ingeniero Larry David Gómez Cuéllar por su colaboración en la ejecución del levantamiento topográfico del terreno en la zona del puente en Sasaima.

A la Ingeniera Alejandra Páez Canabal por su colaboración en la ejecución del documento final.

Finalmente, a todas aquellas personas que creyeron en nosotros desde el primer instante, muchas gracias.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	18
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	20
2. JUSTIFICACIÓN	22
3. OBJETIVOS	23
3.1 GENERAL	23
3.2 ESPECÍFICOS	23
4. MARCO REFERENCIAL	24
4.1 CIENTÍFICO	24
4.2 TEÓRICO	26
4.3 ANTECEDENTES	30
4.4 HISTÓRICO	34
4.5 TECNOLÓGICO	38
4.6 NORMATIVIDAD APLICABLE	39
5. DISEÑO METEDOLÓGICO	40
6. ANÁLISIS Y DISEÑO	42
6.1 PARÁMETROS DE DISEÑO	42
6.1.1 Características del análisis estructural.	42

6.1.2 Espectro de diseño.	42
6.1.3 Evaluación de cargas.	43
6.1.3.1 Carga muerta (SD).	43
6.1.3.2 Carga viva (L).	44
6.1.3.3 Carga de viento (Ws).	45
6.1.3.4 Combinaciones de carga.	45
6.2 PREDIMENSIONAMIENTO DE LA SUPERESTRUCTURA DEL PUENTE	46
7. RESULTADOS Y DIVULGACIÓN	50
7.1 ESFUERZOS ACTUANTES Y DESPLAZAMIENTOS DE LA ESTRUCTURA EN EL SOFTWARE SAP2000	50
7.2 DISEÑO DEFINITIVO ESTRUCTURAL	53
7.3 PROGRAMACIÓN Y PRESUPUESTO	60
8. CONCLUSIONES	65
9. RECOMENDACIONES	68
BIBLIOGRAFÍA	69
ANEXO A	73
ANEXO B	75
ANEXO C	80
ANEXO D	81

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Características del análisis y diseño estructural	42
Tabla 2. Carga muerta	44
Tabla 3. Combinaciones de carga de la estructura	45

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Elementos en guadua del puente peatonal afectados por insectos xilófagos	20
Figura 2. Puente en guadua deteriorado de la finca El Centenario	21
Figura 3. Vista transversal del puente de la finca El Centenario	21
Figura 4. Morfología de la guadua	24
Figura 5. Inyección de mortero en los canutos de la guadua	26
Figura 6. Unión empernada	29
Figura 7. Unión pernada con pletinas paralelas	29
Figura 8. Unión pernada con abrazadera o zuncho	29
Figura 9. Unión embebida con barra axial	29
Figura 10. Puente en guadua Jenny Garzón	35
Figura 11. Puente en Cúcuta, Colombia	36
Figura 12. Puente en guadua Davao, Filipinas	36
Figura 13. Puente en guadua Santo Domingo Savio, Medellín	37
Figura 14. Puente en guadua Guanezhoua	38
Figura 15. Puente en guadua Universidad Tecnológica de Pereira	38
Figura 16. Diagrama de actividades	41
Figura 17. Espectro elástico de aceleraciones de diseño	43
Figura 18. Triangulación de puntos topográficos en Topocal	46
Figura 19. Curvas de nivel del terreno en la ubicación del puente	47

Figura 20. Ubicación de la estructura en el terreno	47
Figura 21. Cercha tipo Pratt combinada con arcos de resistencia	48
Figura 22. Imagen tridimensional de la estructura	48
Figura 23. Corte longitudinal del puente peatonal	49
Figura 24. Modelado de la estructura en SAP2000	51
Figura 25. Desplazamiento máximo de la estructura en el nodo 104	52
Figura 26. Solicitaciones de carga de los elementos estructurales del puente	57
Figura 27. Deformación de la estructura	58
Figura 28. Modelo definitivo de la estructura en planta	58
Figura 29. Modelo definitivo del puente con cubierta	59
Figura 30. Modelo definitivo del puente en vista longitudinal	59
Figura 31. Modelo definitivo del puente en corte transversal	59
Figura 32. Modelo definitivo en 3D del puente peatonal	60

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A	72
ANEXO B	74
ANEXO C	79
ANEXO D	80

GLOSARIO

ALFARDA: par o cuchillo de una armadura de cubierta que se coloca perpendicular a la fachada.

ANISOTROPÍA: propiedad que presenta propiedades diferentes según la dirección que se considere del material.

ARANDELA: pieza metálica en forma de corona, utilizada en uniones empernadas para repartir la fuerza en área mayor.

ARMADURA: conjunto de elementos de guadua que ensamblados en configuraciones triangulares planas o espaciales conforman un sistema o sub-sistema estructural que resiste y transfiere carga en todas las direcciones, hacia la cimentación o los elementos de soporte.

BASA: comprende la siguiente parte o segmento que se encuentra después de la cepa, con longitud entre 4 y 6 m.

CAPACIDAD: es la máxima fuerza axial, fuerza cortante y momento flector que es capaz de resistir un elemento o componente estructural.

CARGAR: aplicar fuerzas a una estructura o elemento estructural.

CELOSÍA: viga de cordones paralelos con pendolones y diagonales que forman triángulos continuos.

CEPA: primer segmento basal del culmo de guadua con longitudes que fluctúan entre 3 a 4 m; es la sección con mayor diámetro y espesor de pared.

CERCHA: elemento estructural triangulado que recibe las cargas de la cubierta.

COEFICIENTE DE MODIFICACIÓN: coeficientes por los cuales se afecta a los esfuerzos admisibles y a los módulos admisibles de elasticidad, para tener en cuenta las condiciones de uso particular de un elemento o componente estructural.

COMPRESIÓN: es la resultante de las tensiones o presiones que existen dentro de un sólido deformable o medio continuo, caracterizada porque tiende a una reducción de volumen del cuerpo, y a un acortamiento del cuerpo en determinada dirección

CONTENIDO DE HUMEDAD: contenido de agua al interior de un cuerpo expresado como la relación en porcentaje entre el peso del agua contenida y el peso del material anhidro.

CONTRAFLECHA: ligera curvatura, convexa, que se realiza en una viga o cercha para compensar cualquier flecha prevista cuando soporte un peso.

CORDONES: miembro superior o inferior de una armadura o cercha.

CORREA: elemento que forma parte de la subestructura portante de una cubierta.

CORTE TÉCNICO DE TALLO: es aquel que se realiza a ras del primer o segundo nudo sin dejar cavidad para que ingrese agua a fin de evitar empozamiento.

CULMOS: eje aéreo segmentado de los bambúes, formado por nudos y entrenudos, que emergen del rizoma; es el equivalente al tallo de un árbol.

CUMBRERA: parte más alta del tejado en donde se unen las alfardas.

DESCARGAR: remover fuerzas de una estructura o de un elemento estructural.

DESGANCHE: actividad que consiste en la eliminación de las ramas que se encuentran en la parte baja de la guadua.

DIAFRAGMA: subsistema estructural encargado de la transmisión y resistencia de las fuerzas horizontales principalmente por acción en su plano.

DIÁMETRO EXTERNO: diámetro de una sección transversal de una pieza de guadua medido desde dos puntos opuestos en la superficie externa.

ELEMENTO PRINCIPAL: en el diseño de uniones sometidas a cortante simple, es el elemento de guadua de mayor diámetro.

ELEMENTO LATERAL O SECUNDARIO: en conexiones sometidas a cortante simple o múltiple, son los elementos de guadua o platinas de acero no cubiertos por la definición anterior.

ENTRAMADO: conjunto de elementos estructurales como vigas y viguetas en entresijos y cubiertas o como pies derechos en muros, que se encargan de dar soporte al material de revestimiento.

ENTRENUDO: porción del culmo comprendida entre dos nudos; también se le conoce como canuto o cañuto, su longitud varía a lo largo del culmo.

ESFUERZOS ADMISIBLES: son los esfuerzos de compresión paralela, compresión perpendicular, corte paralelo, flexión, tracción paralela y tracción perpendicular, que resisten los elementos estructurales de guadua.

ESFUERZO CALCULADO: es el esfuerzo resultante de las solicitudes de servicio.

ESPESOR: grosor de la pared de una probeta de Guadua angustifolia Kunth en mm.

FIBRA: cedula alargada con extremos puntiagudos y casi siempre con paredes delgadas.

FLEXIÓN: deformación que presenta un elemento estructural alargado en una dirección perpendicular a su eje longitudinal.

GUADUA HECHA: su tallo es de color verde amarillento y manchas grisáceas arrozetadas.

GUADUA O BAMBÚ: es una planta gramínea originada de la India, con tallo leñoso que llega a más de 20 metros de altura y cañas muy resistentes.

GUADUA SECA: se reconoce muy fácilmente porque su tallo es de color amarillo y ha perdido su actividad fisiológica.

GUADUA BICHE: es de fácil reconocimiento por culmo o tallos de color verdes brillantes con ramas, hojas y nudos que son de color blanco intenso, con ausencia de hojas caulinares en la parte basal.

HOJAS CAULINARES: son hojas de color café oscuro que se encuentran alrededor de la guadua cuando esta se encuentra brotando a la superficie, no posee hojas ni ramas laterales.

LATA O LATILLA: es el primer subproducto realizado a la guadua mediante cortes longitudinales que se le hacen a la misma.

MODULO DE ELASTICIDAD: módulo de elasticidad de un elemento medido en la dirección paralela a la fibra, multiplicado por los coeficientes de modificación.

MONTANTE O PENDOLÓN: pieza de guadua, normalmente en posición vertical en el plano de trabajo, que forma parte de una armadura.

MORTERO: mezcla de arena, cemento y agua.

PERNO: elemento de acero para unión de guadua, provisto de cabeza hexagonal en un extremo y rosca en el otro.

PIE DERECHO: elemento vertical que trabaja a compresión. Piezas verticales de los entramados.

PRESERVACIÓN: tratamiento que consiste en aplicar sustancias capaces de prevenir o contraer la acción de organismos que destruyen afectan la guadua.

PRESERVANTE: sustancia que se aplica para prevenir o contrarrestar por un periodo de tiempo, la acción de alguno o varios tipos de organismos capaces de destruir o afectar la guadua.

PUDRICIÓN: defecto correspondiente a la descomposición de los culmos de guadua por ataque de agentes biológicos o humedad, que producen cambios en su apariencia, color y propiedades físicas y mecánicas.

RIOSTRA: elemento estructural empleado para estabilizar una cubierta en si plano.

SECADO: proceso natural o mecánico mediante el cual se reduce el contenido de humedad de la guadua.

SECCIÓN: perfil o figura que resulta de cortar una pieza o cuerpo cualquiera por un plano.

SECCIÓN COMPUESTA: sección formada por la unión de dos o más guadas.

SECCIÓN TRANSVERSAL: es aquella sección que resulta de cortar una guadua en sentido perpendicular a las fibras.

SILVICULTURA: actividad relacionada con técnicas que utilizan las instituciones especializadas como las Corporaciones Autónomas Regionales en el manejo de bosque naturales o plantados.

SISTEMA ESTRUCTURAL: es el conjunto de elementos o componentes estructurales o de subsistemas estructurales diseñados, detallados y ensamblados para resistir la totalidad o una porción de las cargas (verticales, horizontales o ambas) que actúan en una edificación, y para transferirlas a un punto final de aplicación (cimentación) a través de una o varias trayectorias continuas de cargas.

SOBREBASA: comprende la parte siguiente a la basa, con longitudes hasta de 4 m.

SOCOLA: es una actividad que permite eliminar vegetación herbácea como son los bejucos, enredaderas, a fin de poder transitar cómodamente entre los guaduales.

SOLICITACIÓN: fuerza interna que actúa en una sección determinada de un elemento o componente estructural.

TENSIÓN: fuerza por unidad de área en el entorno de un punto material sobre la superficie de un cuerpo.

TRACCIÓN: esfuerzo interno a que está sometido un cuerpo por la aplicación de dos fuerzas que actúan en sentido opuesto, y tienden a estirarlo.

TIRANTE: elemento de un sistema estructural que trabaja a tracción bajo cargas de servicio.

TUERCA: complemento metálico, generalmente hexagonal, provisto de cabeza y rosca helicoidal incorporada.

VARILLA ROSCADA: elemento cilíndrico de acero con rosca helicoidal en toda su longitud para unión entre guaduas.

VARILLÓN: es aquella parte que se encuentra en el último segmento comercial de la guadua, con longitudes de hasta 4 m.

VIGA: pieza cuyo trabajo principal es la flexión.

VIGA DE SECCIÓN COMPUESTA: viga conformada por dos o más guaduas conectadas de tal forma que se garantice el trabajo en conjunto.

VIGUETA: pieza cuyo trabajo principal es la flexión, pero que hace parte de un conjunto de elementos que trabajan juntos.

ZUNCHO: abrazadera metálica que envuelve la circunferencia de la guadua.

RESUMEN

Se presenta el diseño de la superestructura de un puente peatonal en Bambú *Guadua angustifolia* Kunth para satisfacer la necesidad de tránsito peatonal en la finca *El Centenario*, de la Universidad Santo Tomás, ubicada en el municipio de Sasaima – Cundinamarca, en donde se contaba con una estructura en guadua deteriorada. Se partió del estudio topográfico, las propiedades del material y la literatura sobre la construcción en guadua para determinar la configuración geométrica que presentó la estructura del puente peatonal. Para determinar las deflexiones y esfuerzos actuantes en la estructura, se empleó el software de cálculo estructural SAP2000 programado con las propiedades físico-mecánicas de la guadua y las combinaciones de carga estipuladas por las normas colombianas de puentes peatonales. El diseño de los elementos se definió mediante el método de los esfuerzos admisibles y se comparó con los parámetros establecidos en el capítulo G-12 del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. La estructura resultante del análisis fue una armadura en celosía tridimensional de 2,00 m de ancho, 2,50 m de alto y 14,82 m de largo, combinada con arcos y tensores por medio de uniones empernadas con mortero; se protegió de agentes ambientales mediante una cubierta en teja madrileña de 3,45 m de ancho, 20,85 m de largo y una pendiente transversal de 19,30°. El tablero peatonal se consideró en piso en caucho de 2,00 cm sostenido por latas de guadua de 4,00 cm de alto y una lámina superboard de 1,00 cm. Como se supuso, la deflexión máxima se presentó en los elementos de cubierta del voladizo, seguido de los elementos del tablero en el centro de la luz, debido a su comportamiento semejante al de una viga simplemente apoyada. Durante el desarrollo del proyecto, se comprobaron los beneficios de trabajar en guadua, beneficios que se hacen evidentes en los análisis estructurales y en el presupuesto de la obra. Adicionalmente, fue posible aplicar conocimientos adquiridos durante la formación académica en diversas asignaturas.

Palabras clave: *Guadua angustifolia* Kunth, puente peatonal, esfuerzos admisibles, diseño estructural.

INTRODUCCIÓN

La guadua ha sido usada desde hace varias generaciones en la construcción de estructuras de protección para el ser humano, Ecohabitar “su uso es tan antiguo que, según el libro *Nuevas técnicas de construcción en bambú* (1978), en Ecuador se han encontrado improntas de bambú en construcciones que se estima tienen 9.500 años de antigüedad”¹, pero no es hasta la época de los Incas, donde se evidencio por primera vez la utilización de este material en puentes colgantes con diseños avanzados. En Colombia, como lo comenta Carmiol², los indígenas paeces fueron considerados promotores metodológicos de la construcción en bambú guadua, al utilizar una novedosa combinación resistente entre el arco falso y tirantas para la construcción de puentes peatonales, método que hoy en día se sigue utilizando por los constructores en este material. Sin embargo, esta gramínea cobro importancia en el ámbito constructivo hasta hace pocos años, donde se evidencio, a través de diferentes ensayos e investigaciones, sus grandiosas propiedades físico y mecánicas acordes a las necesidades contemporáneas, entre ellas, su excelente resistencia a la tracción paralela a la fibra, rápido crecimiento, disponibilidad, bajo impacto ambiental y su consideración como material antisísmico debido a su capacidad de flexión y su bajo peso.

Es evidente la importancia de empezar a utilizar e implementar este material renovable y sostenible en los futuros proyectos ingenieriles, para lograr disminuir el impacto ambiental ha generado la explotación de recursos naturales para la obtención de materiales de construcción como la madera y el acero. La guadua puede brindar soluciones más económicas a las necesidades que buscan satisfacer los proyectos de construcción.

Pensando en lo anterior, se diseñó un puente peatonal de carácter sencillo y económico, usando el Bambú *Guadua angustifolia* Kunth como material principal de la estructura para la Universidad Santo Tomás, específicamente para la finca *El Centenario* ubicada en el municipio de Sasaima, Cundinamarca. El diseño comprendió desde el levantamiento topográfico hasta el diseño definitivo de la superestructura en bambú guadua, no se contempló el análisis y diseño de la infraestructura, aunque se dejaron recomendaciones para esta. Una gran limitante a la hora de realizar este proyecto de grado se debe a la ausencia de normativas y/o reglamentos para el cálculo y diseño de puentes en bambú guadua, por lo que

¹ ECOHABITAR. La guadua: una maravilla natural de grandes bondades y prometedor futuro [En línea]. Octubre, 2013. [citado en 2016-09-11]. Disponible en Internet: <<http://www.ecohabitar.org/la-guadua-una-maravilla-natural-de-grandes-bondades-y-prometedor-futuro/>>.

² CARMIOLO UMAÑA, Virginia. Bambú guadua, en puentes peatonales. Tecnología en marcha [en línea]. Enero-marzo, 2010. vol. 23, no. 1. [citado en 2016-09-11]. p. 30. Disponible en Internet: <<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4835859.pdf>>.

se realizó una investigación exhaustiva de la literatura para adaptar los parámetros de diseño de puentes en materiales convencionales a los puentes en guadua, además, se tuvo en cuenta los criterios de diseño proporcionados por ingenieros experimentados en el trabajo con este material. Se partió de los análisis del modelamiento de la estructura en SAP2000 para diseñar los elementos en guadua a partir de los esfuerzos admisibles, tal y como lo solicita el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 Capítulo G Estructuras en Madera y Estructuras en Guadua.

Incorporando una geometría de cercha combinada con arcos a compresión, se espera que las deflexiones sean mínimas y se presenten en el centro de la luz, al trabajar como una viga simplemente apoyada.

El primer capítulo del proyecto de grado consta de la definición del problema, donde se realizó el enfoque de la problemática a desarrollar a lo largo del documento, partiendo de la formulación del problema donde se consideró una pequeña definición de los puentes, se explicó la importancia de utilizar la guadua como material alternativo a los materiales convencionales para finalizar con su descripción detallada.

En el segundo capítulo se explica la justificación del proyecto, el por qué se debe llevar a cabo.

El tercer capítulo consta del objetivo general y los objetivos específicos que se plantearon para desarrollar el proyecto de grado.

El cuarto capítulo será el marco referencial, donde se expresarán todos los datos de referencia que se obtuvieron para servir de base al posterior diseño del puente peatonal, comprende el marco teórico, histórico, tecnológico, científico y el estado actual.

El capítulo quinto tuvo una descripción detallada de la metodología empleada para realizar el diseño del puente peatonal, partiendo del levantamiento topográfico hasta el diseño definitivo.

En el capítulo sexto, se explica y demuestran los resultados obtenidos del trabajo de campo. El capítulo séptimo será la divulgación y el octavo las conclusiones del proyecto de grado.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Colombia, se ha empezado a utilizar el Bambú *Guadua angustifolia* Kunth en la construcción de puentes peatonales, como el puente ubicado en Santa fe de Antioquia, el puente Jenny Garzón, el puente Arnulfo Briceño, entre otros; que satisfacen las diferentes necesidades de movilidad que presentan las comunidades al atravesar accidentes geográficos o estructuras viales. Sin embargo, no todas las obras ejecutadas en este material transmiten confianza y seguridad, como el puente en guadua de Medellín, el de Nariño, el de la hacienda Las Delicias y algunos otros construidos en zonas rurales, ya que, presentan deterioros en el material y anomalías estructurales al no contar con los debidos procesos constructivos y silviculturales que requiere la guadua para su correcto funcionamiento mecánico y físico.

Este mismo problema se presentó en la finca *El Centenario* de la Universidad Santo Tomás, donde se encuentra actualmente construido un puente peatonal en guadua de 14,86 m de longitud y 0,70 m de ancho, el cual presenta un deterioro ocasionado por los insectos xilófagos como se muestra en la Figura 1, al no contar con los procedimientos silviculturales, ni con los procesos de preservación y secado necesarios para su correcto funcionamiento determinados por la Norma Técnica Colombia NTC 5301 - Preservación y secado del culmo de *Guadua angustifolia* Kunth.

Figura 1. Elementos en guadua del puente peatonal afectados por insectos xilófagos



Fuente Autores.

Estos canales tubulares creados por los insectos xilófagos en el interior de los elementos estructurales de guadua causan una alteración en su comportamiento mecánico, ya que, al disminuir el área transversal de la sección, también lo haría su resistencia, y, en consecuencia, incrementaría la posibilidad de que este elemento falle por acción de las cargas impuestas de servicio.

Es evidente el problema que amenaza con la seguridad de los transeúntes o usuarios concurridos del puente, ya que en cualquier momento podría llegar a colapsar la estructura. En la Figura 2 y en la Figura 3, se puede observar el estado actual de deterioro de la estructura del puente peatonal en la finca.

Figura 2. Puente en guadua deteriorado de la finca El Centenario



Fuente Autores.

Figura 3. Vista transversal del puente de la finca El Centenario



Fuente Autores.

2. JUSTIFICACIÓN

El bambú guadua ha tomado gran importancia en el ámbito de la construcción a lo largo de estos últimos años, debido a sus excelentes propiedades físico mecánicas, incorporándose como un material alternativo a la madera, mejorando el compromiso con el medio ambiente y reduciendo los costos de construcción. Sin embargo, al ser un material natural, ortotrópico cuyos parámetros de resistencia son afectados por factores como la humedad, la inmunización, los adecuados procesos de silvicultura y procedimientos constructivos, no es ampliamente aprovechado su potencial estructural para desarrollar proyectos de gran envergadura.

Basándose en la importancia de mejorar el tránsito peatonal sobre un canal artificial ubicado en la finca *El Centenario* de la Universidad Santo Tomás utilizando nuevos materiales de construcción, cuyas propiedades e impactos permitan ofrecer una alternativa a los materiales convencionales, se pretende realizar el diseño de la superestructura de un puente peatonal empleando el Bambú *Guadua angustifolia* Kunth como material principal, contemplando el capítulo G-12 del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, la Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP-14 y el software SAP 2000 para su diseño y cálculo.

Desarrollar este proyecto permitió emplear la normativa existente en cuanto al uso de la guadua como material de construcción, sin embargo, llevó también a emplear un criterio ingenieril que garantice la funcionalidad de la estructura, dado que no hay, actualmente, una normativa específica para la construcción de puentes en el material propuesto.

De esta manera, se logró aplicar los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera profesional en áreas como: Construcción y costos, Análisis estructural, Mecánica de materiales y el curso electivo de Estructuras en guadua, directamente al proyecto, y así poder optar por el título de ingenieros civiles, además, exponer una vez más la belleza e innovación de este tipo de construcciones a la sociedad y a la comunidad ingenieril en general.

3. OBJETIVOS

En este capítulo se identifican los objetivos planteados para llevar a cabo este proyecto de grado, comprende el objetivo general y los objetivos específicos.

3.1 GENERAL

Elaborar el diseño estructural y presupuesto de un puente peatonal para la Universidad Santo Tomás, utilizando el bambú *Guadua angustifolia* Kunth como material principal.

3.2 ESPECÍFICOS

- 1° Seleccionar la geometría pertinente para dimensionar el puente peatonal.
- 2° Hallar los esfuerzos actuantes de los elementos y desplazamientos de la estructura para el predimensionamiento.
- 3° Diseñar la estructura definitiva del puente peatonal en bambú guadua.
- 4° Elaborar la programación y presupuesto del puente en bambú guadua.

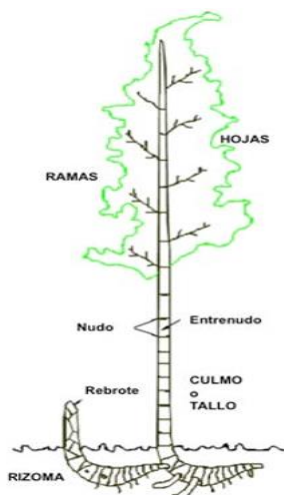
4. MARCO REFERENCIAL

Este capítulo consta de toda la información pertinente encontrada en la literatura acerca del bambú guadua, así como su implementación en la construcción y los antecedentes que se relacionan directa o indirectamente con el tema propuesto en este proyecto.

4.1 CIENTÍFICO

La guadua conocida en comúnmente como bambú leñoso o caña brava, pertenece a la familia *Poaceae*, a la subfamilia *Bambusoideae* y a la tribu *Bambuseae*, diferenciándose del resto por los tallos robustos y espinosos, por las bandas de pelos blancos en la región del nudo y por las hojas caulinares en forma triangular. Existen según EcoHabitat³, aproximadamente 1.400 especies de bambús certificados, de los cuales Colombia contiene uno de los que mejores propiedades físico – mecánicas y durabilidad posee, denominada *Guadua angustifolia* Kunth, motivo por el cual, es la especie de gramíneas más estudiada a nivel nacional y la más usada para la construcción sismoresistente. En estado natural en Colombia, esta gramínea alcanza alturas máximas de 30 metros y diámetros de hasta 22 centímetros. Su morfología está compuesta por la raíz o rizoma, el tallo o culmo y las ramas, el culmo se va angostando a medida que va creciendo, siendo la cepa la sección basal con mayor diámetro, y la copa la sección con menor diámetro, tal y como se muestra en la Figura 4.

Figura 4. Morfología de la guadua



Fuente Caori Takeuchi. Caracterización mecánica del bambú guadua laminado para uso estructural.

³ ECOHABITAR, Op. cit.

La lignina, la cutina y la sílice son los químicos naturales que le dan la dureza, la resistencia, y el color característico a la guadua. Presenta condiciones ideales para su aprovechamiento, debido a que después de plantada la primera guadua, esta se automultiplica vegetativamente al reproducirse asexualmente mediante los rizomas, quienes generan de 1 a 3 rizomas más y estos, a su vez, generan otros 2 o 3 individualmente y luego otros, y así sucesivamente, además de esto, la guadua presenta un rápido crecimiento, alrededor de 11 cm por día, convirtiéndola en un recurso renovable y sostenible.

Esta gramínea posee fibras longitudinales que son las encargadas de soportar, en gran medida, las diferentes fuerzas a las que son sometidas, entre el 40% al 70% de estas fibras se encuentran concentradas en la parte exterior del culmo, mientras que del 15% al 30% se encuentran en la parte interior. El nudo, es la sección del culmo de guadua que menor resistencia posee y se encuentra distanciado entre sí a diferentes longitudes, dependiendo de la sección basal que se estudie, de entre 10 a 35 cm.

Como se evidencia en el Catálogo de la Biodiversidad de Colombia⁴, la guadua se encuentra distribuida a lo largo de la Cordillera Central y la zona céntrica del país en los departamentos de Antioquia, Cauca, Caldas, Cundinamarca, Huila, Quindío, Risaralda, Tolima y Valle del Cauca. Se estima que existen alrededor de 50.000 y 60.000 hectáreas de guadua, de las cuales el 95% son guaduales naturales y el 5% cultivados, sin embargo, solo son aprovechadas aproximadamente 24.000 hectáreas en total.

Las condiciones ecológicas para el cultivo de la guadua influyen notoriamente en el desarrollo de los culmos, por lo que se deben tener en cuenta a la hora de producir este material. Generalmente, los guaduales deben plantarse en un clima con una temperatura de entre 20° a 26 °C, con una altitud de entre 900 a 1.600 m.s.n.m, con una precipitación de entre 2.000 y 2.500 mm/año, una humedad relativa entre el 75 y el 85%, con brillo solar de entre 1.800 y 2.000 h/luz/año o 5 a 6 h/luz/día, con vientos de entre 4,4 a 22,6 m/s y una nubosidad de entre 1 y 4 octas; además, se debe considerar suelos areno-limosos, francos, francos-arenosos, franco – limosos, con perfiles de texturas medias y gruesas, moderadamente ácidos con pH entre 5,5 y 6,0.

Otras especies, variedades o tipos de *Guadua angustifolia* que se pueden encontrar son la *Guadua amplexifolia*, *Guadua angustifolia* Bicolor, *Guadua angustifolia* Nigra, *Guadua angustifolia* Biotipo Cebolla, *Guadua angustifolia* Biotipo Macana y *Guadua angustifolia* Biotipo Castilla.

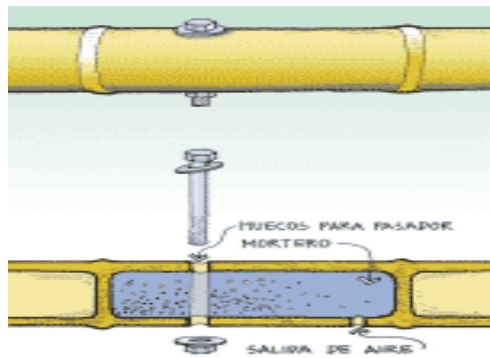
⁴ CATÁLOGO DE LA BIODIVERSIDAD DE COLOMBIA. *Guadua angustifolia* Kunth 1822 [En línea]. Noviembre 29 del 2009. [citado en 2016-09-16]. Disponible en Internet: <http://catalogo.biodiversidad.co/fichas/280>.

4.2 TEÓRICO

El puente, proveniente del latín *pons*, es una estructura destinada a salvar obstáculos naturales y artificiales, garantizando una circulación fluida y continúa de peatones, vehículos, ganado y mercancías de un lugar a otro. En Colombia, como lo comenta Carmiol⁵, los indígenas paeces fueron considerados promotores metodológicos de la construcción en bambú guadua, al utilizar una novedosa combinación resistente entre el arco falso y tirantas para la construcción de puentes peatonales, método que hoy en día se sigue utilizando por los constructores en este material.

Gracias al estudio de estos puentes, se lograron adaptar y mejorar las diferentes técnicas y metodologías de construcción indígenas a los nuevos proyectos arquitectónicos e ingenieriles en este material, como la novedosa técnica desarrollada por Marcelo Villegas en el 2004 denominada *grouting* (ver Figura 5), la cual “permite transferir confiablemente las fuerzas inducidas de un bambú al otro, mediante pernos embebidos en un cilindro de cemento, que distribuye la carga puntual desde la pared delgada del bambú hacia el anillo nodal”⁶, lo que se traduce en mayor resistencia a fuerzas de compresión, permitiendo desarrollar puentes con luces más grandes y construcciones más económicas.

Figura 5. Inyección de mortero en los canutos de la guadua



Fuente ARQUBA. Uniones - Curso de construcción sismo resistente de viviendas de caña en bambú.

Pese a esto, todavía no existen normas de construcción para puentes peatonales en guadua, aunque la NSR-10 (AIS 2010) Título G Estructuras de Madera y Estructuras de Guadua, da un norte importante para diseñar con este material.

⁵ CARMIOLO UMAÑA, Op. cit., p. 30.

⁶ STAMM, Jörg. Siete conceptos para hacer un Puente en Bambú [en línea]. Diciembre, 2010. [citado en 2016-09-16]. p. 2. Disponible en Internet: https://www.academia.edu/6885668/Siete_Conceptos_para_hacer_un_Puente_en_Bamb%C3%BA

Además de la norma, se han venido realizando diferentes estudios del comportamiento físico-mecánico de la guadua sometida a diferentes cargas y esfuerzos, como el trabajo de grado reciente de Ronald Sneider Brand, Diego Ruiz Hernández y Nelson Lozano Castillo denominado *Caracterización física y mecánica de la guadua rolliza de la especie angustifolia Kunth mediante procesamiento digital de imágenes*, donde evalúan 90 probetas entre cepas, basas y sobre basas de este material con base en la Norma Técnica Colombiana NTC 5525 - Métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la *Guadua angustifolia* Kunth, así como monografías, proyectos e investigaciones, que de alguna u otra manera, permiten adaptar las normas vigentes del diseño y el cálculo de puentes en materiales convencionales a la guadua.

Gracias a estos estudios y a otros explicados en la sección 5.3 del presente documento, se logró identificar características y propiedades comunes de la *Guadua angustifolia* Kunth, Juan Carlos Nolivos y Jaime Gonzalo Yacelga⁷:

- La caña guadua posee una alta resistencia a la tracción paralela a la fibra en especial en la pared externa del culmo ya que ésta posee una mayor cantidad de fibras y además presenta incrustaciones de lignina, sílice y cutina. Por lo generalmente se la denomina acero vegetal.
- Al estar solicitado a flexión no presenta problemas de inestabilidad por pandeo flexotorsional ya que es un elemento cerrado con una gran inercia.
- Su sección tubular la hace altamente resistente a torsión.
- La guadua presenta fibras longitudinales fuertes, pero en cambio carece de fibras radiales cosa que es contraria en la madera. Esto provoca que su resistencia a tracción perpendicular a la fibra (cortante) sea muy pequeña.
- Presenta una baja resistencia a compresión paralela en columnas ya que al aplicar la fuerza vertical se presenta una fuerza radial horizontal que separa las fibras.
- Se puede concluir que la guadua es muy apta para estructuras livianas y espaciales en donde aparecen fuerzas axiales.
- La resistencia a la compresión perpendicular a la fibra (aplastamiento) es baja en especial en ausencia de nudo.
- La guadua no es un material homogéneo, su naturaleza no presenta un comportamiento isotrópico es decir sus características varían en un mismo tallo.

⁷ NOLIVOS VALIENTE, Juan Carlos; DÍAZ YACELGA, Jaime Gonzalo. Estudio de conexiones entre elementos estructurales de caña guadua sometidos a carga axial [en línea]. Tesis de grado Ingeniero Civil. Quito (Ecuador). Escuela Politécnica Nacional. Mayo, 2010. [citado en 2016-09-15]. p. 34-35. Disponible en Internet: <<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/2651>>.

Existen recomendaciones aplicables a los elementos estructurales en bambú guadua, donde se resalta la manera de cultivación, recolección y preservación del material, comúnmente denominado proceso de silvicultura. Para que un bambú guadua sirva como elemento de construcción, según la Norma Técnica Colombiana 5300⁸, debe presentar una edad de maduración (hecha) entre los 4 y 6 años, en donde se identifique la presencia de líquenes y la desaparición en el tallo del lustre en el entrenudo, además de contar con un contenido de humedad entre el 18% y el 20%. El corte del tallo o culmo para su posterior avinagrado, preservación y secado, debe realizarse en el primer o segundo nudo y con un ángulo del 15° para evitar que las raíces se pudran por acción del empozamiento del agua, preferiblemente en una fase cuarto menguante entre las 11 pm y las 4 am para evitar el ataque de los insectos xilófagos dentro de las paredes de la guadua.

Los elementos estructurales en guadua, al ser un material natural, poseen diámetros, alturas y espesores diferentes entre sí, lo cual influye al momento de diseñar una estructura uniforme, por lo que se trabaja, normalmente, con tramos cortos de entre 4 a 8 m como máximo, que luego son separados y usados en diferentes partes de la estructura, Carmiol⁹, las guaduas gruesas y derechas se utilizan para los postes y diagonales a compresión, las intermedias para diagonales tensionadas y correas, con una curvatura para los arcos y barandales, y con dos curvaturas o más para los pie de amigo o rastreles del solado.

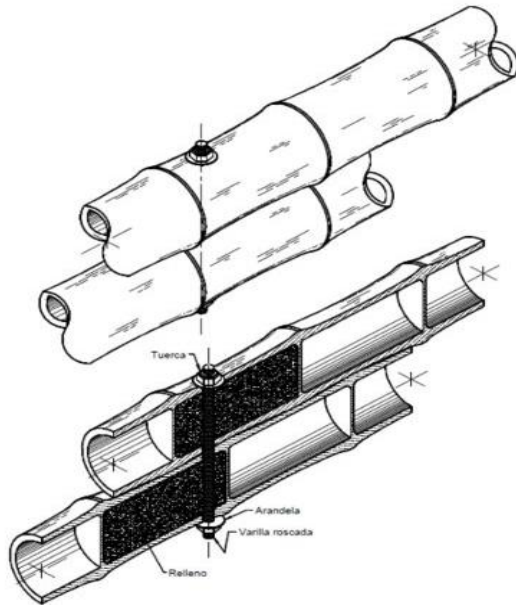
Una parte importante de estos elementos y de la estructura como tal, son las uniones, las cuales, deben ser calculadas con mucho cuidado por el ingeniero, como lo expresa Samuel Martínez García, Jörg Stamm, Julia Arias, Virginia Carmiol, Simón Vélez, entre otros; debido a que la guadua no tiene buen comportamiento a esfuerzos de tracción perpendiculares a las fibras o de corte paralelo a estas. Por esto, es indispensable analizar las uniones, si son empernadas, con la tabla G.12.11-2 Cargas admisibles para uniones empernadas del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 Capítulo G-12, para comprobar si resisten las cargas impuestas o, por lo contrario, requieren de un refuerzo o aumentar el diámetro del perno. Cuando se usan otros tipos de uniones, se debe cumplir con lo citado en el numeral G.12.11.4 – Otras uniones; de la norma anteriormente mencionada.

En las Figuras 6, 7, 8 y 9, se muestran los 4 tipos de uniones típicas encontradas del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 Capítulo G-12 Estructuras de Guadua, para conectar dos o más elementos de bambú guadua.

⁸ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Cosecha y post cosecha del culmo de *Guadua angustifolia* Kunth. NTC-5300. Bogotá D.C. El Instituto, 2008. p. 4-5.

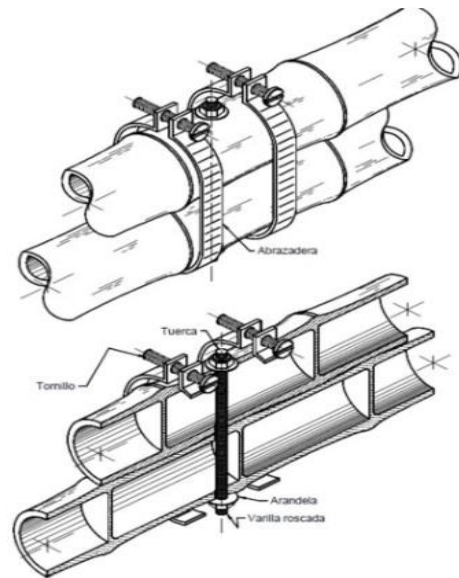
⁹ STAMM, Jörg. Guía para la construcción de puentes en guadua, citado por CARMÍOL UMAÑA, Virginia. Bambú guadua, en puentes peatonales. Tecnología en marcha [en línea]. Enero-marzo, 2010. vol. 23, no. 1. [citado en 2016-09-11]. p. 31. Disponible en Internet: <<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4835859.pdf>>.

Figura 6. Unión empernada



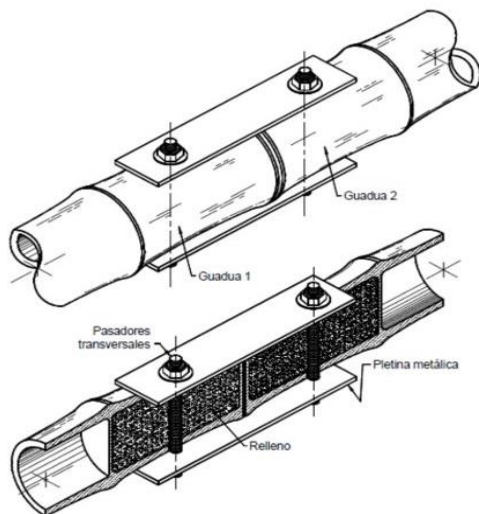
Fuente NSR-10. Estructuras en Madera y Estructuras en Guadua.

Figura 8. Unión pernada con abrazadera o zuncho



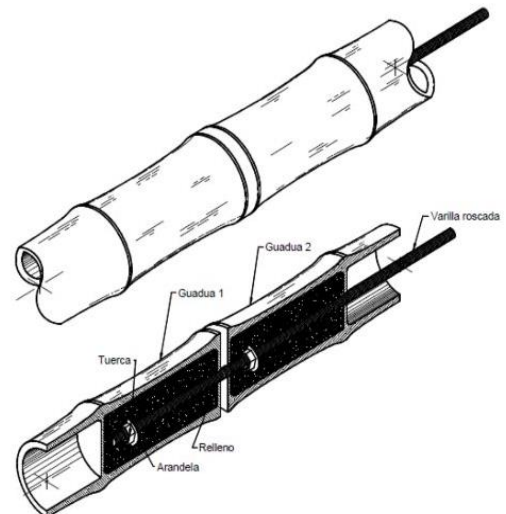
Fuente NSR-10. Estructuras en Madera y Estructuras en Guadua.

Figura 7. Unión pernada con pletinas paralelas



Fuente NSR-10. Estructuras en Madera y Estructuras en Guadua.

Figura 9. Unión embebida con barra axial



Fuente NSR-10. Estructuras en Madera y Estructuras en Guadua.

Aunque la metodología para el diseño y construcción de estos puentes peatonales en guadua dependen, según Stamm¹⁰, principalmente de la formación e ingenio del *Pontifex* (*), así como de la disponibilidad de la materia prima, la herramienta y geografía del lugar; él describe 7 conceptos que se aplican al tema de los puentes, como lo son la viga, el arco, el puente colgante, el puente atirantado y Cantilever, las superficies activas, las estructuras especiales y las cerchas, esta última siendo la estructura más usada en la construcción de puentes en guadua hasta la fecha.

Los elementos de estas estructuras están sometidos a una gran cantidad de esfuerzos que trabajan tanto a compresión como a tensión, por lo que deben ser calculados y diseñados con bastante cuidado. Por lo general, los puentes que se construyen con este tipo de estructura portante se diseñan con una contraflecha o altura estática de aproximadamente el 5% de la luz, permitiendo la formación de un arco que compensa el asentamiento del armazón, gracias a su gran comportamiento estructural ante cargas distribuidas; además, estos puentes cuentan con un soporte o anclaje en los extremos, generalmente en concreto, que reciben las cargas de la estructura y evitan el desplazamiento de la misma. Las uniones de estos elementos, se trabajan normalmente empernadas, controlando la distribución de los pernos para evitar rajaduras del material por alineamiento.

4.3 ANTECEDENTES

A lo largo de los años, se ha venido incursionando en el uso de la guadua como materia prima para la construcción de viviendas de uno y dos pisos, cubiertas y puentes, este último excluido de la NSR-10 (AIS 2010) Título G Estructuras de Madera y Estructuras de Guadua, por lo que en respuesta, han surgido diferentes grupos de investigación para determinar las propiedades mecánicas de la *Guadua angustifolia*, como la resistencia a la compresión paralela a la fibra (Uribe y Durán, 2002; Prada y Zambrano, 2003; Gonzales y Takeuchi, 2007) con y sin inmunización (Pinzón, Rendón y López, 2016), la resistencia a la tensión paralela (Gonzales y Takeuchi, 2014) y perpendicular a la misma (Acuña y Pantoja, 2005), el esfuerzo de compresión admisible bajo diferentes combinaciones de carga (Ardila, 2013), el módulo de elasticidad (González, 2006; Gonzales y Takeuchi, 2007), la resistencia a la flexión (Dumar, 2014), y algunos de estos modificados por la humedad como la resistencia a la tensión paralela a la fibra (Gonzales y Takeuchi, 2014), resistencia a la flexión y módulo de elasticidad (Dumar, 2014), entre otros, con el fin de lograr diseñar, calcular y construir puentes usando este material.

Pese a ser un material renovable y sostenible, “su utilización en la construcción es muy baja con respecto a los materiales pioneros como lo son el acero, el concreto y la mampostería, debido a que los diferentes estudios realizados para la

¹⁰ STAMM, Op. cit., p. 2.

(*) Locución latina empleada para referirse al que hace puentes.

caracterización del material (INCONTEC, 2007; ISO, 2004), así como las diferentes investigaciones y normas de diseño, anteriormente mencionadas, son relativamente recientes”¹¹.

A continuación, se explicó algunos de los proyectos e investigaciones más relevantes en el tema de Diseño de puentes en Bambú Guadua; como el de la ingeniería mecánica Kathia Vásconez Miranda y José Rolando Marín¹², *Diseño de puentes peatonales utilizando caña guadua como elemento de construcción (2005)*, en donde se analiza el funcionamiento de dos puentes de 10 y 20 metros mediante el método de Elementos Finitos, tomados del Manual de Construcción de Puentes (Aleman-Colombiano), sometidos a las mismas condiciones de carga viva de 392 Kg/m², y un peso aplicado de 8207.5 Kg y 15842 Kg respectivamente. Al diseño del puente de 20 metros se le añadieron dos arcos de resistencia, que parten de las bases que soportan los extremos del puente para lograr reducir los esfuerzos a valores admisibles; las 2 estructuras utilizaron uniones tipo IV (empernadas) evaluadas en el laboratorio de sólidos de FIMCP. Se realizaron en total 22 pruebas, de las cuales obtuvieron que 1200 Kg es el valor máximo al que puede ser sometida una unión tipo IV antes de que se produzca la falla, así mismo, de las pruebas con columnas cortas, obtuvieron un valor promedio de 22.21E5 Kg/m² para el esfuerzo de fluencia. Se concluyó que el esfuerzo producido comparado con el esfuerzo de fluencia de la caña proporciona un factor de seguridad de 2 para el puente de 10 metros y de 3.4 para el de 20 metros de longitud, además, el valor de la construcción del puente más largo fue de aproximadamente 7500 dólares, considerando como ítems la materia prima, insumos, mano de obra, entre otros; y los pasos a seguir y metodología para la fabricación e instalación de los mismos. Con este proyecto, se pueden adaptar ciertos valores y metodologías empleadas para el diseño de estos puentes al puente peatonal que se diseñara en este proyecto, considerando que las características son parecidas, al ser estructuras basadas en cerchas, uniones empernadas y estribos en concreto.

Juan Carlos Nolivos Valiente y Jaime Gonzalo Yacelga Díaz¹³, *Estudio de conexiones entre elementos estructurales de caña guadua sometidos a carga axial (2010)*, este proyecto de investigación consistió en determinar el comportamiento mecánico frente a cargas verticales de 3 tipos de uniones en guadua, la primera empernada, la segunda empernada con mortero de cemento y la última con

¹¹ TAKEUCHI TAM, Caori. Caracterización mecánica del bambú guadua laminado para uso estructural [en línea]. Trabajo de tesis doctor en ingeniería ciencia y tecnología de materiales. Bogotá D.C. Universidad Nacional. 2014. [citado en 2016-09-15]. p. 2-3. Disponible en Internet: <<http://www.bdigital.unal.edu.co/46811/1/291494.2014.pdf>>.

¹² VASCONEZ MIRANDA, Kathia. Diseño de puentes peatonales utilizando caña guadua como elemento de construcción [en línea]. Trabajo de grado Ingeniera Mecánica. Guayaquil-Ecuador. Escuela Superior Politécnica del Litoral. 2009. [citado en 2016-09-15]. Disponible en Internet: <http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/13781/3/TESIS_Correg.pdf>.

¹³ NOLIVOS VALIENTE; DÍAZ YACELGA, Op. cit., p. 127.

accesorios de tubería sanitaria de PVC, para lo cual, decidieron evaluarlas sobre cerchas triangulares de guadua. Las uniones empernadas sufrieron falla por corte paralelo a la fibra en el cordón superior, específicamente en la junta, lo que generó flexión en el perno de 3/8"; y la de accesorios de PVC presentó falla por aplastamiento del cordón inferior por acción directa de la compresión del cordón superior. Se concluyó que cada alternativa podría ser aplicada para distintas solicitaciones de carga, dependiendo de la estructura a ser diseñada y su funcionalidad o uso. La unión que mejor comportamiento en cuanto a su rigidez posee es la empernada con mortero. Esta investigación aporta estudios y comparaciones clave como el mejor tipo de unión que deben llevar las conexiones del puente, dependiendo de la solicitud de carga a la cual se exponga el diseño; siendo las uniones empernadas con mortero las que mejor seguridad aportan, tal y como lo expresa el Reglamento colombiano de construcción sísmo resistente NSR-10 Capítulo G-12 Estructuras de Guadua.

Francisco Andrés Tenorio Tacuri¹⁴, *Elaboración de una metodología para la construcción de un puente peatonal en caña guadua, como resultado del análisis de una aplicación práctica* (2015), en donde se validó un puente de *Guadua angustifolia* Kunth de 20 metros de luz y se elaboró una metodología para su construcción. Se detallaron procesos de inmunización, propiedades físicas, propiedades mecánicas y esfuerzos admisibles de la guadua. Para obtener las deflexiones y aceleraciones en los puntos de interés del puente ubicado en la hacienda "Las Delicias", se realizaron ensayos experimentales de carga estática y dinámica, respectivamente. En base a los acelerogramas, se aplicó el artificio de la Transformada Rápida de Fourier (del inglés FFT) para obtener el periodo de vibración de la estructura. Se generó un modelo analítico en SAP 2000, a partir de los datos obtenidos en la visita de campo al puente. El modelo analítico partió de la geometría encontrada en el puente, se aplicaron cargas semejantes a las de los ensayos, se generaron funciones periódicas emulando la aplicación de las cargas dinámicas. El análisis modal de la estructura brindó un periodo de vibración y un esquema de deformación. Finalmente, las deflexiones y periodos de vibración oscilatoria resultantes de los ensayos experimentales fueron comparadas con las teóricas del modelo analítico, validándose el uso del puente para solicitaciones mínimas y depreciándose para solicitaciones mayores y un uso diferente al actual. Se incluye también una metodología para la construcción de un puente, con preparativos iniciales, requisitos de la guadua previa a su uso estructural, requisitos de la infraestructura y la superestructura, tipos de uniones, elementos compuestos, y mantenimiento del puente. Concluyeron que las deflexiones en las juntas del ensayo de carga estática no sobrepasaron el límite admisible de 40 mm, el resultado más crítico en el ensayo

¹⁴ TENORIO TACURI, Francisco Andrés. *Elaboración de una metodología para la construcción de un puente peatonal en caña Guadua como resultado del análisis de una aplicación práctica* [en línea]. Tesis de grado Ingeniero Civil. Sangolquí (Ecuador). Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. 2015. [citado en 2016-09-16]. p. 251. Disponible en Internet: <<https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/11414/5/T-ESPE-049123.pdf>>.

de carga dinámica fue el de la carga estática y dinámica con una frecuencia de 2 saltos por segundo. Las juntas se deformaron permanentemente debido al reajuste de los elementos por un defectuoso proceso de construcción, por lo que no se recomienda usar el puente para solicitaciones mayores a las sometidas regularmente como un aumento de la carga viva. Este proyecto de grado, es una guía indispensable para el diseño y cálculo de puentes en guadua, ya que transmite la mayoría del conocimiento que se debe saber a la hora de trabajar con la guadua, desde su recolección hasta su posterior implementación y cálculo analítico en la estructura. Pese a ser una estupenda guía o punto de partida para calcular el puente que se pretende diseñar en este proyecto de grado, no explica ni toma en cuenta las diferentes combinaciones de carga que afectan a un puente, como las cargas de servicio, ya que las cargas empleadas en el método analítico se representaron únicamente con las cargas que afectaban directamente la prueba de campo como lo son la carga muerta y la viva, sin tomar en cuenta las de cubierta, volcamiento, etc.

Daniel Montoya Gonzales¹⁵, *Estudio de la composición y las propiedades mecánicas de los elementos de unión elaborados en guadua para estructuras poliédricas de puentes y otras aplicaciones (2016)*, consistió en diseñar un nuevo tipo de unión, denominado punta de lápiz, elaborado principalmente a base de guadua y refuerzos metálicos para un puente peatonal poliédrico que se construirá en la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP). Para determinar las propiedades y características físico-mecánicas de la unión, desarrollaron varias pruebas de laboratorio en una máquina universal, ensayando varios tipos de materiales de refuerzo como la resina epóxica y poliéster, el SikaDur, SikaGrout y mortero; además de refuerzos metálicos como una esfera de 4" con agujeros. Después de probar varias configuraciones de esta unión, usando nylon, fibra de vidrio, clavos, y una mezcla de los 3 anteriores, llegaron a la conclusión que ninguna de estas configuraciones supera la resistencia de mecánica del tornillo zincado de 3/4", por lo que decidieron realizar un nuevo prototipo compuesto por unas tapas (anillo y arandela), un perno transversal, clavos de acero grueso y SikaGrout, este último siendo el material escogido, no por mayor resistencia como el SikaDur, sino por eficiencia costo-beneficio. Se concluyó que este prototipo resistió un valor promedio de 8625.45 kgf, siendo mayor que el del tornillo zincado; soportó una fuerza última a tracción de 8.6 Ton, duplicando el rango de seguridad a las solicitaciones de carga del puente, y una fuerza última a compresión de 10 Ton. La esfera hueca de hierro nodular de 4" de diámetro, soportó cargas de hasta 20 Ton en tracción; afirmando la efectividad de este tipo de uniones en puente poliédricos en guadua. De esta investigación se puede rescatar, para este proyecto, utilizar SikaGrout para mejorar

¹⁵ MONTOYA GONZÁLEZ, Daniel, et al. Estudio de la composición y las propiedades mecánicas de los elementos de unión elaborados en guadua para estructuras poliédricas de puentes y otras aplicaciones [en línea]. Tesis de grado Ingeniero Mecánico. Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira. 2016. [citado en 2016-09-15]. p. 40. Disponible en: <<http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/7603/62012M798.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>.

la resistencia mecánica de las uniones empernadas, debido a que este material resiste mayores fuerzas de compresión y tracción que el mortero, pero a un costo más elevado, por lo que se evaluará su empleo solo en uniones con mortero que no resistan las solicitaciones de carga impuestas en el diseño.

4.4 HISTÓRICO

La guadua ha sido usada desde hace varias generaciones en la construcción de estructuras de protección para el ser humano, “su uso es tan antiguo que, según el libro *Nuevas Técnicas de Construcción en Bambú* (1978), en Ecuador se han encontrado improntas de bambú en construcciones que se estima tienen 9.500 años de antigüedad”¹⁶, pero no es hasta la época de los Incas, donde se evidencio por primera vez la utilización de este material en puentes colgantes con diseños avanzados.

Según lo dice Carmiol¹⁷, desde que se empezaron a construir los caminos y se presentó la importancia de cruzar barreras naturales y acortar distancias, los puentes han sido una parte fundamental en el desarrollo urbano para conectar territorios y comunidades, disminuyendo el impacto ambiental que generan las estructuras invasivas como los túneles y/o las carreteras de alto tránsito; y aportando un plus en la seguridad del transeúnte. Por otro lado, se conoce el impacto que ha generado la tala indiscriminada en las zonas boscosas de la tierra, donde una investigación realizada el pasado año 2015 por Thomas Crowther¹⁸ del Instituto de Ecología de Holanda, informa que el 46% de los árboles totales del mundo han sido talados desde el inicio de la agricultura, hace 12.000 años, para su posterior uso en la construcción, fabricación de mobiliario, como combustible, obtención de productos derivados, entre otros, acabando con la flora e indirectamente con la fauna que habita en estas regiones. Por esta razón, es que la implementación de la Guadua como material suplementario de la madera debe ser de gran interés para la ingeniería civil y ambiental.

El primer puente en guadua fue construido en la ciudad de Santiago de Cali en el año de 1734, ya que la ciudad necesitaba encontrar la manera de conectar el centro de la ciudad con el norte. Sin embargo, este puente no tiene mucho tiempo en pie, ya que las condiciones en las que se mantenía no dieron abasto y rápidamente se deterioró.

¹⁶ ECOHABITAR, Op. cit.

¹⁷ CARMIOLO UMAÑA, Op. cit., p. 29.

¹⁸ EHRENBURG, Rachel. Earth Has 3 Trillion Trees Per New Count [La tierra tiene 3 billones de árboles, según nuevo conteo]. Nature magazine [en línea]. Septiembre, 2015. [citado en 2016-09-11]. Disponible en Internet: <<https://www.scientificamerican.com/article/earth-has-3-trillion-trees-per-new-count-video/>>.

En el año de 1853 se realiza la construcción de un puente en guadua sobre el río Ingará en el departamento del Chocó para poder dar paso a las personas sin que ocurrieran accidentes, las dimensiones del puente son de 16,6 x 22 m, luego de ver la durabilidad del puente, en el año de 1857 se realiza la construcción de un puente en guadua en el departamento del Cauca sobre el río La Plata.

Tiempo después, en Quindío en el año de 1999 ocurre un terremoto de alta magnitud, lo cual devasta las ciudades y es necesario idear planes de construcción óptimos para las necesidades del momento, es por eso que se realizan obras de interés social como viviendas y estructuras públicas como puentes en guadua. Estos fueron construidos en este material, ya que se considera al bambú guadua como un material sismoresistente. Durante mucho tiempo de búsqueda y teniendo en cuenta que en el eje cafetero hay una gran cantidad de plantaciones de guadua, se decidió probar la construcción con este material, generando muy buenos resultados.

En el año 2000, el arquitecto Jörg Stamm realiza el primer puente con todas las autorizaciones estructurales y estáticas en la ciudad de Pereira junto a la Universidad Tecnológica de Pereira, este es considerado uno de los principales trabajadores en este material, también hizo parte de proyectos en guadua como restaurantes en Popayán e instalaciones de biogás. En el proyecto de Pereira también se contó con el apoyo del famoso arquitecto colombiano Simón Vélez, uno de los principales representantes del trabajo en guadua.

En Colombia, se encuentra una de las principales estructuras de puentes en guadua, el puente Jenny Garzón, ver Figura 10, fue construido por los arquitectos Simón Vélez y Marcelo Villegas, inaugurado en el año de 2003. Este puente se encuentra ubicado en la salida Medellín-Cota usado para el tránsito de bicicletas y la unión de ciclo rutas entre la localidad de Suba y la Calle 170, adicional también se usa como un punto de referencia para el ingreso a la ciudad. Cuenta con alrededor de 1.200 guaduas macanas, con lo que se conformó la estructura de 3 m de ancho por 45 m de largo y una altura de 4 m. La cubierta está elaborada con teja shingle y el piso con madera sapán. Este puente pesa alrededor de 13 Ton y resiste 36 Ton.

Figura 10. Puente en guadua Jenny Garzón



Fuente <http://angelinogarzonquintero.weebly.com/familia.html>.

Existen otros puentes relevantes como el de la Avenida Libertadores y rotonda Arnulfo Briseño, Cúcuta-Norte de Santander, ver Figura 11, construido por Jörg Stamm en un lapso de 3 meses, el cual soporta una carga viva equivalente a 40 personas, en este se utilizaron 600 guaduas de 10 a 14 cm de diámetro. La estructura principal es el arco, el cual absorbe el 90% de la carga total del puente, a pesar de poseer torres piramidales con paquetes de guadua de 5 y 6 unidades. Este puente atirantado cuenta con una cubierta moderna anti clástica en membrana industrial de PVC reforzado con fibra de vidrio y una capa de teflón. El coste total de la estructura en guadua fue de US\$150.000 en el año 2008, valor que se reflejó mayoritariamente en la cubierta moderna.

Figura 11. Puente en Cúcuta, Colombia



Fuente <https://es.pinterest.com/pin/444660163181682611>.

Puente en guadua en Davao, Filipinas, ver Figura 12, diseñado por Andrea Fitrianto con un periodo de construcción de 1 mes, al cual se le inyectó lechada de cemento en las articulaciones principales y en el suelo se construyó una losa de hormigón armado de 4 pulgadas de espesor para asegurar su estabilidad y permanecía con un costo aproximado de US\$10.000.

Figura 12. Puente en guadua Davao, Filipinas



Fuente <https://es.pinterest.com/pin/514254851184652020/>.

Puente en guadua Santo Domingo Savio, ver Figura 13, ubicado junto al Parque Biblioteca España, Antioquia. Este puente en arco de 46 m de longitud y 7 m de alto fue diseñado primeramente por el arquitecto Simón Vélez, y luego modificado por aprendices y egresados del Centro de la Construcción de la Regional Quindío SENA y apoyado por la alcaldía de Medellín para su construcción en el 2008. Su costo fue de 621 millones de pesos, que se fueron a un elefante blanco ya que en el pasado año 2013 colapsó la cubierta de este puente, según comenta Simón Vélez¹⁹ “Yo exigí que me mostraran los diseños de ese puente y con solo verlos esa estructura se caía, le exigí al SENA de Medellín la memoria de cálculo y nunca me la dieron porque no existía”.

Figura 13. Puente en guadua Santo Domingo Savio, Medellín



Fuente. <http://www.elcolombiano.com/documents/10157/0/6/11101/XWEC/puente-guadua-640x280-02-ec-19102013.jpg>.

Puente en guadua de Guanezhoua, ver Figura 14, localizado en la reserva de la Montaña Nankun en la provincia de Guangong, China. Este puente mixto (hormigón con guadua) fue diseñado por el arquitecto Simón Vélez para permitir el acceso a un hotel ecológico hecho en bambú cruzando un río de 38 m. “La estructura está conformada por una gran viga que da forma a un arco que se apoya directamente en sus extremos en dos grandes pedestales de hormigón armado”²⁰. Fue construido en el año 2005 por colombianos y chinos.

¹⁹ REVISTA SEMANA. Medellín: el puente en guadua que también colapsó [en línea]. Octubre, 2013. [citado en 2016-09-16]. Disponible en Internet: <<http://www.semana.com/nacion/articulo/colapso-puente-de-guadua-en-medellin/363057-3>>.

²⁰ ARIAS, Julia, et. al. Monografía de análisis de autores: Simón Vélez. Catedra de diseño arquitectónico [en línea]. Argentina. Universidad Nacional del Rosario. 2011. [citado en 2016-09-16]. p. 14. Disponible en: http://www.fceia.unr.edu.ar/darquitectonico/darquitectonico/data/pdf/simon_velez.pdf.

Figura 14. Puente en guadua Guanezhoua



Fuente Real Estate. Simón Vélez y el acero vegetal.

Puente en guadua de la Universidad Tecnológica de Pereira, diseñado por Jörg Stamm en el 2000. El arco de guadua cuenta con una cercha con diagonales atirantados contra cargas asimétricas. El puente abraza 40 metros, el piso debe garantizar un galibo de 5 metros.

Figura 15. Puente en guadua Universidad Tecnológica de Pereira



Fuente <http://www.conbam.info/pix/brueckeUTP.jpg>.

4.5 TECNOLÓGICO

Debido a que en Colombia no se dispone de tecnología para el diseño de estructuras de puentes en guadua, se consultará la información pertinente de puentes construidos en Colombia.

4.6 NORMATIVIDAD APLICABLE

1° Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10.

2° Guía de Especificaciones para Puentes Peatonales 1997 AASHTO.

3° Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP-14.

4° Norma de Especificaciones para el Diseño de Puentes de Carretera publicado Por la Asociación Americana de Carreteras de Estado y Funcionarios del Transporte Guía de puentes de Colombia.

5. DISEÑO METEDOLÓGICO

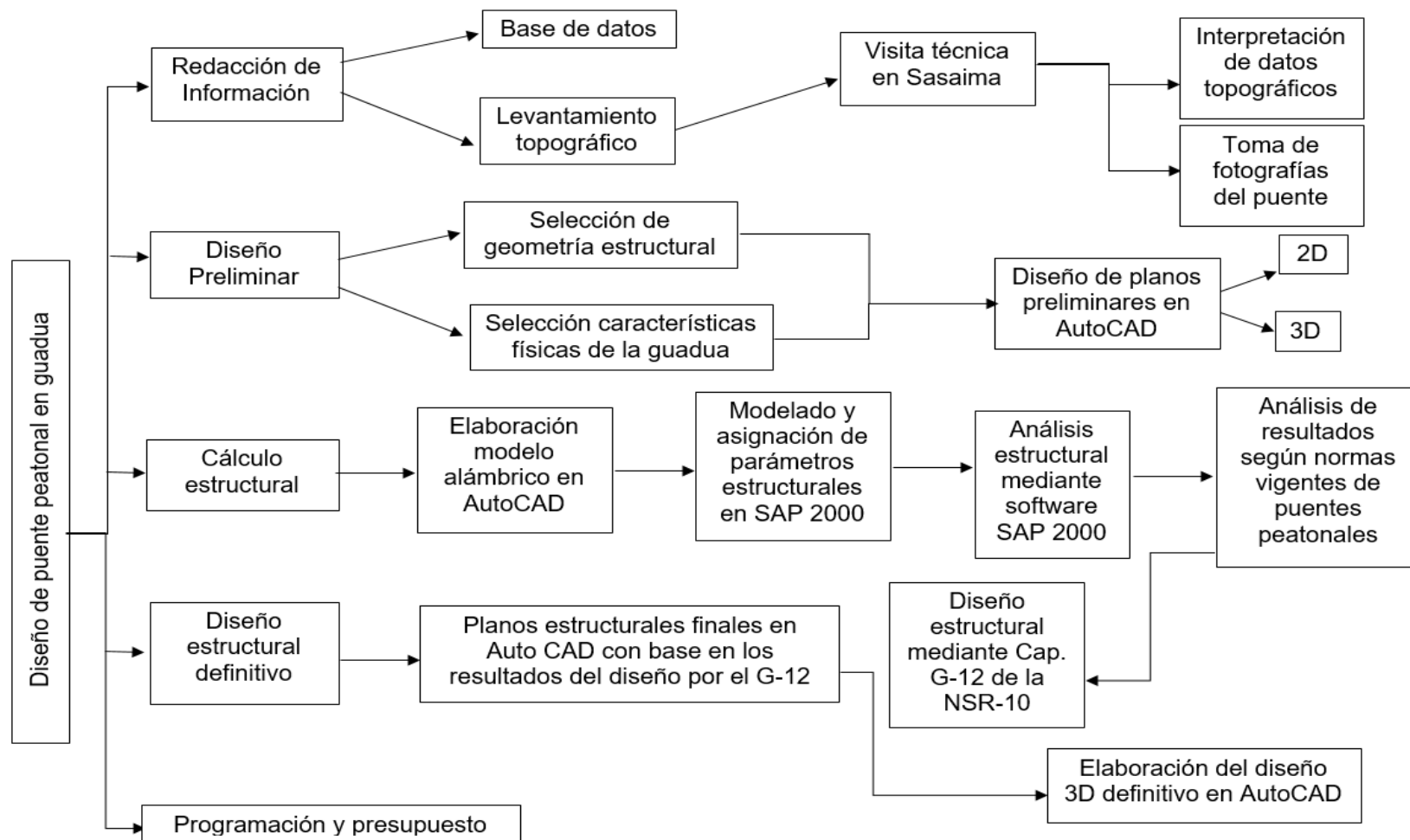
Para la obtención de los datos pertinentes para este proyecto de grado, se recolectó información en las diferentes bases de datos, como Google académico, acerca de temas que traten, directa o indirectamente, sobre el cálculo y diseño de puentes peatonales en bambú guadua. Se usó información de algunos puentes construidos con este material en Colombia, como el puente Jenny Garzón y algunos ubicados en Pereira, para lograr determinar las características y los materiales empleados para estos diseños. Se recolectó información fotográfica del puente peatonal deteriorado y de las condiciones actuales de la finca *El Centenario*, específicamente del lugar donde se ubicará el puente peatonal, así mismo, información topográfica de la zona mediante la aplicación del método de radiación por poligonal cerrada, usando para esto una estación total y un prisma. Mediante el software Topcon Link, se procesaron los datos obtenidos del levantamiento y, posteriormente, se calcularon y modelaron las curvas de nivel empleando el software TopoCal.

Partiendo de la selección de las características de la guadua y una geometría estructural basada en una composición de cerchas y arcos de resistencia, se realizó el predimensionamiento estructural del puente peatonal con sus respectivos planos en 2D y 3D, mediante el programa Auto CAD. Para el cálculo estructural, se elaboró principalmente un modelo alámbrico de la estructura, el cual sería montado, posteriormente, al software SAP2000, donde se programó con las características de los materiales y las combinaciones de carga pertinentes de la Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP-14 y la Guía de Especificaciones para Puentes Peatonales AASHTO 1997. Luego del modelado estructural, se procedió a analizar y verificar los resultados obtenidos de las deflexiones con los parámetros establecidos en la guía de puentes peatonales anteriormente mencionada, y de esta manera, lograr obtener los esfuerzos actuantes en los elementos de la estructura. Mediante el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 Título G-12 Estructuras de Guadua, se analizó el comportamiento de los elementos estructurales y se verificó que cumplieran por esfuerzos admisibles.

Por último, se elaboraron los planos definitivos en el programa Auto CAD del diseño del puente peatonal en guadua por el G-12, además, se elaboró la programación y presupuesto del puente haciendo uso del software Project y Excel respectivamente.

En la Figura 16, se puede observar el diagrama de actividades que se realizó para llevar a cabo este documento.

Figura 16. Diagrama de actividades



Fuente Autores.

6. ANÁLISIS Y DISEÑO

En este capítulo, se presenta el análisis elaborado para calcular y diseñar el puente peatonal, partiendo de la definición de parámetros de diseño como el espectro sísmico y la evaluación de cargas, hasta el diseño preliminar de la superestructura. De esta manera, se abarca el primer objetivo del presente documento referente a la selección de la geometría del puente peatonal.

6.1 PARÁMETROS DE DISEÑO

6.1.1 Características del análisis estructural. La estructura del puente se analizó para cargas gravitacionales, fuerzas horizontales de viento y fuerzas horizontales de sismo, se diseñaron los elementos por el método de esfuerzos admisibles. En la Tabla 1, se muestra un resumen de las características de análisis y diseño utilizados.

Tabla 1. Características del análisis y diseño estructural

Parámetro	Valor
Espectro de diseño	Elástico
Método de análisis sísmico	Fuerzas horizontales equivalentes
Modelo matemático	Matricial espacial
Método de diseño	Esfuerzos Admisibles
Programa utilizado en el análisis	SAP2000
Material – estructura	Guadua

Fuente Autores.

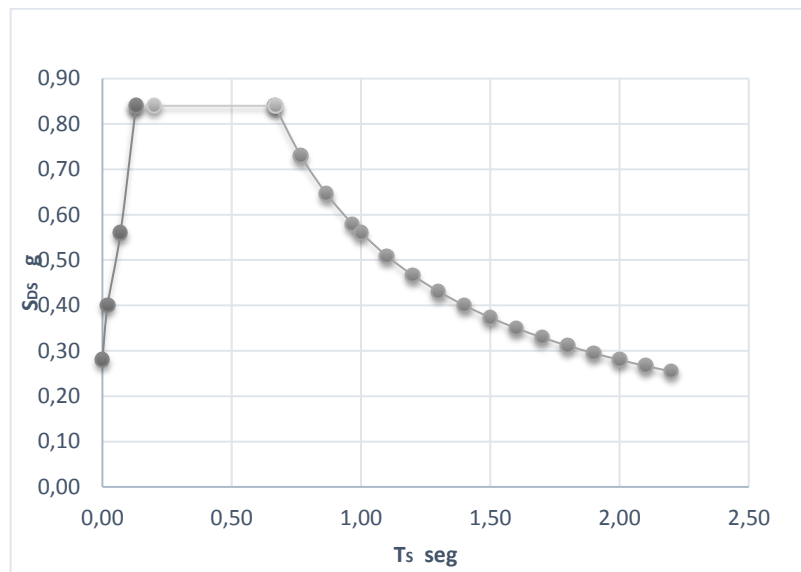
6.1.2 Espectro de diseño. Con el fin de conocer el comportamiento dinámico de la estructura frente a la aceleración producida por las ondas sísmicas, se calculó el espectro de diseño, basándose en el Código Colombiano de Puentes CCP-14, donde se consideran valores promedios de espectros de respuesta de varios terremotos representativos de la zona, teniendo en cuenta la mayor o menor dispersión de datos para determinar si la desviación estándar es baja o alta. En el Cuadro 1, se muestran los parámetros de diseño que se tomaron de la norma CCP-14, Capítulo 3.10 Efectos Sísmicos, para evaluar el espectro de diseño sísmico y eólico del puente peatonal, y en la Figura 16, se muestra el espectro de diseño respectivo.

Cuadro 1. Parámetros sísmicos puente Sasaima

Datos CCP-14	
Lugar	Sasaima
Zona	8
PGA	0,4
Ss	0,8
S1	0,4
Perfil del suelo	C
Fpga	1
Fa 0.2s	1,05
Fv 1.0s	1,4

Fuente Autores.

Figura 17. Espectro elástico de aceleraciones de diseño



Fuente Autores.

6.1.3 Evaluación de cargas. Comprende todo el análisis empleado para determinar las cargas permanentes y de servicio que presenta el puente peatonal.

6.1.3.1 Carga muerta (SD). La carga muerta (SD) hace referencia al peso propio de los elementos permanentes de la estructura. Se tomó como referencia el capítulo G-12 de la norma NSR-10 para obtener las características propias del material. Las dimensiones generales del culmo de bambú guadua para este diseño son de $D_{ext} = 10 \text{ cm}$; $t = 1,20 \text{ cm}$.

$$\gamma_{guadua} = 800 \text{ kgf/m}^3$$

$$A_n = \frac{\pi}{4} * (D_{ext}^2 - (D_{ext} - 2 * t)^2) \rightarrow A_n = 3317,52 \text{ mm}^2$$

Tabla 2. Carga muerta

Ítem	Carga kN/m
Teja	0,035
Instalaciones	0,05
Latas de guadua	0,023
Por tensores	0,003
Cordón superior 2 guaduas	0,006
Cordón inferior 2 guaduas	0,006
Peso de baranda	0,003
Peso de tableta de caucho	0,016
Otros elementos vigas, puntales, trav, cruz	0,006
Placa superboard 1cm	0,0075
Peso de mortero	0,0028
Total, carga muerta =	0,1583

Fuente Autores.

Para el volumen del mortero se utilizó la siguiente ecuación:

$$Volumen \text{ mortero} = \left(\frac{\pi * d^2}{4} * Longitud \text{ mortero} \right)$$

$$Volumen \text{ de mortero} = 3.45m^3$$

Donde:

La → longitud del mortero, recomendación de 0,300 m

d → diámetro interno de la guadua, aproximadamente 0,088 m

6.1.3.2 Carga viva (L). Las cargas vivas son aquellas cargas producidas por el uso y ocupación de la edificación. Con base en la Guía de especificaciones para el diseño de puentes peatonales publicado por la AASTHO, se determinó emplear una carga viva (L) para puentes peatonales de 415 kg/m², que equivale a 85 lb/ft².

Ancho aferente = 0,920 m

Carga viva = 415 kg/m² * 0,920 m = 381,800 kg/m = 3.8 kN/m

6.1.3.3 Carga de viento (Ws). La carga de viento se calculó a partir de las recomendaciones estipuladas por la AASTHO para puentes de armadura abierta, donde el aire pasa fácilmente a través de sus elementos.

$$F_h = 171 \text{ kg/m}^2 * 9,64 \text{ m}^2 = 1.649 \text{ kg}$$

Esta fuerza se distribuye por metro sobre todos los elementos de guada vertical y diagonales de las caras exteriores del volumen central. Longitud de estos elementos = 31,30 m

$$W_s = 1.649 \text{ kg} / 31,30 \text{ m} = 52,68 \text{ kg/m} = 0,52 \text{ kN/m}$$

6.1.3.4 Combinaciones de carga. Los porcentajes, la tensión admisible para el diseño de servicios de carga y los factores de carga se obtuvieron, al igual que las cargas anteriormente mencionadas, de la Guía de especificaciones para puentes peatonales de la AASTHO – 97 y de las especificaciones estándar para puentes de carretera. En la Tabla 3, se muestran las diferentes combinaciones usadas en el modelado de la estructura del puente en SAP2000.

Tabla 3. Combinaciones de carga de la estructura

Joint	OutputCase	CaseType
1	DEAD	LinStatic
1	EY	LinStatic
1	FSX	LinStatic
1	CM	LinStatic
1	CV	LinStatic
1	CVIENTO	LinStatic
1	0,7Fsx	LinStatic
1	0,7fsy	LinStatic
1	WS	LinStatic
1	EQX	LinStatic
1	EQy	LinStatic
1	L	LinStatic
1	COMB1	Combination
1	COMB2	Combination
1	COMB3	Combination
1	COMB4	Combination
1	COMB5	Combination
1	COMB6	Combination
1	COMB7	Combination
1	COMB8	Combination
1	COMB9	Combination
1	COMB10	Combination

Fuente Autores.

Tabla 3. (Continuación)

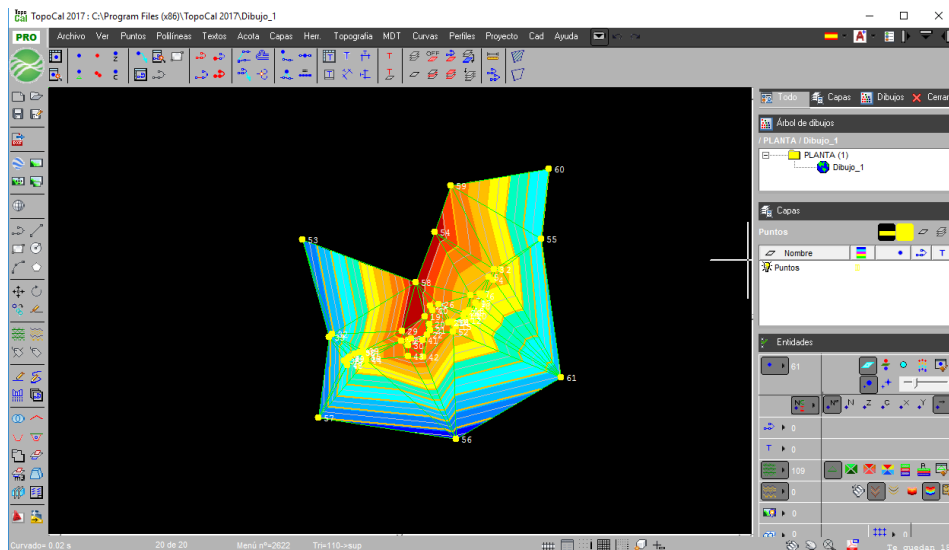
Joint	OutputCase	CaseType
1	COMB11	Combination
1	COMB12	Combination
1	ENV	Combination
1	ENV	Combination

Fuente Autores.

6.2 PREDIMENSIONAMIENTO DE LA SUPERESTRUCTURA DEL PUENTE

El levantamiento topográfico se realizó en la finca *El Centenario* en el Municipio de Sasaima, Cundinamarca (UTM +18), mediante el empleo de una estación total de la marca Topcon perteneciente a la Universidad Santo Tomás. Se usó el método de radiación por poligonal cerrada para obtener los datos respectivos de altimetría y planimetría del lugar. Mediante el software Topcon Link, se extrajeron o descargaron los datos de coordenadas de la estación total al computador, específicamente a tablas de Excel, ver Anexo A. Para la obtención de curvas de nivel, se exportaron los datos de coordenadas al software TopoCal, el cual, calcula e interpola las curvas de campo mediante el método de triangulación (MDT), como se muestra en la Figura 17. Se finalizó con la elaboración de las curvas topográficas en AutoCAD, tal y como se muestra en la Figura 18, y la ubicación de la estructura del puente en el terreno, ver Figura 19.

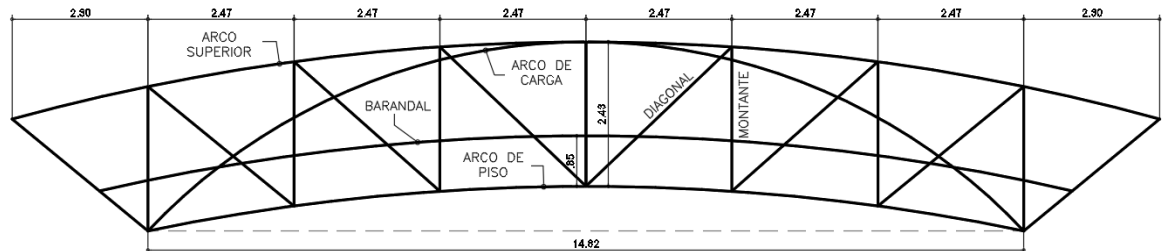
Figura 18. Triangulación de puntos topográficos en Topocal



Fuente Autores.

Para identificar el diseño óptimo se evaluó bibliografía y se identificaron los aspectos más relevantes para el proyecto. Partiendo del criterio establecido, se identificó un número reducido de tipos de diseño, los cuales fueron analizados y evaluados con mayor precisión. El tipo seleccionado fue la cercha tipo Pratt, identificada como la óptima en el proyecto que nos ocupa como se ve en la Figura 20.

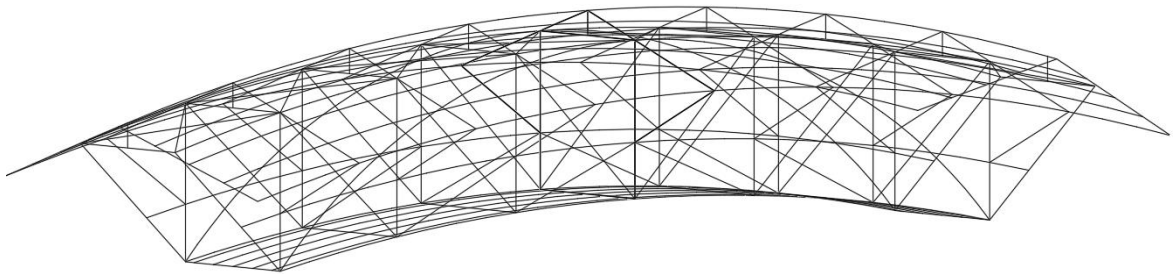
Figura 21. Cercha tipo Pratt combinada con arcos de resistencia



Fuente Autores.

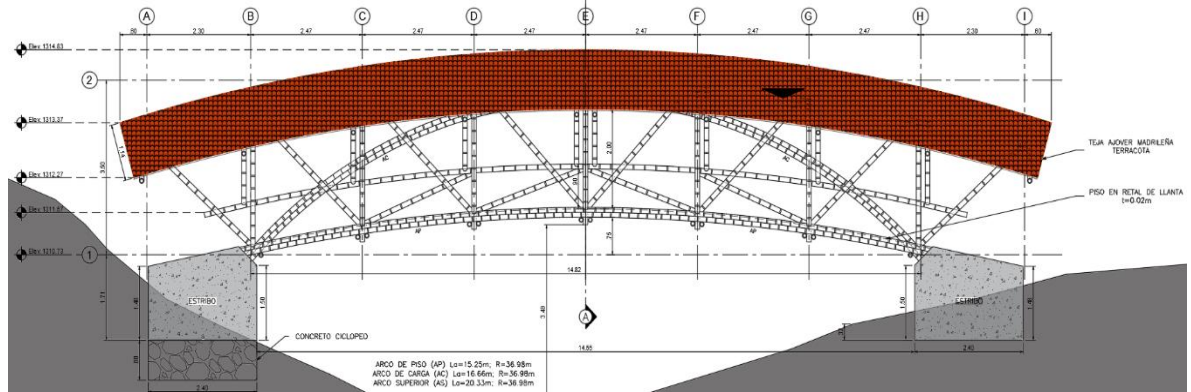
La estructura principal está conformada por arcos compuestos de unidades en guadua que están arriostrados entre sí por diagonales mediante uniones mecánicas que en conjunto forman una estructura en celosía tridimensional. Teniendo también una placa que será el tablero peatonal que se proyecta en latas hechas en guadua. De esta manera se busca formar una estructura estable, funcional y llamativa a la vista. El resultado obtenido de realizar el modelamiento de la estructura seleccionada se presenta a continuación.

Figura 22. Imagen tridimensional de la estructura



Fuente Autores.

Figura 23. Corte longitudinal del puente peatonal



Fuente Autores.

Debido al proceso anteriormente descrito, es posible afirmar que la metodología aplicada, en búsqueda de satisfacer el primer objetivo fue la adecuada, y se buscó en cada actividad obtener la mayor precisión en los datos.

Las limitaciones de este objetivo fueron pocas, dado que existen documentos (los cuales fueron consultados) en los que se recomiendan determinados tipos de estructuras para trabajar con guadua, así que el análisis comparativo se realizó con un número limitado de posibilidades y empleando un criterio acorde a las necesidades. Adicionalmente, los procesos de obtención de parámetros necesarios para el desarrollo de este objetivo, como el levantamiento topográfico y el uso de software fueron realizados empleando equipo de alta precisión, en busca de garantizar la precisión en los mismos.

Los resultados expuestos en el desarrollo de este objetivo pueden ser aplicables a proyectos similares, dado que para este tipo de estructuras la cercha tipo Pratt presenta muchos beneficios, en cuanto a la distribución de cargas y estética.

La estructura seleccionada es recomendada por el conocido carpintero Jörg Stamm quien ha realizado diversas estructuras empleando como material principal la guadua, de este autor fueron consultada literatura con el fin de basar el criterio de selección.

Aun no existe un reglamento que indique ampliamente parámetros de diseño para estructuras en guadua, por lo cual es un tema que está abierto a investigación y se hace evidente en el proyecto presentado.

7. RESULTADOS Y DIVULGACIÓN

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del diseño del puente; comprende el cálculo estructural de la superestructura con base en las normas vigentes de puentes como la CCP-14, AASTHO LFRD y NSR-10, partiendo de la modelación y asignación de materiales, cargas, combinaciones de cargas, secciones, entre otros, en el programa SAP 2000; se analizan los resultados obtenidos del modelamiento respectivo con el capítulo G-12 del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 para verificar si los elementos cumplen por esfuerzos admisibles, o de lo contrario, deben ser redefinidos y rediseñados. Se culminará con la elaboración de la programación y presupuesto, así como los planos definitivos del diseño del puente en bambú guadua con ayuda del programa AutoCAD.

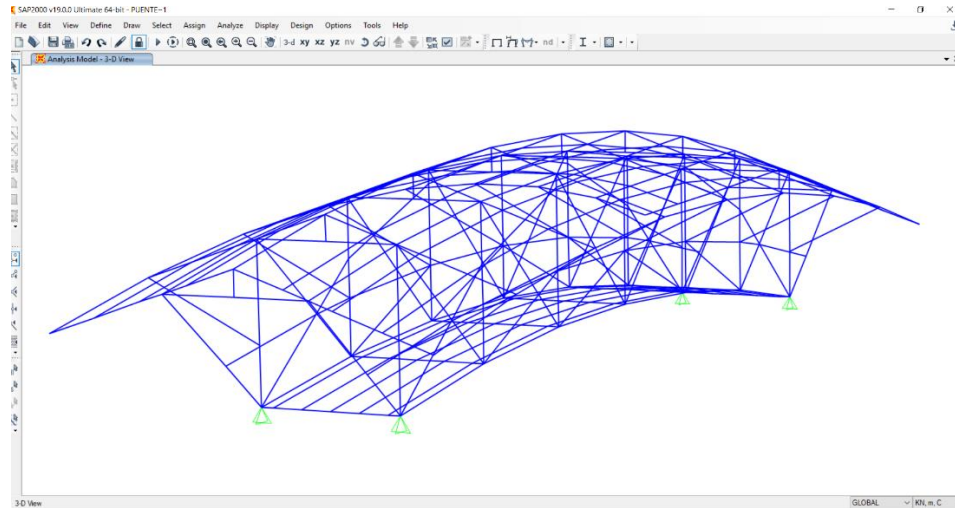
7.1 ESFUERZOS ACTUANTES Y DESPLAZAMIENTOS DE LA ESTRUCTURA EN EL SOFTWARE SAP2000

Luego de tener en cuenta todos los parámetros necesarios para el predimensionamiento del puente peatonal según la normativa, se realizó el modelado de la estructura en el programa SAP 2000 empleando las cargas y propiedades de los materiales expuestos anteriormente, para así hallar las deflexiones y los esfuerzos actuantes en los elementos de la estructura.

Al realizar el primer análisis de la estructura con el modelo propuesto y con un elemento de guadua de 10 cm de diámetro y 1,2 cm de espesor en cada sección del modelo, se buscó identificar las secciones que requerirían el refuerzo con un elemento adicional de guadua, en el primer análisis se encontró que la estructura no cumplía con la normativa requerida, por ende, se realizó la modificación añadiendo otro elemento de guadua en las secciones de los arcos y las diagonales, posterior a eso, se volvió a cargar el sistema, teniendo en cuenta las variaciones de las cargas al modificar la estructura.

En la Figura 24, se puede apreciar el diseño estructural que se empleó para modelar la estructura en el software SAP2000.

Figura 24. Modelado de la estructura en SAP2000



Fuente Autores.

Para saber si la estructura cumple con la normativa necesaria, primeramente, se analizó los desplazamientos máximos de los elementos del puente, ver Cuadro 2, y se compararon con el desplazamiento máximo permitido por la Guía de Especificaciones para Puentes Peatonales AASHTO del 1997 de $L/500$, verificando que no sobrepasen este valor.

$$\delta_{adm} = \frac{14,82}{500} = 0,0296 \text{ m}$$

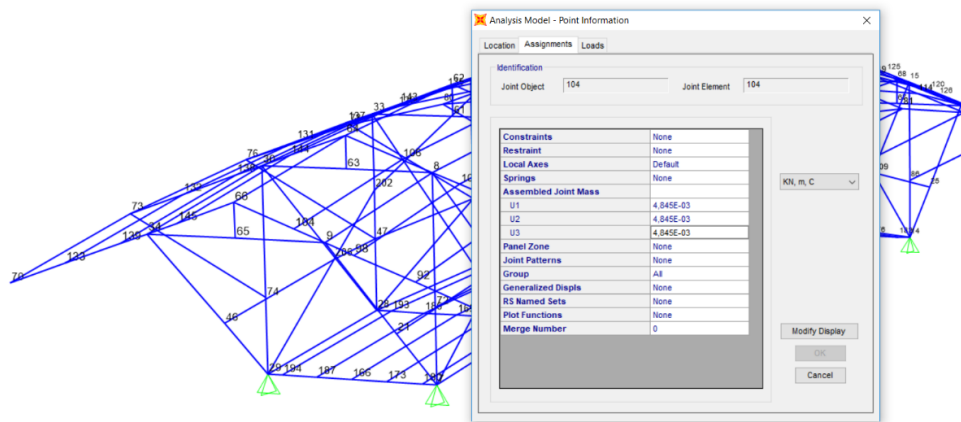
Cuadro 2. Desplazamientos máximos de la estructura

Joint	Outputcase	U1	U2	U3
104	DEAD	0,000318	-0,000006656	0,000334
145	DEAD	0,000319	0,000004116	0,000334
174	DEAD	0,000173	0,000001127	0,000265
188	DEAD	0,000173	7,332E-07	0,000265

Fuente Autores.

Como se evidencia en el Cuadro 2, el desplazamiento máximo encontrado (U3) se presentó en el nodo 104, ver Figura 25, y 145 referentes a los elementos de cubierta del voladizo, seguidos de los elementos del tablero en el centro de la luz pertenecientes a los nodos 174 y 188, los cuales cumplen con el parámetro de desplazamiento máximo admisible.

Figura 25. Desplazamiento máximo de la estructura en el nodo 104



Fuente Autores.

En el Anexo B, se presenta la tabla completa con los desplazamientos de la estructura que se generaron a partir del modelado en el software SAP2000. En esta tabla, se comprueba que para este modelo los desplazamientos cumplen con los parámetros normativos requeridos por las diferentes normas vigentes de puentes peatonales en Colombia.

Los esfuerzos actuantes que se encontraron en los elementos de la superestructura del puente, se muestran en las *tablas resumen* del CD anexo a este documento, en la sección de cálculos, además, se pueden evidenciar en las tablas de *diseño de elementos mediante el capítulo G-12*. Esta tabla demuestra que los esfuerzos que se generan en los diferentes elementos cumplen con los esfuerzos admisibles denotados por el Capítulo G-12 Estructuras de Guadua del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10.

Realizar el análisis de los resultados obtenidos y compararlos con parámetros establecidos por las normas aplicables, permitió identificar los elementos que debían ser reforzados, paso esencial para establecer la estructura definitiva, por lo cual es posible afirmar que los resultados obtenidos son adecuados para satisfacer la parte del proceso en la cual serán empleados.

La metodología aplicada es la usualmente establecida para evaluar los proyectos estructurales, dado que los análisis matemáticos efectuados por los programas de diseño, permiten evaluar, rápida y efectivamente, el comportamiento de una estructura y sus elementos al ser sometidos a diferentes combinaciones de cargas.

Entre las limitaciones, es necesario mencionar que la guadua, al ser un material natural y ortotropico, no posee unas características uniformes en todos sus especímenes, sin embargo, se mitigó la incertidumbre tomando como base estudios anteriores sobre las características del material, en busca de garantizar la calidad en la metodología.

No es posible generalizar los resultados obtenidos en el desarrollo de este objetivo, dado que en el desarrollo de este intervienen parámetros externos a la estructura tales como la presión del viento y el análisis sísmico, los cuales varían en función a la zona donde se desarrolle el proyecto.

El procedimiento para obtener los datos de los esfuerzos actuantes y desplazamientos requirió del conocimiento de características del material, datos, a partir de los cuales el software puede realizar operaciones matemáticas que lleven a obtener resultados confiables. Las características fueron consultadas en documentos de investigación cuyo objetivo fue la obtención de los mismos.

Aun no existe un reglamento que indique ampliamente parámetros de diseño para estructuras en guadua, por lo cual es un tema que está abierto a investigación y se hace evidente en el proyecto presentado. Así mismo se hacen evidentes los beneficios del uso de este material en cuanto a su resistencia frente a un sismo.

7.2 DISEÑO DEFINITIVO ESTRUCTURAL

Con la verificación de desplazamientos y esfuerzos actuantes de la estructura realizada en el capítulo anterior, se procedió a realizar el diseño definitivo del puente peatonal mediante el método de los esfuerzos admisibles de la norma NSR-10, Capítulo G-12. Este diseño, permite determinar el número de culmos de guadua que se requieren por la norma para resistir los diferentes esfuerzos que se presentan en la estructura. A continuación, se muestra el diseño de la diagonal 66 solicitada a compresión y flexión.

Cuadro 3. Diseño elemento Diagonal 66 por el G-12

ELEMENTO	TIPO DE SOLICITACIÓN	SECCIÓN
DIAGONAL No. 66	Compresión	G1
Longitud del elemento (m)	2,67	
Solicitación a compresión (kN)	1,75	
Solicitación a Tensión (kN)	0	
Solicitación a flexión (kN * m)	0,063	
Solicitación cortante (kN)	0	

Fuente Ing Rodolfo Felizzola.

Cuadro 3. (Continuación)

ELEMENTO SOLICITADO A COMPRESIÓN		
PROPIEDADES DEL ELEMENTO		
Numero de Culmos	1	
Diámetro externo [D]	100	mm
Diámetro interno [d]	76	mm
Espesor [t]	12	mm
Long. no soportada lateralmente, lu	2,6700	m
Coeficiente de long. Efectiva, k	1	
Longitud efectiva [Le]	2,67	m
Inercia [I]	3,27108E-06	m4
Inercia total [I]	3,2711E-06	m4
Área neta [A]	3317,52	mm2
Área neta total [A]	3317,52	mm2
Radio de giro [r]	31,40	mm
Esbeltez, ck	59,37	
Esbeltez [I]	85,03	col larga
Módulo de sección [s]	32710,77	mm3
PROPIEDADES DE LA GUADUA (NSR10)		
Módulo de elasticidad promedio [E0.5]	9500	MPa
Módulo percentil 5 [E0.05]	7500	MPa
Módulo mínimo [Emin]	4000	MPa
Esf. Admisible a flexión [Fb]	15	MPa
Esf. Admisible a tracción [Ft]	19	MPa
Esf. Admisible a compresión paralela al eje longitudinal [Fc]	14	MPa
Esf. Admisible a compresión perpendicular al eje longitudinal [Fp]	1,4	MPa
Esf. Admisible a corte [Fv]	1,2	MPa
COEFICIENTES DE MODIFICACIÓN		
Por duración de carga [CD]	1	
Por contenido de humedad [Cm]	1	
Por temperatura [Ct]	1	
Por estabilidad lateral de vigas [CL]	1	
Por forma [CF]	1,12	

Fuente Ing Rodolfo Felizzola.

Cuadro 3. (Continuación)

COEFICIENTES DE MODIFICACIÓN		
Por redistribución de cargas [Cr]	1	
Por estabilidad de columnas [Cp]	0,57	
Por cortante [Cc]	1	

PROPIEDADES DEL MATERIAL AFECTADOS POR LOS COEFICIENTES		
Esf. Admisible a flexión [F'b]	18	MPa
Esf. Admisible a tracción [F't]	19	MPa
Esf. Admisible a compresión paralela al eje longitudinal [F'c]	7,98	MPa
Esf. Admisible a compresión perpendicular al eje longitudinal [F'p]	1,4	MPa
Esf. Admisible a corte [F'v]	1,2	MPa

REVISIÓN POR COMPRESIÓN AXIAL		
Esfuerzo máximo, fc	3,42	MPa

REVISIÓN POR FLEJO COMPRESIÓN		
Fuerza de compresión actuante, Na	1,7500	kN
Momento actuante	0,0630	kN.m
Esbellez Ck	59,37	col larga
Esf. de compresión paralelo a la fibra actuante [fc]	3,42	MPa
Esf. de flexión actuante [fb]	1,9	MPa
Carga critica de euler, Ncr	33965	N
Coefficiente de magnificación de momentos [km]	1,08	
Relación	0,54	OK

DISEÑO DE ELEMENTO A FLEXION

PROPIEDADES DEL ELEMENTO		
Numero de Culmos	1	
Diámetro externo [De]	100	mm
Diámetro interno [d]	76	
Espesor [t]	12	mm
Longitud [L]	2,6700	m
Inercia [I]	3,27E-06	m4
Inercia total [I]	3,27E-06	m4
Área neta [A]	3318	mm2

Cuadro 3. (Continuación)

PROPIEDADES DEL ELEMENTO		
Área neta total [A]	3318	mm ²
Radio de giro [r]	31,40	mm
Esbeltez [l]	85,03	
Módulo de sección [S]	32711	mm ³

PROPIEDADES DE LA GUADUA (NSR10)		
Módulo de elasticidad promedio [E0.5]	9500	Mpa
Módulo percentil 5 [E0.05]	7500	Mpa
Módulo mínimo [Emin]	4000	Mpa
Esf. Admisible a flexión [Fb]	15	Mpa
Esf. Admisible a tracción [Ft]	18	Mpa
Esf. Admisible a compresión paralela al eje longitudinal [Fc]	14	Mpa
Esf. Admisible a compresión perpendicular al eje longitudinal [Fp]	1,4	Mpa
Esf. Admisible a corte [Fv]	1,2	Mpa

COEFICIENTES DE MODIFICACIÓN		
Por duración de carga [CD]	1	
Por contenido de humedad [Cm]	1	
Por temperatura [Ct]	1	
Por estabilidad lateral de vigas [CL]	1	
Por forma [CF]	1,12	
Por redistribución de cargas [Cr]	1	
Por estabilidad de columnas [Cp]	0,71	
Relación I/De	27	
Por cortante [Cc]	1	

PROPIEDADES DEL MATERIAL AFECTADOS POR LOS COEFICIENTES		
Esf. Admisible a flexión [F'b]	16,8	MPa
Esf. Admisible a tracción [F't]	18	MPa
Esf. Admisible a compresión paralela al eje longitudinal [F'c]	9,94	MPa
Esf. Admisible a compresión perpendicular al eje longitudinal [F'p]	1,4	MPa
Esf. Admisible a corte [F'v]	1,2	MPa

Fuente Ing Rodolfo Felizzola.

Cuadro 3. (Continuación)

RESISTENCIA A FLEXION			
Momento actuante [M]	0,0630	kN.m	
Esfuerzo a flexión actuante [fb]	1,93	MPa	OK

Fuente Ing Rodolfo Felizzola.

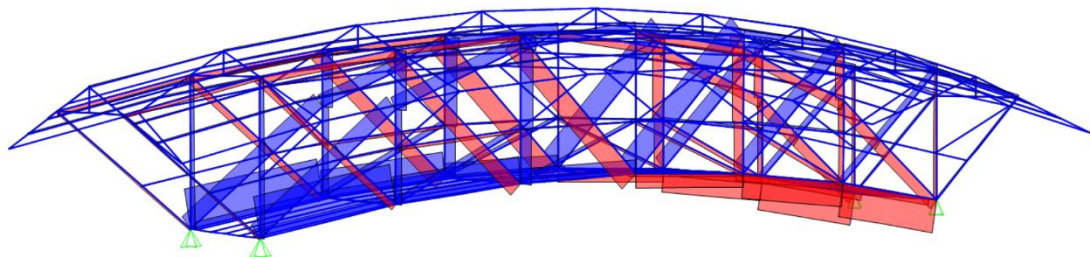
Como se puede apreciar en el Cuadro 3, el elemento 66 cumple con cada parámetro establecido por la norma, ya sea por diseño a compresión o a flexión, concluyendo que el elemento trabaja con una sección de 1 solo culmo de guadua y es capaz de soportar los esfuerzos actuantes a los que es sometido. De esta manera se evaluaron todos los elementos estructurales del puente peatonal.

Las tablas completas del diseño por el G12 de los diferentes elementos estructurales del puente peatonal se encuentran en el CD anexo en la sección *Cálculos*. Los elementos críticos de la superestructura del puente se presentaron en el centro de la luz, debido a que están conformados por varias uniones o conexiones emperradas, que en cierta manera alteran la continuidad del elemento.

La mayoría de elementos cumplió con 1 solo culmo de guadua a excepción de las diagonales que se diseñaron para 2 culmos en sentido horizontal, al igual que los arcos de resistencia.

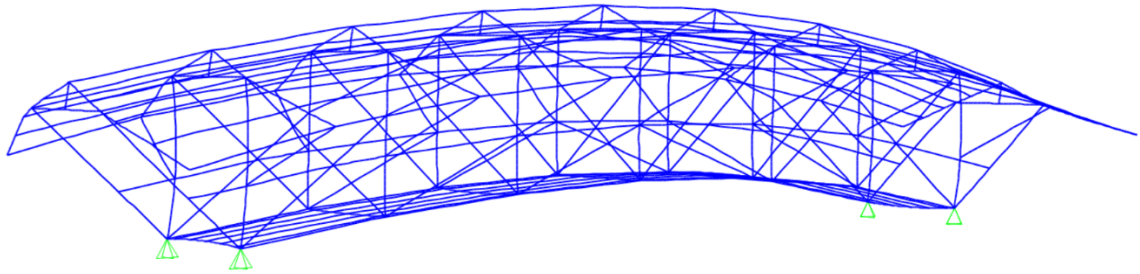
En la Figura 26, se muestra el comportamiento de los elementos debido a fuerzas internas, los rojos son tensión y los azules compresión. En la Figura 27, se evidencia la deformación que presentó la estructura al estar cargada.

Figura 26. Solicitaciones de carga de los elementos estructurales del puente



Fuente Autores.

Figura 27. Deformación de la estructura

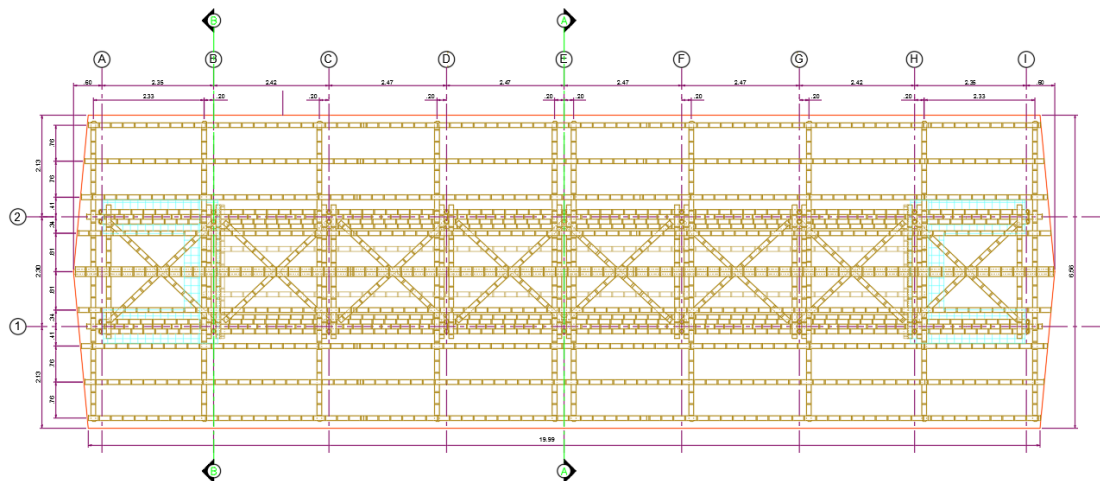


Fuente Autores.

Al culminar de evaluar todos los elementos de la superestructura del puente peatonal mediante el Capítulo G-12 de la norma NSR-10, se realizó los planos definitivos mediante el software Auto CAD, teniendo en cuenta todos los análisis establecidos en los cálculos. Los planos se encuentran Anexos a este documento.

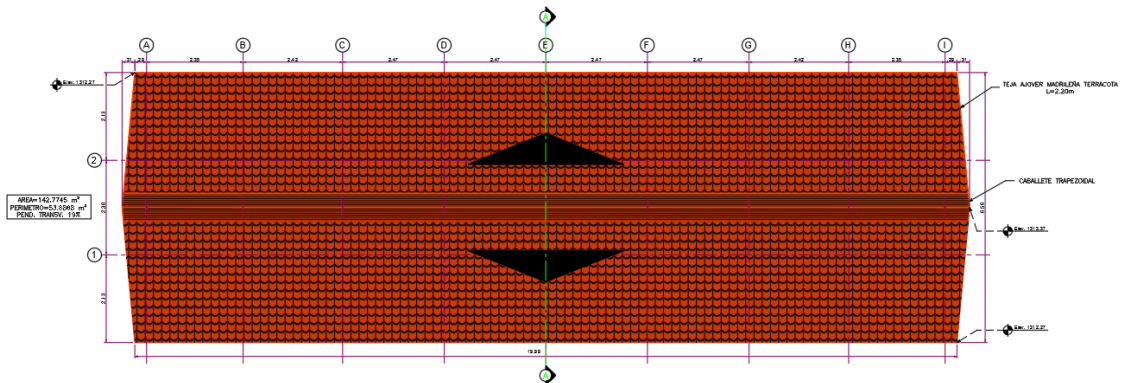
De la Figura 28 al 30, se muestra el diseño definitivo del puente peatonal en general.

Figura 28. Modelo definitivo de la estructura en planta



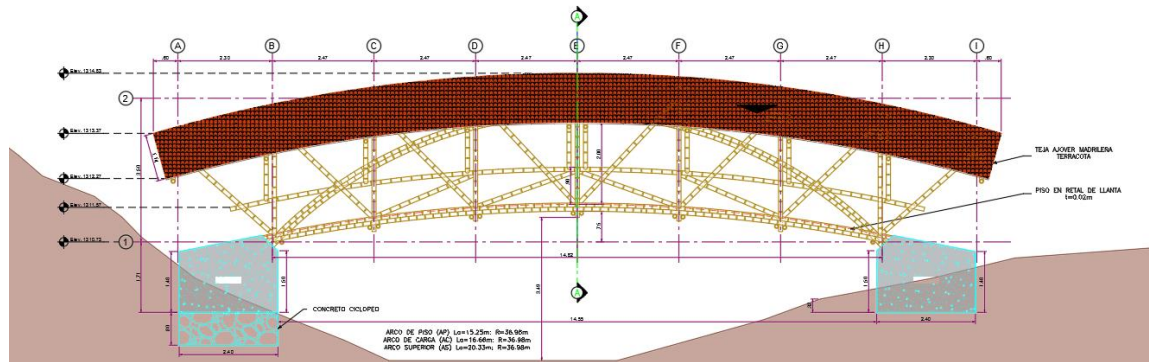
Fuente Autores.

Figura 29. Modelo definitivo del puente con cubierta



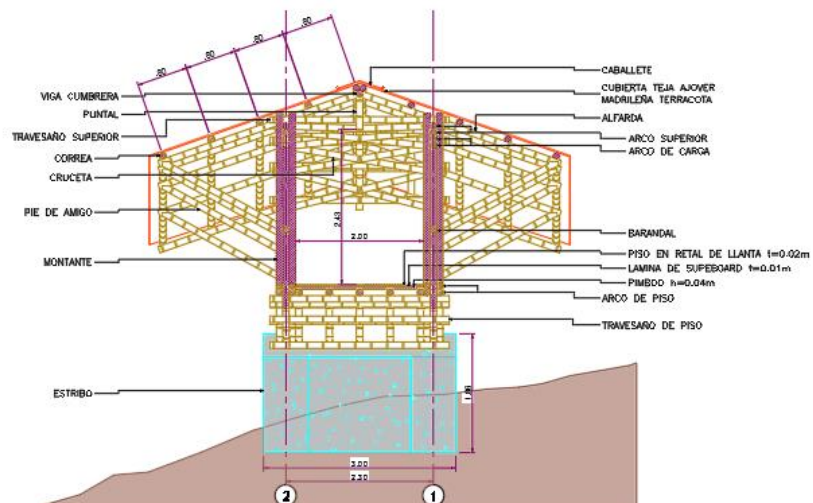
Fuente Autores.

Figura 30. Modelo definitivo del puente en vista longitudinal



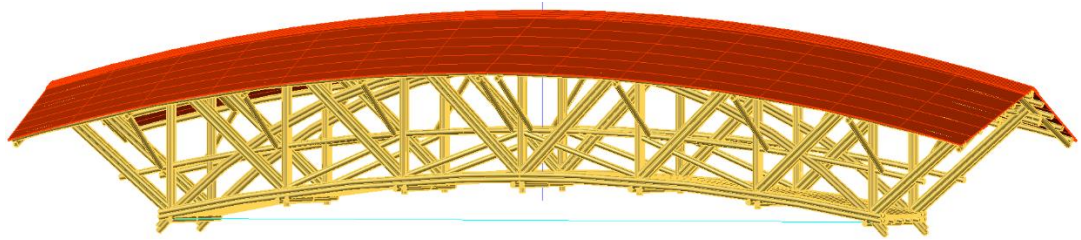
Fuente Autores.

Figura 31. Modelo definitivo del puente en corte transversal



Fuente Autores.

Figura 32. Modelo definitivo en 3D del puente peatonal



Fuente Autores.

Se buscó garantizar un diseño funcional y acorde a la normatividad que rige en el país, lo cual se logró, garantizando así seguridad para la integridad de las personas que usen la estructura, por ende, son adecuados los resultados obtenidos.

Nuevamente, es necesario mencionar que la metodología aplicada es la usualmente establecida para evaluar los proyectos estructurales, dado que los análisis matemáticos efectuados por los programas de diseño, permiten evaluar rápida y efectivamente el comportamiento de una estructura y sus elementos al ser sometidos a diferentes combinaciones de cargas, pero es el análisis de los datos obtenidos el que indica el adecuado funcionamiento del puente ante estas situaciones.

No se puede generalizar los resultados dada la variación en los datos que dependen de la zona donde se construirá el proyecto.

7.3 PROGRAMACIÓN Y PRESUPUESTO

El presupuesto de la obra se estimó siguiendo las actividades mencionadas a continuación:

- Identificación de longitudes y cantidades de elementos.
- Cuantificar uniones y cantidad de elementos requeridos.
- Determinar materiales de cubierta necesarios.
- Diseño del presupuesto estimando rendimientos, costo de los materiales y transportes

La estimación de un presupuesto difícilmente coincide al 100% con el valor real, dado que suelen presentarse constantes variaciones en los precios que en él influyen, sin embargo, se busca reducir la diferencia entre el precio estimado y el real partiendo de un análisis detallado de los requerimientos del proyecto, con el fin de obtener un valor justo con el cual debería ser ejecutado el mismo.

Cuadro 4. Presupuesto de obra puente peatonal

CUADRO DE ACTIVIDADES Y CANTIDADES DE OBRA					
PROYECTO	DISEÑO DE UN PUENTE EN BAMBÚ GUADUA AGUSTIFOLIA KUNTH UBICADO EN LA FINCA EL CENTENARIO PARA LA UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS				

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UN	CNT	VALOR UNITARIO (\$)	VALOR TOTAL (\$)
------	-------------	----	-----	---------------------	------------------

1	PRELIMINARES				
1,1	Campamento	m2	20		\$ 901.666,12
1,2	Replanteo	m2	90	\$ 4.743,98	\$ 426.958,03
1,3	Instalaciones provisionales (agua, luz, alcantarillado)	un	1		\$ 482.860,00
				Total cap. =	\$ 1.811.484,15

2	ESTRUCTURA EN GUADUA				
2,1	Diagonales	ml	103,36	\$ 29.008	\$ 2.998.232,07
2,2	Diagonales tipo B	ml	20,56	\$ 27.070	\$ 556.552,60
2,3	Montantes	ml	95,56	\$ 31.531	\$ 3.013.064,52
2,4	Travesaños superiores	ml	44,80	\$ 25.711	\$ 1.151.836,43
2,5	Travesaños inferiores	ml	33,60	\$ 32.625	\$ 1.096.186,95
2,6	Crucetas	ml	48,71	\$ 31.644	\$ 1.541.379,23
2,7	Puntales	ml	5,04	\$ 25.694	\$ 129.496,88
2,8	Pies de amigo	ml	34,88	\$ 25.330	\$ 883.497,99
2,9	Alfardas	ml	66,40	\$ 28.948	\$ 1.922.128,16
2,10	Arcos superiores	ml	81,22	\$ 27.070	\$ 2.198.599,33
2,11	Arcos de carga	ml	66,96	\$ 27.070	\$ 1.812.585,71
2,12	Barandales	ml	31,72	\$ 27.070	\$ 858.650,22
2,13	Arcos de piso	ml	122,72	\$ 27.070	\$ 3.321.991,01

2,14	Arcos de piso interiores	ml	76,2 5	\$ 27.070	\$ 2.064.063,02
2,15	Correas	ml	205, 60	\$ 27.070	\$ 5.565.526,00
2,16	Viga cumbrera	ml	20,8 5	\$ 66.963	\$ 1.396.186,45
				Total cap. =	\$ 30.509.976,56

3	PISO				
3,1	Puente peatonal piso	m2	30,7 6	\$ 165.121	\$ 5.079.115,81
				Total cap. =	\$ 5.079.115,81

4	HÍERROS				
4,1	Varilla roscada Ø 3/8"	ml	248, 06	\$ 2.845	\$ 705.623,88
4,2	Tuerca para paso de Ø 3/8"	un	1383	\$ 47	\$ 64.764,04
4,3	Arandela soporte para paso de Ø 3/8"	un	1383	\$ 93	\$ 128.621,64
				Total cap. =	\$ 899.009,56

5	CUBIERTA				
5,1	Cubierta puente peatonal	m2	143	\$ 82.745	\$ 11.813.894
5,2	Tornillos fijación espigo galvanizado de 3/16" de 250mm	un	571	\$ 500	\$ 285.556
5,3	Arandelas EPDM tipo sombrilla	un	571	\$ 533	\$ 304.172
5,4	Tuerca para paso de Ø 3/16"	un	571	\$ 111	\$ 63.393
				Total cap. =	\$ 12.467.014,52

6	ACABADOS				
6,1	Impranol	gal ón	10,5 8	\$ 12.519	\$ 132.449
				Total cap. =	\$ 132.448,53

7	LIMPIEZA GENERAL				
7,1	Aseo general final de la obra	m2	200, 00	\$ 7.738	\$ 1.547.696,91
				Total cap. =	\$ 1.547.696,91

8	TRANSPORTE DE MATERIAL SOBRANTE				
8,1	Material sobrante	m3	70	\$ 65.216	\$ 4.565.149
				Total cap. =	\$ 4.565.148,88

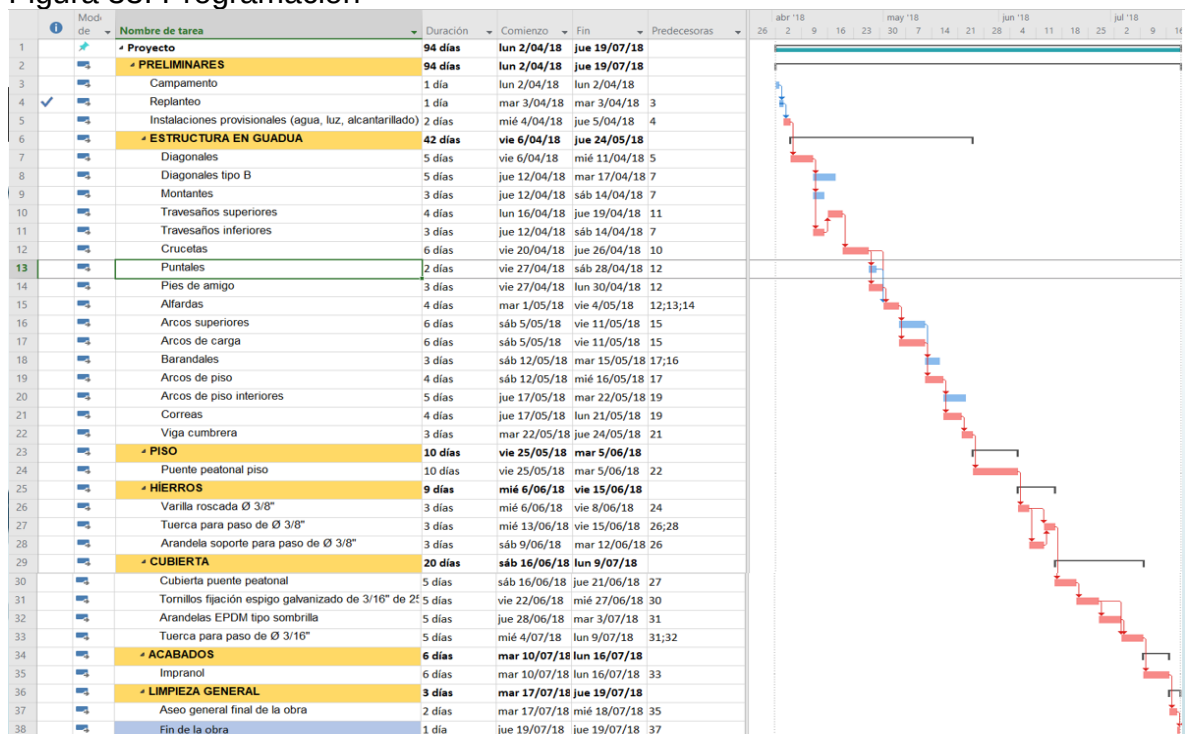
SUB- TOTAL DE LA SUPERESTRUCTURA (\$) =				\$ 57.011.895	
ADMINISTRACION IMPREVISTOS Y UTILIDAD				25%	\$ 14.252.974
COSTO TOTAL SUPERESTRUCTURA (\$) =				\$ 71.264.868,65	

Fuente Autores.

El Cuadro 4, muestra la información relevante del presupuesto para lograr construir la superestructura del puente peatonal en guadua, el cual represento un acumulado de \$ 71.264.868. El análisis respectivo del presupuesto elaborado se encuentra en el CD anexo a este documento, según se explica en el Anexo D.

Con base en la información obtenida en el presupuesto, se elaboró la programación de obra, considerando solamente la superestructura, tal y como se muestra en la Figura 33.

Figura 33. Programación



Fuente Autores.

La metodología es la adecuada, ya que contempla los materiales y procedimientos y en general los recursos necesarios para la construcción del puente.

Los resultados del presupuesto no se pueden generalizar, dado que el precio de los materiales cambia en función a la disponibilidad, distancia del proyecto y en función del tiempo.

Para desarrollar este objetivo se aplicaron los conocimientos obtenidos durante el curso de costos y presupuestos.

Se encontró que el uso de la guadua como material de construcción lleva a la reducción de costos y a la mitigación del impacto ambiental que todas las obras producen, por lo cual se sugiere con este documento, una mayor atención al material, para realizar este y otros tipos de estructuras, lo cual a su vez incrementaría la demanda del producto y el interés de las empresas por ofrecerlo y estudiarlo.

8. CONCLUSIONES

- El proyecto a conseguir fue el diseño de la superestructura de un puente peatonal ubicado en la finca *El Centenario* de la Universidad Santo Tomás en Sasaima - Cundinamarca, usando principalmente el Bambú *Guadua angustifolia* Kunth como material principal, para solucionar el problema de tránsito peatonal en la finca y así optar por el título de ingenieros civiles.
- Si se logró completar el alcance del proyecto plasmado en este documento, pese a las constantes demoras e inconformidades que se presentaron al no contar con normas de diseño de puentes peatonales en guadua.
- Al realizar el levantamiento topográfico en la ubicación del proyecto, se encontró un terreno accidentado con una depresión artificial bajo el puente actual de 4,00 m. Se estableció la conveniencia de rellenar aproximadamente 1,83 m en la zona más baja (inicio del puente) para darle nivel al terreno, permitiendo de esta manera, la construcción de una estructura simétrica, que represente beneficios arquitectónicos e ingenieriles a la hora de evaluar las cargas.
- La geometría del puente peatonal consistió en una cercha tipo Pratt combinada con arcos de resistencia, (debido a que los arcos son capaces de soportar grandes cargas distribuidas) dividida en 6 módulos de 2,47 x 2,50 x 2,80 m (entre ejes) y 2 voladizos de 2,30 m en cada extremo, con una placa de piso elaborada en latas de guadua de 4 cm, una superborad de 1 cm y tabletas de caucho de 2 cm, y una cubierta en teja madrileña a 2 aguas. Se estableció una altura estática de 75 cm.
- Según el análisis estructural que se elaboró mediante el software SAP200 y el Capítulo G-12 de la NSR-10, se puede concluir que todos los elementos cumplieron con secciones de guadua de 10 cm de diámetro y 1,2 cm de espesor, ya que gran parte de la carga es soportada por los arcos a compresión.
- La deflexión máxima encontrada en la estructura se presentó en los elementos de cubierta del voladizo, con un valor de 0,00034 m, seguidos de los elementos del tablero en el centro de la luz con un valor de 0,000265 m, esto se debe a que esta estructura trabaja muy semejante a una viga simplemente apoyada.
- Los únicos elementos que presentan 2 números de culmos de guadua por sección son los arcos de resistencia (piso, carga y superior) y las diagonales de las celosías, al poseer la mayor cantidad de carga de la estructura.

- Al lograr garantizar una estructura acorde a la normatividad se procedió a realizar el modelado en el software de diseño AutoCad con la cantidad de elementos establecidos y estableciendo el tipo de unión de los mismos. Se diseñaron las uniones o conexiones del puente peatonal tipo empernadas con la técnica del *groouting* o inyección de mortero 1:3, ya que este tipo de uniones son económicas y la adición del mortero mejora la resistencia al aplastamiento.
- El costo de la superestructura del puente se avaluó por 71.264.868 millones de pesos, y su construcción demorará alrededor de 3 meses.
- Lo más decisivo a la hora de completar el proyecto fue el acompañamiento por parte del director y el par académico, además de la responsabilidad que se le aplicó al desarrollo del documento. En cuanto a las actividades, lo más influyente fue lograr modelar el puente en SAP2000 con el fin de que cumpliera por deflexiones.
- Las dificultades a la hora de realizar el levantamiento y obtener los datos relevantes de la topografía del sector, consistieron, primeramente, en la lectura de datos del lado Este del puente por la existencia de una cerca de separación de propiedades, en donde no se permitió el ingreso de personal; la segunda fue por el riesgo existente a la hora de tomar datos cercanos a la depresión artificial, considerando la inclinación pronunciada en sus cercanías.
- Debido a la ausencia de guías metodológicas y normas para la construcción de puentes elaborados en bambú guadua, fue sumamente difícil adaptar las diferentes normas vigentes de puentes en Colombia para diseñar y calcular el puente en guadua de este documento. En varios momentos se tuvo que volver a correr los modelos por errores de interpretación o adaptación, así como cambios estratégicos para solucionar ciertas incongruencias en el cálculo estructural.
- Al realizar el análisis de la estructura se encontró que esta no cumplía con las especificaciones requeridas por la Norma Colombiana de Sismo Resistencia (NSR-10) Título G12: estructuras de madera y guadua, por lo tanto, se hizo la modificación de las secciones críticas, ajustando los parámetros respecto a la norma y también se utilizaron conexiones empernadas con adición de mortero.

- Se justificaron y aplicaron cargas en el modelado del puente, logrando obtener los esfuerzos en los elementos de la estructura para poder compararlos con parámetros establecidos en la normatividad aplicable.
- A través del análisis realizado en la comparación de valores en los esfuerzos de los elementos del diseño preliminar y los valores establecidos por la normativa fue posible establecer las modificaciones pertinentes para garantizar el cumplimiento de los parámetros y a su vez el adecuado funcionamiento de la estructura ante las cargas que en ella actúan (como el peso propio de la estructura) o podrían actuar (como las fuerzas horizontales de viento y sismo).
- Hemos aprendido con este trabajo de pregrado a diseñar y calcular puentes peatonales en guadua, así como el manejo y disposición de este grandioso material no convencional. Se aprendió de igual manera a mejorar los análisis de presupuesto para no perder plata en obras constructivas, así como la importancia que tiene la guadua para mejorar el impacto que generan las construcciones en materiales convencionales.
- Nosotros recomendaríamos a otras personas que se planteen un proyecto similar que tenga en cuenta que la guadua no está normalizada para el diseño y cálculo de puentes ni obras de gran envergadura, por lo que el trabajo que conlleva adaptar las normas vigentes de puentes en materiales convencionales a la guadua es de suma importancia. Considerar que la guadua no es un material isotrópico sino ortotrópico, que su sección transversal cambia con respecto a su longitud al ser un material cónico. Y, por último, que se tenga en cuenta los debidos procesos silviculturales y de inmunización para prevenir futuros deterioros por comportamiento de la guadua y por insectos xilófagos respectivamente.
- Según el diseño, los cálculos y el análisis realizado en el documento, se puede concluir que es factible la construcción del puente en la finca El centenario ubicado en Sasaima - Cundinamarca para la Universidad Santo Tomás, ya que, cumple con todos los parámetros y normativa necesaria para su construcción.

9. RECOMENDACIONES

- En los planos, se elaboró la geometría recomendada para los estribos de este puente peatonal, los cuales, si se desean implementar al proyecto, deben ser calculados y diseñados con base en un estudio de suelos pertinentes a la zona de influencia.
- Se debe tener presente los procesos silviculturales y constructivos de la guadua a la hora de disponer de este material en el ámbito constructivo, para evitar futuras fallas mecánicas o físicas.
- Igualmente, se debe incitar a la comunidad ingenieril en general, tanto entidades públicas como privadas, para elaborar una metodología, que sirva de reglamento o norma colombiana, que permita calcular puentes peatonales en este material.

BIBLIOGRAFÍA

ARIAS, Julia, et. al. Monografía de análisis de autores: Simón Vélez. Catedra de diseño arquitectónico [en línea]. Argentina. Universidad Nacional del Rosario. 2011. p. 18. [citado en 2016-09-16]. Disponible en Internet: <http://www.fceia.unr.edu.ar/darquitectonico/darquitectonico/data/pdf/simon_velez.pdf>.

BECERRA PEÑUELA, Edgar. Metodología para el cálculo estructural de puentes en guadua. Tesis magister en infraestructura vial. Bogotá (Colombia). Universidad Santo Tomás. 2017. p. 61.

CARMÍOL UMAÑA, Virginia. Bambú guadua, en puentes peatonales. Tecnología en marcha [en línea]. Enero-marzo, 2010. vol. 23, no. 1. p. 29-38. [citado en 2016-09-11]. Disponible en Internet: <<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4835859.pdf>>.

CASTAÑEDA, Henao, et al. Cambios en las propiedades físico-mecánicas de culmos de *Guadua angustifolia* como indicadores del estado de madurez. Recursos naturales y de ambiente [en línea]. 2013. No. 61. Bogotá (Colombia). [citado en 2016-09-15]. p. 26-31. Disponible en Internet: <<http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/7155/RRNA%2061%20completa.pdf?sequence=1#page=26>>.

DUMAR LOBO, Jorge, et al. Determinación de la variación de la resistencia a flexión y módulo de elasticidad longitudinal de la *Guadua angustifolia* Kunth, con el contenido de humedad [en línea]. Tesis de maestría de Ingeniero en Estructuras. Bogotá D.C. Universidad Nacional de Colombia. 2014. [citado en 2016-09-15]. p. 103. Disponible en Internet: <<http://www.bdigital.unal.edu.co/46209/1/269985.2014.pdf>>.

ECOHABITAR. La guadua: una maravilla natural de grandes bondades y prometedor futuro [en línea]. Octubre, 2013. [citado en 2016-09-11]. Disponible en Internet: <<http://www.ecohabitar.org/la-gadua-una-maravilla-natural-de-grandes-bondades-y-prometedor-futuro/>>.

EHRENBERG, Rachel. Earth Has 3 Trillion Trees Per New Count [La tierra tiene 3 billones de árboles, según nuevo conteo] [en línea]. Nature magazine. 2015. [citado en 2016-09-11]. Disponible en Internet:

<<https://www.scientificamerican.com/article/earth-has-3-trillion-trees-per-new-count-video/>>.

GUTIÉRREZ GONZÁLEZ, Mateo; TAKEUCHI TAM, Caori Patricia. Efecto del contenido de humedad en la resistencia a tensión paralela a la fibra del bambú *Guadua angustifolia* Kunth. Scientia et technica [en línea]. Septiembre, 2014. vol. 19, no 3. Pereira (Colombia). [citado en 2016-09-14]. p. 245-250. Disponible en Internet: <<http://www.redalyc.org/pdf/849/84932139003.pdf>>.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Cosecha y postcosecha del culmo de *Guadua angustifolia* Kunth. NTC-5300. Bogotá D.C. El Instituto, 2008. p. 5.

_____. Preservación y secado del culmo de *guadua angustifolia kunth*. NTC-5301. Bogotá. 2006. 3 p.

LAMUS BAEZ, Augusto; URAZAN BONELLS, Carlos y ANDRADE PARDO, Sofía. La *Guadua angustifolia* como alternativa para la construcción de puentes peatonales [en línea]. Epsilon, no. 23. Universidad de la Salle. Bogotá D.C. Octubre, 2013. Marzo, 2014. [citado en 2016-09-15]. p. 43-62. Disponible en Internet: <<https://revistas.lasalle.edu.co/index.php/ep/article/view/2514>>.

MARTÍNEZ FERNÁNDEZ, Jorge Antenor. Construcción de tableros y péndolas en puentes colgantes peatonales con bambú como material local [en línea]. Monografía para Especialista en análisis y diseño de estructuras de acero y hormigón armado. Cuenca (Ecuador). Universidad de Cuenca. 2015. [citado en 2016-09-15]. p. 142. Disponible en Internet: <<http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/21971/1/Monograf%C3%ADa.pdf>>.

MARTÍNEZ GARCÍA, Samuel. Bambú como material estructural: Generalidades, aplicaciones y modelización de una estructura tipo [en línea]. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Valencia (España). Universidad Politécnica de Valencia. 2015. [citado en 2016-09-16]. p. 44. Disponible en Internet: <<https://riunet.upv.es/handle/10251/55983>>.

MONTOYA GONZÁLEZ, Daniel, et al. Estudio de la composición y las propiedades mecánicas de los elementos de unión elaborados en *guadua* para estructuras

poliédricas de puentes y otras aplicaciones [en línea]. Tesis de grado Ingeniero Mecánico. Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira. 2016. [citado en 2016-09-15]. p. 40. Disponible en Internet: <<http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/7603/62012M798.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>.

NOLIVOS VALIENTE, Juan Carlos; DÍAZ YACELGA, Jaime Gonzalo. Estudio de conexiones entre elementos estructurales de caña guadua sometidos a carga axial [en línea]. Tesis de grado Ingeniero Civil. Quito (Ecuador). Escuela Politécnica Nacional. Mayo, 2010. [citado en 2016-09-15]. p. 127. Disponible en Internet: <<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/2651>>.

RENDÓN GARCÍA, Daniel, et al. Comparación de la resistencia a compresión de la *Guadua angustifolia* Kunth inmunizada y sin inmunizar sometida a diferentes ambientes climáticos [en línea]. Tesis Doctoral. Pereira. Universidad Libre Seccional Pereira. 2016. [citado en 2016-09-16]. p. 78. Disponible en Internet: <<http://repositorio.unilibrepereira.edu.co:8080/pereira/bitstream/handle/123456789/673/COMPARACION%20DE%20LA%20RESISTENCIA.pdf?sequence=1>>.

REVISTA SEMANA. Medellín: el puente en guadua que también colapsó [en línea]. Octubre, 2013. [citado en 2016-09-16]. Disponible en Internet: <<http://www.semana.com/nacion/articulo/colapso-puente-de-guadua-en-medellin/363057-3>>.

SILVA, Brand, et al. Caracterización física y mecánica de la guadua rolliza de la especie *angustifolia* Kunth mediante procesamiento digital de imágenes [en línea]. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Bogotá D.C. Universidad Militar Nueva Granada. 2016. [citado en 2016-09-15]. p. 32. Disponible en Internet: <http://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/7264/2/RESULTADOS_ENSAYOS.pdf>.

STAMM, Jörg. Diseño y construcción de puentes en guadua. [en línea]. Pereira, 2000. [citado en 2016-09-11]. p. 16. Disponible en Internet: <http://oab2.ambientebogota.gov.co/es/documentacion-e-investigaciones/resultado-busqueda/diseno-y-construccion-de-puentes-en-guadua>.

_____. La Evolución de los métodos constructivos en Bambú. Estrategias globales de desarrollo sustentable [en línea]. Marzo, 2008. Puebla (México). [citado en 2016-09-16]. p. 11. Disponible en Internet: <<https://febcd914-a-62cb3a1a-s>>.

sites.google.com/site/instrumentosdebambu/cursos/apostilas/ArquitecturayBambuJorgeStamm.pdf>.

STAMM, Jörg. Siete Conceptos para hacer un puente en Bambú [en línea]. Diciembre, 2010. [citado en 2016-09-16]. p. 1-21. Disponible en Internet: <https://www.academia.edu/6885668/Siete_Conceptos_para_hacer_un_Puente_en_Bambu>.

TAKEUCHI TAM, Caori. Caracterización mecánica del bambú guadua laminado para uso estructural [en línea]. Trabajo de tesis doctor en ingeniería ciencia y tecnología de materiales. Bogotá D.C. Universidad Nacional. 2014. [citado en 2016-09-15]. p. 247. Disponible en Internet: <<http://www.bdigital.unal.edu.co/46811/1/291494.2014.pdf>>.

TENORIO TACURI, Francisco Andrés. Elaboración de una metodología para la construcción de un puente peatonal en caña Guadua como resultado del análisis de una aplicación práctica [en línea]. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Sangolquí (Ecuador). Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. 2015. [citado en 2016-09-16]. p. 251. Disponible en Internet: <<https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/11414/5/T-ESPE-049123.pdf>>.

VALENCIA, Alejandra. Puentes en Guadua: Pasos sobre material constructivo eficiente. El Mueble La Madera [en línea]. Mayo, 2013. n° 72. [citado en 2016-09-11]. Disponible en Internet: <http://www.revista-mm.com/ediciones/rev72/arquitectura_pguadua.pdf>.

VASCONEZ MIRANDA, Kathia. Diseño de puentes peatonales utilizando caña guadua como elemento de construcción [en línea]. Trabajo de grado Ingeniera Mecánica. Guayaquil (Ecuador). Escuela Superior Politécnica del Litoral. 2009. [citado en 2016-09-15]. p. 116. Disponible en Internet: http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/13781/3/TESIS_Correg.pdf.

ANEXO A
(Tabla de coordenadas levantamiento topográfico)

Punto	Este	Norte	Cota	Descripción
1	2000.001	2000.001	1308.923	D1
2	2004.930	2004.184	1308.491	Camino
3	2003.845	2004.202	1308.473	Camino
4	2003.711	2002.504	1308.784	Camino
5	2002.988	2002.889	1308.701	Camino
6	2002.206	1999.826	1309.159	Camino
7	2001.460	2000.249	1309.134	Camino
8	2001.630	1998.272	1309.123	Camino
9	2000.899	1998.626	1309.126	Camino
10	2000.194	1996.733	1309.123	Camino
11	1999.522	1997.232	1309.042	Camino
12	1999.267	1995.966	1309.012	Camino
13	1998.884	1996.723	1309.039	Camino
14	1997.331	1995.584	1309.027	Camino
15	1997.695	1994.941	1309.001	Camino
16	1997.163	1995.756	1309.029	Camino
17	2000.833	1998.834	1308.782	Terreno
18	1999.774	1997.561	1308.956	Terreno
19	1992.633	1996.621	1306.510	Terreno
20	1993.432	1995.365	1306.942	Terreno
21	1993.556	1994.411	1307.076	Terreno
22	1993.025	1993.591	1306.944	Terreno
23	1996.474	1995.606	1307.805	Terreno
24	1999.155	1997.213	1308.787	Terreno
25	1993.541	1998.292	1307.036	Árbol
26	1994.876	1998.583	1307.280	Terreno
27	1989.941	1992.767	1306.736	Terreno
28	1988.794	1992.587	1307.142	Terreno
29	1988.984	1994.176	1306.330	Terreno
30	1989.930	1991.912	1306.857	Terreno
31	1990.399	1992.942	1306.809	Muro rio
32	1977.677	1993.745	1313.122	Camino
33	1977.112	1993.258	1313.131	Camino
34	1980.262	1989.807	1311.508	Camino
35	1979.654	1989.451	1311.528	Camino
36	1980.447	1990.031	1310.776	Terreno
37	1981.338	1990.527	1310.590	Terreno

38	1982.126	1990.803	1310.000	Terreno
39	1982.743	1991.002	1309.374	Terreno
40	1993.862	1997.500	1307.001	D2
41	1992.300	1992.771	1306.963	Muro
42	1992.405	1990.078	1307.000	Rio
43	1989.969	1990.166	1306.818	Rio
44	1983.176	1989.505	1308.813	Terreno es
45	1983.052	1990.116	1308.735	Terreno es
46	1982.993	1989.813	1310.860	Camino
47	1980.076	1988.822	1311.319	Camino
48	1980.145	1988.735	1311.048	Terreno
49	1980.357	1989.781	1311.241	Camino
50	1982.242	1990.736	1310.696	Estribo
51	1996.928	1995.757	1308.695	Estribo
52	1997.164	1994.145	1308.156	Estribo
53	1992.5954	1987.9086	1314.142	CVN
54	1988.5074	1987.0279	1313.280	CVN
55	1988.3745	1984.7557	1312.277	CVN
56	2011.9904	1995.3197	1310.809	CVN
57	2002.4201	1994.3655	1308.122	CVN
58	1995.6596	1991.2275	1307.281	CVN
59	1977.3442	1996.9183	1307.278	CVN
60	1982.2752	1998.2852	1308.528	CVN
61	1984.401	1998.4054	1308.323	CVN
62	1984.2946	1984.8196	1308.530	CVN
63	1977.8793	1984.1128	1310.000	CVN
64	1977.4341	1988.5761	1310.544	CVN
65	1980.0681	2001.4987	1310.761	CVN
66	1982.1893	2004.184	1309.282	CVN
67	1983.9389	2004.184	1307.742	CVN
68	1973.4409	1990.233	1307.000	CVN
69	1974.8404	2000.2579	1307.157	CVN
70	1976.0567	2001.1658	1307.147	CVN
71	2005.1051	2004.2957	1308.522	CVN
72	2005.6529	1997.3578	1313.271	CVN
73	2009.7444	1996.7895	1313.108	CVN
74	1993.6874	2010.1032	1313.028	CVN
75	2003.4098	2010.0888	1309.076	CVN
76	2001.8709	2006.5913	1308.050	CVN

Fuente Autores.

ANEXO B

A continuación, se presentan las deflexiones obtenidas en el software SAP 2000 del diseño final del puente, las cuales cumplen satisfactoriamente con los parámetros establecidos en la norma colombiana.

TABLE: Joint Displacements				
Joint	OutputCase	U1	U2	U3
104	DEAD	0,000318	-6,656E-06	0,000334
145	DEAD	0,000319	4,116E-06	0,000334
9	DEAD	0,000285	-2,752E-06	0,000321
34	DEAD	0,000285	2,142E-07	0,000321
65	DEAD	0,000276	-	0,00032
66	DEAD	0,000497	0,00000127	0,00032
167	DEAD	0,000185	-1,284E-06	0,000282
98	DEAD	0,000422	9,295E-07	0,000277
139	DEAD	0,000422	0,000011	0,000277
174	DEAD	0,000173	-0,000014	0,000265
188	DEAD	0,000173	1,127E-06	0,000265
168	DEAD	0,000182	7,332E-07	0,000243
175	DEAD	0,000169	-1,879E-07	0,000233
189	DEAD	0,000169	3,547E-07	0,000233
181	DEAD	0,000166	-7,311E-07	0,000211
195	DEAD	0,000166	1,312E-06	0,000211
114	DEAD	0,001169	5,502E-07	0,000209
149	DEAD	0,001165	-0,000026	0,000207
182	DEAD	0,00013	0,000014	0,000204
196	DEAD	0,00013	8,825E-07	0,000204
84	DEAD	0,001736	-	0,000193
83	DEAD	0,001743	0,00000126	0,000188
12	DEAD	0,00012	8,818E-06	0,000184
36	DEAD	0,000121	-0,000018	0,000184
10	DEAD	0,00018	0,00000105	0,000176
38	DEAD	0,00018	-1,429E-06	0,000176
82	DEAD	0,001733	1,364E-06	0,000174
23	DEAD	0,000149	5,007E-07	0,000173
48	DEAD	0,000149	0,000011	0,000173
148	DEAD	0,001167	-0,000025	0,000166
200	DEAD	0,000238	0,000018	0,000166
204	DEAD	0,000238	8,885E-06	0,000166
119	DEAD	0,000504	-0,000015	0,000162
154	DEAD	0,000504	5,428E-06	0,000161
			-0,000001	
			-1,394E-06	

44	DEAD	0,000134	0,000021	0,000155
19	DEAD	0,000134	-0,000016	0,000154
53	DEAD	0,000394	-5,606E-06	0,000148
54	DEAD	0,000605	-5,624E-06	0,000148
81	DEAD	0,001738	-0,00002	0,000146
13	DEAD	0,000341	-4,678E-06	0,000145
37	DEAD	0,000341	-6,535E-06	0,000145
124	DEAD	0,000412	-3,544E-06	0,000142
159	DEAD	0,000412	-7,733E-06	0,000142
166	DEAD	0,000118	6,549E-10	0,000141
92	DEAD	0,001087	0,000062	0,000126
133	DEAD	0,001084	-0,000065	0,000126
113	DEAD	0,001166	-0,000013	0,000125
153	DEAD	0,000494	-5,086E-06	0,000125
173	DEAD	0,00011	4,928E-08	0,00012
187	DEAD	0,00011	-4,819E-08	0,00012
201	DEAD	0,000279	-9,929E-06	0,000119
205	DEAD	0,000279	-3,838E-06	0,000119
55	DEAD	0,000387	-9,015E-06	0,000113
56	DEAD	0,000604	-	0,000113
			0,00000913	
21	DEAD	0,0001	0,000109	0,000112
39	DEAD	0,000312	-9,381E-06	0,000112
46	DEAD	0,0001	-0,00011	0,000112
118	DEAD	0,000492	-8,989E-06	0,000112
11	DEAD	0,000312	-8,648E-06	0,000111
123	DEAD	0,000404	-8,456E-06	0,000111
158	DEAD	0,000403	-0,000011	0,000107
87	DEAD	0,001722	0,000037	0,000103
85	DEAD	0,001729	-0,000042	0,000098
90	DEAD	0,00172	0,000138	0,000094
208	DEAD	0,000138	-0,000054	0,000093
209	DEAD	0,000138	0,000048	0,000092
89	DEAD	0,001727	-0,000139	0,000091
150	DEAD	0,001138	0,000032	0,000086
115	DEAD	0,001141	-0,000037	0,000083
180	DEAD	0,000053	5,24E-08	0,00005
194	DEAD	0,000053	-5,197E-08	0,00005
97	DEAD	0,001166	-4,896E-06	0,000039
106	DEAD	0,000389	-2,545E-06	0,000026
144	DEAD	0,00039	3,789E-06	0,000026
79	DEAD	0,001733	1,092E-06	0,000022
8	DEAD	0,000343	2,002E-07	0,000018

30	DEAD	0,000343	1,007E-06	0,000018
63	DEAD	0,000364	6,025E-07	0,000016
64	DEAD	0,000573	6,082E-07	0,000016
155	DEAD	0,000487	6,966E-06	0,000013
103	DEAD	0,000486	4,043E-06	0,000012
120	DEAD	0,000487	-0,000013	0,000012
72	DEAD	0,000416	0,000091	6,545E-06
74	DEAD	0,000416	-0,000091	6,538E-06
2	DEAD	0,000303	7,856E-06	1,032E-06
18	DEAD	0,000124	-9,104E-06	6,594E-07
1	DEAD	0,000207	-5,857E-07	4,682E-07
57	DEAD	0,000384	7,806E-06	4,607E-07
58	DEAD	0,000601	7,979E-06	4,606E-07
177	DEAD	0,000175	-5,786E-07	4,362E-07
170	DEAD	0,000165	-5,628E-07	3,461E-07
163	DEAD	0,000175	-5,48E-07	2,471E-07
142	DEAD	0,000398	7,863E-06	2,458E-07
184	DEAD	0,000165	-5,341E-07	1,429E-07
191	DEAD	0,000175	-5,212E-07	3,417E-08
7	DEAD	0	0	0
14	DEAD	0	0	0
29	DEAD	0	0	0
40	DEAD	0	0	0
42	DEAD	0,000124	3,199E-06	-9,015E-09
26	DEAD	0,000208	-5,162E-07	-1,12E-08
31	DEAD	0,000303	7,758E-06	-1,43E-08
136	DEAD	0,000487	7,563E-06	-5,239E-07
130	DEAD	0,001163	6,897E-06	-2,372E-06
109	DEAD	0,000398	9,238E-06	-3,066E-06
80	DEAD	0,001726	5,869E-06	-5,304E-06
88	DEAD	0,000416	0,00009	-6,536E-06
86	DEAD	0,000416	-0,000092	-6,545E-06
100	DEAD	0,000487	0,000011	-0,000013
138	DEAD	0,000487	-9,495E-06	-0,000013
51	DEAD	0,000364	-3,229E-06	-0,000016
52	DEAD	0,000573	-3,236E-06	-0,000016
15	DEAD	0,000343	-2,829E-06	-0,000018
35	DEAD	0,000343	-3,631E-06	-0,000018
125	DEAD	0,00039	-1,177E-07	-0,000026
160	DEAD	0,00039	-6,462E-06	-0,000026
183	DEAD	0,000053	-5,227E-08	-0,00005
197	DEAD	0,000053	5,21E-08	-0,00005
94	DEAD	0,001142	0,000035	-0,000085

132	DEAD	0,001138	-0,000034	-0,000085
69	DEAD	0,001727	0,000137	-0,000093
70	DEAD	0,00172	-0,00014	-0,000093
206	DEAD	0,000138	0,000054	-0,000093
207	DEAD	0,000138	-0,000052	-0,000093
71	DEAD	0,001729	0,00004	-0,0001
73	DEAD	0,001722	-0,000039	-0,000101
108	DEAD	0,000403	3,572E-06	-0,000109
141	DEAD	0,000403	6,158E-06	-0,000109
4	DEAD	0,000311	4,562E-06	-0,000112
25	DEAD	0,0001	-0,00011	-0,000112
32	DEAD	0,000312	5,119E-06	-0,000112
50	DEAD	0,0001	0,000108	-0,000112
59	DEAD	0,000387	0,00000484	-0,000112
60	DEAD	0,000604	4,861E-06	-0,000112
199	DEAD	0,000279	8,439E-06	-0,000119
203	DEAD	0,000279	0,00000111	-0,000119
176	DEAD	0,00011	-4,894E-08	-0,00012
190	DEAD	0,00011	4,854E-08	-0,00012
102	DEAD	0,000493	8,366E-06	-0,000123
135	DEAD	0,000493	1,612E-06	-0,000123
151	DEAD	0,001084	0,000063	-0,000125
116	DEAD	0,001087	-0,000064	-0,000127
169	DEAD	0,000118	-2,431E-10	-0,000141
107	DEAD	0,000412	6,885E-07	-0,000142
143	DEAD	0,000412	4,585E-06	-0,000142
6	DEAD	0,000341	1,665E-06	-0,000145
33	DEAD	0,000341	3,517E-06	-0,000145
61	DEAD	0,000394	0,00000259	-0,000148
62	DEAD	0,000605	2,622E-06	-0,000148
17	DEAD	0,000134	0,000026	-0,000155
43	DEAD	0,000134	-0,00002	-0,000155
101	DEAD	0,000505	6,399E-06	-0,00016
137	DEAD	0,000504	-1,395E-06	-0,00016
129	DEAD	0,001166	-0,000012	-0,000162
77	DEAD	0,001739	0,000022	-0,000164
96	DEAD	0,00117	0,000022	-0,000165
198	DEAD	0,000238	0,000011	-0,000165
202	DEAD	0,000238	-6,678E-06	-0,000166
78	DEAD	0,001732	-0,000013	-0,000168
22	DEAD	0,000149	0,000021	-0,000173
47	DEAD	0,000149	-0,000018	-0,000173
3	DEAD	0,00018	2,805E-07	-0,000176

27	DEAD	0,00018	1,073E-06	-0,000176
5	DEAD	0,000121	-6,044E-07	-0,000184
28	DEAD	0,000121	1,892E-06	-0,000184
75	DEAD	0,001743	0,000015	-0,000187
76	DEAD	0,001736	-0,000011	-0,00019
95	DEAD	0,001168	0,000021	-0,000203
179	DEAD	0,00013	-4,351E-07	-0,000204
193	DEAD	0,00013	1,723E-06	-0,000204
131	DEAD	0,001165	-0,000016	-0,000205
178	DEAD	0,000166	3,245E-07	-0,000211
192	DEAD	0,000166	1,028E-06	-0,000211
172	DEAD	0,000169	9,684E-08	-0,000233
186	DEAD	0,000169	0,00000119	-0,000233
165	DEAD	0,000182	6,434E-07	-0,000242
171	DEAD	0,000173	4,936E-07	-0,000265
185	DEAD	0,000173	8,578E-07	-0,000266
121	DEAD	0,000422	-0,000014	-0,000277
156	DEAD	0,000422	0,000011	-0,000277
164	DEAD	0,000185	6,755E-07	-0,000282
67	DEAD	0,000276	-	-0,00032
			0,00000114	
68	DEAD	0,000497	-1,117E-06	-0,00032
16	DEAD	0,000285	3,424E-07	-0,000321
41	DEAD	0,000285	-2,624E-06	-0,000321
126	DEAD	0,000318	4,228E-06	-0,000333
161	DEAD	0,000319	-6,557E-06	-0,000334

Fuente Autores.

ANEXO C

Se presentan CD digital con las tablas del análisis estructural como las fuerzas, combinaciones de cargas, desplazamientos entre otras tablas obtenidas en el software SAP 2000 del diseño final del puente, las cuales cumplen satisfactoriamente con los parámetros establecidos en la norma colombiana.

ANEXO D

Se presentan CD digital con Planos, diseños, despieces referentes al diseño final del puente, las cuales cumplen satisfactoriamente con los parámetros establecidos en la norma colombiana.