

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE CIVIL



**ANÁLISIS DE VIGAS REFORZADAS CON CABLES DE BAMBÚ
SOMETIDAS A FLEXIÓN**

AUTOR:

BYRON JAVIER CORREA VILLARREAL

TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

DIRECTOR: ING. JORGE ALBUJA, M.SC

QUITO, 2021

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por haber sido el apoyo emocional y el sustento económico a lo largo de mi carrera.

A la Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Al American Concrete Institute, y en especial al ACI Student Chapter PUCE y a cada uno de sus miembros.

A los Ing. Marcos Jácome y al Ing. Guillermo Realpe, quienes me motivaron a ser un mejor profesional y persona. Y a los Ing. Jorge Albuja, Ing. Pablo Ayala e Ing. Lauro Lara por su tiempo y por su guía durante la realización de la presente disertación.

DEDICATORIA

A Dios y a mi madre Dolorosa. Ya que ellos me dieron la fuerza para no desistir y completar este proceso académico.

A mi papá, Fernando. A mi mamá, Alicia. Y a mi hermano, Fernando Andrés. Quienes me apoyaron a lo largo de la carrera y en el proceso de elaboración de esta tesis de disertación.

Y a las amistades de Dany, Marcelo, Gian, Edu, Dario, Christian E., José, Diego E., Diego B., Paúl y Enrique, amistades que atesoro y valoro mucho.

RESUMEN

La presente tesis de disertación tiene por objeto, el determinar la eficiencia de una viga secundaria reforzada con cables de bambú sometida a flexión, frente a una viga de hormigón armado y una viga de hormigón simple para evaluar su potencial uso en el medio rural. El estudio de eficiencia se lo realizó considerando: el aspecto económico y la capacidad de carga de la viga.

Por lo cual, se investigó acerca de las propiedades mecánicas del bambú y del hormigón para aplicar en la conformación de una viga reforzada con cables de bambú. También, se definió la distribución y el número de cables a utilizar para el diseño de una viga reforzada con cables de bambú acorde a la bibliografía.

Finalmente, se determinó la capacidad máxima de las vigas ensayadas en el laboratorio para su análisis de eficiencia y de su potencial uso en el medio rural como alternativa a las vigas de hormigón simple y a las vigas de hormigón armado.

ABSTRACT

The purpose of this dissertation thesis is to determine the efficiency of a secondary beam reinforced with bamboo cables subjected to bending, compared to a reinforced concrete beam and a simple concrete beam to evaluate its potential use in rural areas. The efficiency study was carried out considering: the economic aspect and the load capacity of the beams.

Therefore, the mechanical properties of bamboo and concrete were investigated to apply in the conformation of a beam reinforced with bamboo cables. Also, the distribution and number of cables to be used for the design of a beam reinforced with bamboo cables was defined according to the bibliography.

Finally, the maximum capacity of the beams tested in the laboratory was determined for its efficiency analysis and its potential use in rural areas as an alternative to simple concrete beams and reinforced concrete beams.

TABLA DE CONTENIDOS

1.	Capítulo 1	13
1.1.	Introducción:	13
1.2.	Objetivos y Alcance	14
1.2.1.	Objetivo General	14
1.2.2.	Objetivos Específicos	14
1.2.3.	Alcance.....	14
1.3.	Metodología.....	15
1.3.1.	Elaboración de los Cables de Bambú	15
1.3.1.1.	Selección de Bambú.	15
1.3.1.2.	Especificaciones del Bambú.	15
1.3.1.3.	Elaboración de las Cintas de Bambú.	16
1.3.1.4.	Elaboración de los Cables de Bambú.	16
1.3.2.	Elaboración de las Probetas de Ensayo	17
1.3.2.1.	Dosificación de las Viguetas de Hormigón.	17
1.3.2.2.	Ensayos de Caracterización del Material.....	17
1.3.2.3.	Elaboración del Armado de las Viguetas de Hormigón.....	17
1.3.2.4.	Elaboración de las Viguetas de Hormigón.	18
1.3.3.	Ensayo de Tracción en la Varilla de Acero	18
1.3.4.	Ensayos de Tracción de Cables de Bambú.....	18
1.3.4.1.	Especificaciones Generales de los Ensayos.....	18
1.3.4.2.	Número de Casos.....	18
1.3.4.3.	Número de Ensayos a Realizar.....	18

1.3.5.	Ensayos de Flexión de Vigas	19
1.3.5.1.	Casos de Estudio.....	19
1.3.5.2.	Número de Ensayos a Realizar.....	19
1.3.6.	Ensayos de Compresión del Hormigón	19
1.3.6.1.	Normativa.....	19
1.3.6.2.	Número de Ensayos.....	19
1.3.7.	Discusión de los Resultados Obtenidos.....	20
1.3.8.	Elaboración de Conclusiones y Recomendaciones	20
2.	Capítulo 2.....	21
2.1.	Hormigón.....	21
2.1.1.	Composición del Hormigón	21
2.1.1.1.	Cemento <i>Portland</i>	21
2.1.1.2.	Agua.....	23
2.1.1.3.	Materiales Pétreos.....	23
2.1.1.3.1.	Agregado Fino.....	24
2.1.1.3.2.	Agregado Grueso.....	24
2.1.2.	Propiedades Mecánicas del Hormigón	24
2.1.2.1.	Módulo de Elasticidad.....	24
2.1.2.2.	Resistencia a la Compresión.....	25
2.1.2.3.	Resistencia a la Tracción.....	26
2.1.2.4.	Dosificación Referencial.....	27
2.1.2.4.1.	Caracterización de los Agregados.....	28
2.1.2.4.2.	Resumen de las Propiedades Mecánicas.....	30

2.2.	Bambú	30
2.2.1.	Importancia del Bambú	30
2.2.2.	Propiedades Mecánicas del Bambú.....	31
2.3.	Estado del Arte: el Bambucreto	32
2.3.1.	Propiedades Mecánicas del Bambú como Material de Refuerzo	33
2.3.1.1.	Ensayos Realizados en Whangpoo, China.....	33
2.3.1.2.	Ensayos Realizados por K. Datta.....	33
2.3.1.3.	Ensayos Realizados por H. E. Glenn.	34
2.3.2.	Limitaciones del Bambú Como Material de Refuerzo en el Hormigón	35
2.3.2.1.	Pérdida de Adherencia.....	35
2.3.2.1.1.	Variaciones Volumétricas.	35
2.3.2.1.2.	Impermeabilizantes Químicos.	36
2.3.2.2.	Limitaciones en el Área de Refuerzo.....	36
2.3.3.	Uso de Cables de Bambú Como Material de Refuerzo en el Hormigón	37
2.3.3.1.	Cables de Bambú.....	37
2.3.3.1.1.	Ensayos de Tracción en las Cintas de Bambú.	37
2.3.3.2.	Ensayos de Flexión de Vigas.....	38
2.3.3.2.1.	Fundición de las Vigas de Hormigón.	38
2.3.3.2.2.	Ensayos de Flexión.....	39
2.3.3.2.3.	Ventajas de los Cables de Bambú.....	39
3.	Capítulo 3.....	41
3.1.	Características Preliminares	41
3.1.1.	Clasificación de Vigas.....	41

3.1.1.1.	Vigas Hormigón Simple.....	42
3.1.1.2.	Vigas de Hormigón Armado.....	43
3.1.1.3.	Vigas Bambucreto.....	43
3.1.2.	Cubiertas.....	43
3.2.	Análisis de Vigas Sometidas a Flexión.....	44
3.2.1.	Teoría Elástica.....	44
3.2.2.	Teoría de Última Resistencia.....	45
3.2.3.	Estados de Agrietamiento del Hormigón.....	46
3.2.4.	Mecanismos de Falla en el Hormigón.....	46
3.3.	Estimación de la Capacidad de las Vigas de Estudio.....	47
3.3.1.	Vigas Hormigón Simple.....	47
3.3.2.	Vigas Hormigón Armado.....	47
3.3.3.	Vigas Bambucreto.....	48
4.	Capítulo 4.....	49
4.1.	Elaboración de las Tiras de Bambú.....	49
4.2.	Elaboración de los Cables de Bambú.....	51
4.3.	Elaboración del Armado de las Viguetas.....	53
4.3.1.	Elaboración de los Encofrados.....	53
4.3.2.	Elaboración del Armado.....	55
4.3.2.1.	Armadura de Acero.....	55
4.3.2.2.	Armadura de Bambú.....	55
4.4.	Caracterización de los Agregados.....	56
4.4.1.	Granulometría del Agregado Fino.....	57

4.4.2.	Granulometría del Agregado Grueso	58
4.4.3.	Desgaste de los Agregados Gruesos.....	60
4.4.4.	Material Fino que Pasa el Tamiz N°200.....	61
4.4.5.	Gravedad Específica del Agregado Fino.....	61
4.4.6.	Gravedad Específica del Agregado Grueso.....	63
4.5.	Ensayos de Tracción de Cintas de Bambú	65
4.6.	Ensayos de Tracción de Cables de Bambú	66
4.7.	Ensayo a Tracción de la Varilla de Acero.....	67
4.8.	Ensayos a Compresión de los Cilindros de Hormigón.....	68
4.9.	Ensayos a Flexión de las Viguetas de Hormigón.....	71
5.	Discusión de Resultados.....	73
5.1.	Análisis de Eficiencia	73
5.2.	Evaluación del Potencial Uso de las Vigas de Estudio	76
6.	Conclusiones y Recomendaciones	77
6.1.	Conclusiones.....	77
6.2.	Recomendaciones	79
7.	Referencias	80
8.	Bibliografía	83

Tabla de Figuras

Figura 1. <i>Proceso de obtención de las tiras de Bambú en una carpintería local</i>	49
Figura 2. <i>Bambú cortado después de realizar el primer corte en la carpintería local</i>	50
Figura 3. <i>Tiras de Bambú obtenidas de la parte externa de la Guadua Angustifolia</i>	50
Figura 4. <i>Proceso de fabricación de los cables de Bambú acorde a Hidalgo (1981)</i>	51
Figura 5. <i>Fabricación cables de Bambú: Proceso de torsión en las tiras de Bambú</i>	52
Figura 6. <i>Fabricación cables de Bambú: Proceso de ajuste con alambre en el extremo del cable.</i>	52
Figura 7. <i>Corte Transversal de la viga encofrada</i>	53
Figura 8. <i>Encofrados terminados de las viguetas</i>	54
Figura 9. <i>Detalle de la armadura de acero</i>	55
Figura 10. <i>Armado en las vigas de Bambú</i>	56
Figura 11. <i>Detalle de los estribos de Bambú</i>	56
Figura 12. <i>Curva Granulométrica del agregado Fino proveniente de la mina de Pintag</i>	58
Figura 13. <i>Curva Granulométrica del agregado Grueso proveniente de la mina de Pintag</i>	59
Figura 14. <i>Ensayo de tracción de las tiras de bambú en el laboratorio de Pontificia Universidad Católica del Ecuador</i>	65
Figura 15. <i>Detalle de las probetas de los cables de bambú</i>	66
Figura 16. <i>Ensayos de tracción de los cables de Bambú</i>	67
Figura 17. <i>Ensayo a la tracción de la varilla de acero</i>	68
Figura 18. <i>Curva de resistencia a la compresión en el hormigón en vigas de hormigón simple</i>	70
Figura 19. <i>Curva de resistencia a la compresión en el hormigón en vigas de hormigón armado</i>	70
Figura 20. <i>Curva de resistencia a la compresión en el hormigón en vigas reforzadas con cables de bambú.</i> ..	71
Figura 21. <i>Gráfica Comparativa de la Carga Máxima de las Vigas Analizadas</i>	77
Figura 22. <i>Capacidad a Flexión de las Vigas de Estudio</i>	78

Tabla de Tablas

Tabla 1. <i>Clasificación del cemento Portland</i>	22
Tabla 2. <i>Módulo de elasticidad del hormigón según el ACI 318-14</i>	25
Tabla 3. <i>Dosificación referencial de Cevallos (2012) para un hormigón de 240 kg/cm²</i>	27
Tabla 4. <i>Granulometría del Agregado Fino, realizado por Cevallos (2012).</i>	28
Tabla 5. <i>Granulometría del Agregado Grueso, realizado por Cevallos (2012).</i>	29
Tabla 6. <i>Propiedades físicas y mecánicas de los agregados, ensayos realizado por Cevallos (2012).</i>	29
Tabla 7. <i>Resumen de las propiedades mecánicas del hormigón</i>	30
Tabla 8. <i>Propiedades Mecánicas de la Guadua Angustifolia</i>	32
Tabla 9. <i>Resultados de los ensayos mecánicos realizados por la Jefatura de Conservación de Whangpoo, China.</i>	33
Tabla 10. <i>Ensayos de Datta sobre el uso del bambú como material de refuerzo en el hormigón</i>	34
Tabla 11. <i>Ensayos de Glenn sobre el uso del bambú como material de refuerzo en el hormigón</i>	35
Tabla 12. <i>Distribución de los ensayos a tracción en las cintas de bambú</i>	38
Tabla 13. <i>Cuadro de resumen de los ensayos de flexión de Hidalgo (1978)</i>	39
Tabla 14. <i>Análisis de Costo de materiales en la fabricación del encofrado de las vigas</i>	54
Tabla 15. <i>Granulometría del Agregado Fino proveniente de la mina de Pintag</i>	57
Tabla 16. <i>Granulometría del Agregado Grueso proveniente de la mina de Pintag</i>	59
Tabla 17. <i>Cuadro de Resumen del ensayo de abrasión</i>	60
Tabla 18. <i>Cuadro de resumen del ensayo del material fino que pasa el tamiz N°200</i>	61
Tabla 19. <i>Datos y resultados de los ensayos de gravedad específica para el agregado fino</i>	62
Tabla 20. <i>Cuadro comparativo de los resultados y de la tesis referencial</i>	63
Tabla 21. <i>Datos y resultados de los ensayos de gravedad específica para el agregado grueso</i>	64
Tabla 22. <i>Cuadro comparativo de los resultados y de la tesis referencial</i>	64
Tabla 23. <i>Resultados de los ensayos de tracción de las tiras de bambú</i>	65
Tabla 24. <i>Resultados del ensayo a la tracción de la varilla de acero</i>	67
Tabla 25. <i>Resultados de los ensayos a la compresión en todos los cilindros de hormigón</i>	69
Tabla 26. <i>Resistencia promedio a la compresión del hormigón</i>	69

Tabla 27. <i>Resultados de los ensayos a flexión en las vigas de hormigón</i>	72
Tabla 28. <i>Carga Máxima y Momento Máximo Promedio en los Ensayos a Flexión de las Vigas de Estudio</i> .	72
Tabla 29. <i>Resultados promedio de la capacidad de las vigas de estudio</i>	73
Tabla 30. <i>Detalle precios unitarios para una viga de hormigón simple de 170x11x15 cm</i>	74
Tabla 31. <i>Detalle precios unitarios para una viga de hormigón armado de 170x11x15 cm</i>	74
Tabla 32. <i>Detalle precios unitarios para una viga de hormigón reforzada con cables de bambú de 170x11x15 cm</i>	74
Tabla 33. <i>Análisis de Eficiencia General de las vigas de estudio</i>	75

1. Capítulo 1

1.1. Introducción:

El hormigón simple es uno de los materiales generalmente usado en elementos estructurales, sin embargo, este no resiste favorablemente esfuerzos de tracción y flexión. Por lo cual, es común el uso del acero, como material de refuerzo, para tolerar dichos efectos. No obstante, el uso del acero puede ser muy costoso (Tex Delta, 2019); por lo cual se debe tomar en consideración la aplicación de otros materiales como método alternativo.

Hoy en día, el uso de fibras de acero, fibras de propileno, y fibras de vidrio, buscan mejorar el comportamiento no lineal del concreto como alternativa al uso del acero. Pero, las limitaciones en las propiedades mecánicas y en la accesibilidad de los materiales, a causa de su costo dificultan su uso en el medio rural (Irías, 2013).

Los cables bambú como material de refuerzo en el hormigón podrían ser una alternativa viable en el medio rural. Ya que, el bambú es uno de los materiales con mayor diversificación en el ámbito de la construcción por sus propiedades físicas y mecánicas (González, 2001).

Con la finalidad de presentar una nueva alternativa en la manufactura de vigas secundarias, la presente disertación tiene por objeto determinar el comportamiento a flexión de vigas de hormigón reforzadas con cables de bambú para establecer un análisis de eficiencia, frente a vigas de hormigón simple y vigas de hormigón armado para evaluar su potencial uso en el medio rural.

1.2. Objetivos y Alcance

1.2.1. Objetivo General

- Determinar la eficiencia de una viga secundaria armada y apoyada; reforzada con cables de bambú sometida a flexión para evaluar su potencial uso en el medio rural, para una cubierta sencilla.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Investigar las propiedades mecánicas del bambú y del hormigón, para aplicar en la conformación de la viga reforzada con cables de bambú.
- Definir la distribución y el número de cables a utilizar para el diseño de una viga secundaria simplemente armada y apoyada.
- Determinar la capacidad de carga de las vigas diseñadas mediante el reforzado con tiras de bambú para evaluar su potencial uso en el medio rural.

1.2.3. Alcance

La presente disertación culmina con la entrega de un análisis de eficiencia de una viga secundaria simplemente armada y apoyada reforzada con cables de bambú sometida a flexión para evaluar su potencial uso en el medio rural. En el análisis de eficiencia se considera: un análisis económico, y un análisis de la máxima carga aplicada a las vigas.

Para lo cual se desarrolla con base en la metodología, las siguientes actividades:

1. Investigar las propiedades mecánicas del hormigón, y del bambú en base a la literatura.
2. A partir de las propiedades mecánicas del hormigón y del bambú, se determina la distribución y el número de cables a utilizar en la viga reforzada con cables de bambú.

3. Realizar los ensayos de caracterización a flexión de la viga diseñada mediante hormigón y reforzada con cables de bambú.

4. Realizar un análisis comparativo entre la viga propuesta, una viga de hormigón simple y una viga de hormigón armado.

Finalmente, se establece una discusión de resultados y se establecen conclusiones con respecto al trabajo de investigación.

1.3. Metodología

1.3.1. Elaboración de los Cables de Bambú

1.3.1.1. Selección de Bambú.

“Bamboo is a collective name for different species of giant grasses. It is estimated that 60–90 genera of bamboo exist, comprising approximately 1100–1500 species” (Van Der Lugt, Van Den Dobbelsteen & Janssen, 2005, pp.1-2). Es decir, que el bambú es una planta que comprende una gran variedad de subespecies alrededor del mundo. Para nuestro caso de estudio, se seleccionó la *Guadua Angustifolia*¹ por la predominancia de esta especie en el Ecuador, tal como lo indica Rodríguez & Morales (2008).

1.3.1.2. Especificaciones del Bambú.

Los bambús de dos a tres años se suelen usar en la manufacturación de tableros, latas y cables de bambú (Hidalgo, 1981). Pero, el fin de estos puede verse obstruido por la presencia de insectos xilófagos. Lo cual, hace que el bambú necesite un tratamiento especial para no verse afectado.

¹*Guadua Angustifolia* se refiere al nombre de una especie de planta del género *Guadua* perteneciente a la subfamilia de las gramíneas *Bambusoideae*.

Existen dos métodos de tratamiento para controlar la presencia de los insectos xilófagos. Estos métodos son: técnicas de curado y tratamiento con preservativos químicos (Hidalgo, 1981). En el medio rural es más común la utilización del tratamiento con las técnicas de curado por el bajo costo económico que puede representar.

Las principales técnicas de curado del bambú son: curado en la manta, curado por inmersión en agua, curado al calor y curado al humo (Hidalgo, 1981). Actualmente, no existen estudios que garanticen la eficiencia de un método frente a otro para la elaboración de los cables de bambú. Por lo cual, sin importar el método de curado utilizado, se considerará como apto el bambú de dos a tres años para la fabricación de los cables de bambú.

A su vez, las propiedades del bambú varían según distintos factores: lugar de procedencia, métodos de tratamiento, tipo de bambú, y tipos de ensayos. Es por ello, que en la selección de la *Guadua Angustifolia* no se pretende realizar un análisis estadístico dentro de un grupo de bambús de una zona particular del país.

1.3.1.3. Elaboración de las Cintas de Bambú.

Las cintas de bambú son un tipo de material vegetal, que se obtienen de la capa externa del bambú de dos a tres años. Las cuales sirven para la elaboración de los cables de bambú. Para el caso de estudio, las cintas de bambú tendrán una dimensión aproximada de 170 cm longitud por 10 mm de ancho y 3 mm de espesor.

1.3.1.4. Elaboración de los Cables de Bambú.

Actualmente, no existe una norma que regule el proceso de fabricación de los cables de bambú. Por tanto, para el caso de estudio se realizan los cables de bambú usando 3 cintas de bambú acorde a lo indicado por Hidalgo (1978).

1.3.2. Elaboración de las Probetas de Ensayo

1.3.2.1. Dosificación de las Viguetas de Hormigón.

La investigación no contempla la elaboración de una dosificación en el hormigón, ya que excede el alcance de la presente disertación. Pese a ello, se usa de forma referencial la mezcla indicada por Cevallos (2012) en su trabajo de titulación, *Disertación sobre el comportamiento de aditivos plastificantes en el hormigón, en su resistencia y durabilidad*, para realizar la fundición de las vigas con los materiales pétreos procedentes de la mina de Pintag.

1.3.2.2. Ensayos de Caracterización del Material.

El hecho de utilizar un mismo material, pero de distinto lote, exige que se realice una caracterización del material de Pintag. Por lo cual, se realiza ensayos de granulometría del agregado fino, granulometría del agregado grueso, de abrasión, de material fino que pasa el tamiz # 200, de gravedad específica del agregado fino, y de gravedad específica del agregado grueso para caracterizar el material pétreo.

1.3.2.3. Elaboración del Armado de las Viguetas de Hormigón.

El armado longitudinal y el refuerzo transversal de las viguetas se realiza considerando las publicaciones de Budi, Rahmadi & Rismunarsi (2017) y Budi & Rahmadi (2019)².

²Budi et al., (2017) analizan la capacidad de vigas a flexión usando tablillas de bambú como material de refuerzo, mientras Budi & Rahmadi (2019) analizan el uso de estribos de bambú con muescas como material de refuerzo.

1.3.2.4. Elaboración de las Viguetas de Hormigón.

Las dimensiones de la viga son de 170 cm de largo, por 15 cm de altura y por 11 cm de espesor, para estar acorde a las investigaciones de Budi et al. (2017) y de Budi & Rahmadi (2019).

1.3.3. Ensayo de Tracción en la Varilla de Acero

Se ensaya una varilla de 8 mm de diámetro acorde a las especificaciones del laboratorio de materiales de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

1.3.4. Ensayos de Tracción de Cables de Bambú

1.3.4.1. Especificaciones Generales de los Ensayos.

Actualmente no existe una norma que regule ensayos de tracción tanto en las tiras de bambú como en los cables de bambú. Es por ello, que se realiza estos ensayos de tracción sólo de forma referencial.

1.3.4.2. Número de Casos.

El estudio consta de dos casos: las tiras de bambú y los cables de bambú.

1.3.4.3. Número de Ensayos a Realizar.

Acorde a lo indicado por Hidalgo (1978) en *Nuevas técnicas de construcción con bambú*, el número de ensayos realizados para caracterizar las propiedades de las cintas de bambú fueron de ciento cincuenta y tres ensayos. Pese a ello, su trabajo no detalla las especificaciones para los ensayos, lo cual, confiere un grado de incertidumbre a sus resultados obtenidos.

En el estudio se opta por la realización de un número total de tres ensayos para cada caso. Por consiguiente, el número total de ensayos es de seis.

1.3.5. Ensayos de Flexión de Vigas

1.3.5.1. Casos de Estudio.

Se considera tres casos de estudio: el caso de una viga de hormigón simple, el caso de una viga de hormigón armado con varillas de 8 mm de diámetro, acorde a las especificaciones de Budi et al. (2017); y el caso de una viga de hormigón reforzada con cables de bambú como armadura.

1.3.5.2. Número de Ensayos a Realizar.

La norma ASTM C-293 sirve para determinar la resistencia a la flexión de una viga. La norma nos especifica que la variación de los resultados de 2 ensayos bien ejecutados de un mismo laboratorio no debe exceder el 16 %. Por ello, el número mínimo de ensayos de vigas para cada caso debe ser dos, siempre y cuando se cumpla con las especificaciones de la normativa. No obstante, el número de ensayos realizados es de tres para garantizar una mayor confiabilidad a los datos obtenidos. Es decir, el número total de ensayos de flexión de vigas acorde a la ASTM C-293 es de nueve, los cuales se ensayan a los 28 días cada uno.

1.3.6. Ensayos de Compresión del Hormigón

1.3.6.1. Normativa.

Los ensayos de compresión se realizan con base en las especificaciones de la norma ASTM C-39 para caracterizar la resistencia a la compresión de cada viga.

1.3.6.2. Número de Ensayos.

Se determina la resistencia a la compresión de los cilindros de hormigón a los siete, catorce y veintiocho días por cada viga. Es decir, el número total de ensayos de compresión será de veintisiete.

1.3.7. Discusión de los Resultados Obtenidos

Se discute los resultados obtenidos referentes a la capacidad real de las vigas de estudio, en relación con su capacidad teórica. También se discute los resultados para la elaboración de un análisis de eficiencia considerando aspecto económico, aspecto de módulo de ruptura y la carga última tolerada en las vigas.

Finalmente se discute el potencial uso de las vigas de hormigón reforzadas con cables de bambú, como alternativa a las vigas secundarias de hormigón simple y de hormigón armado para cubiertas sencillas.

1.3.8. Elaboración de Conclusiones y Recomendaciones

Se elaboran las conclusiones y las recomendaciones en base a los resultados de laboratorio y al planteamiento de los objetivos de la presente tesis de disertación.

2. Capítulo 2

En el presente capítulo se discute las propiedades mecánicas del hormigón y del bambú. En el caso del hormigón, se detalla la composición del concreto y de sus propiedades. También, se discute acerca de la dosificación referencial de Cevallos (2012): la caracterización de los materiales pétreos y las propiedades mecánicas del hormigón.

Por otro lado, en el bambú se puntualiza sobre la importancia de este material y, en específico, de las propiedades mecánicas de la *Guadua Angustifolia*. Finalmente, se discute sobre el estado del arte del bambuceto. En esta sección también se discute las limitaciones del bambú como material de refuerzo y el uso de cables de bambú como material de refuerzo.

2.1. Hormigón

2.1.1. Composición del Hormigón

El hormigón es un material no homogéneo usado en la construcción, el cual se obtiene de la mezcla del cemento *Portland*, del agua y de materiales pétreos debidamente graduados (Cevallos, 2012). El hormigón se caracteriza por tener una resistencia significativa a esfuerzos de compresión, pero débil frente a esfuerzos de tracción.

Es por ello, que el comprender las propiedades de los materiales, que conforman el hormigón, resulta fundamental para el diseño de estructuras funcionales, seguras y económicas.

2.1.1.1. Cemento *Portland*.

“El cemento *Portland* es un material grisáceo finamente pulverizado, conformado fundamentalmente por silicatos de calcio y aluminio” (Nilson, 1999, p.28). Este es el

elemento principal del hormigón debido a su composición química, la cual contribuye en la capacidad de resistencia del hormigón.

Este material al entrar en contacto con el agua produce una reacción química llamada hidratación, por la incorporación del agua en la mezcla. El agua al entrar en contacto con el cemento forma una pasta suave, la cual va fraguando y rigidizándose de forma gradual por los fenómenos de fraguado y el de endurecimiento.

El fraguado es un proceso de transición de consistencia de la pasta de cemento, que cambia de un estado fluido o semiplástico a un estado sólido. Mientras, que el endurecimiento es un proceso de incremento de resistencia de la pasta de cemento, la cual, se suscita al mismo tiempo que se da el fraguado.

Por otro lado, la clasificación del cemento *Portland* se la realiza considerando la composición química del tipo de cemento y de su uso en la construcción. En la Tabla 1 se indica la clasificación del cemento Portland acorde a su aplicación.

Tabla 1.

Clasificación del cemento Portland

TIPO	NOMBRE	APLICACIÓN
I	Normal	Uso General
IA	Normal	Uso General con aire incluido
II	Moderado	Uso General. Pero con resistencia moderada a los sulfatos o calor de hidratación moderado.
IIA	Moderado	Igual que el tipo II, pero con aire incluido
III	Altas Resistencias	Uso Particular. Para altas resistencias en edades tempranas.
IIIA	Altas Resistencias	Igual que el tipo III, pero con aire incluido

IV	Bajo Calor de Hidratación	Uso Particular. Cuando se requiere bajo calor de hidratación.
V	Resistente a la acción de los sulfatos.	Uso General. Pero con mayor uso donde se desea alta resistencia a los sulfatos.

Fuente: Cevallos (2012, p. 3).

2.1.1.2. Agua.

El agua es la sustancia química, la cual se utiliza en el proceso de fabricación del hormigón. El agua cumple dos funciones dentro de la fundición del hormigón: como reactante en el proceso de la hidratación y como indicador de la trabajabilidad del hormigón (Cevallos, 2012). Ya que, la trabajabilidad es una propiedad del hormigón fresco, que nos indica la mayor o menor facilidad que tiene este para ser mezclado, consolidado, y terminado.

Por otro lado, la relación agua/cemento es uno de los parámetros más importantes en el proceso de dosificación del hormigón, ya que de esta relación depende la resistencia a la compresión y la durabilidad del hormigón de forma directa. Si la relación agua/cemento es baja, se mejora la resistencia a la compresión del hormigón; pero se disminuye la trabajabilidad. Por el contrario, si aumenta la relación agua/cemento, aumenta la trabajabilidad, pero disminuye la resistencia a la compresión.

2.1.1.3. Materiales Pétreos.

Se denomina como materiales o agregados pétreos a los materiales de origen rocoso, los cuales se utilizan en la conformación del hormigón (Cevallos, 2012). Estos se caracterizan por no tener una forma definida, pero pueden ser clasificados acordes al tamaño de sus partículas como: agregado fino y agregado grueso.

Estos materiales deben cumplir con ciertas normas de regulación para validar su uso en el hormigón (Cevallos, 2012), como por ejemplo: ASTM C-117, ASTM C-127, ASTM C-128, ASTM C-131, o ASTM C-136³.

2.1.1.3.1. Agregado Fino.

El agregado fino es un material pétreo, el cual suele estar conformado por arena natural o material triturado. La gradación del material fino; es decir el tamaño de las partículas, debe ser menor a 5 mm. A su vez, las partículas del material deberán cumplir con ciertas especificaciones de la norma ASTM C-33.

2.1.1.3.2. Agregado Grueso.

El agregado grueso es un material pétreo, el cual suelen estar conformado por gravas naturales o agregados triturados. Las partículas de este material tienen un tamaño mayor a 5 mm, y pueden llegar hasta entre 9,5 y 37 mm.

Por otro lado, el material no deberá poseer partículas significativas del material fino, que pudiese afectar la adherencia y a la hidratación del cemento en el proceso de fundición del hormigón. Por lo cual, el material deberá cumplir con las especificaciones de la norma ASTM C-33.

2.1.2. Propiedades Mecánicas del Hormigón

2.1.2.1. Módulo de Elasticidad.

Serrano & Pérez (2010) exponen: “El módulo de elasticidad del concreto es una propiedad mecánica que refleja la habilidad que tiene el concreto para deformarse

³Estas normativas sirven para la realización de varios ensayos, como son: granulometría del agregado fino, granulometría del agregado grueso, ensayo de abrasión, material fino que pasa el tamiz # 200, gravedad específica del agregado fino y gravedad específica del agregado grueso.

elásticamente” (p. 18). No obstante, esta propiedad depende de cada hormigón y se encuentra ligado a su resistencia a la compresión.

La American Concrete Institute (2014) propone el uso de ciertas expresiones para el cálculo del módulo de elasticidad de forma analítica. Estas expresiones se indican en la Tabla 2. Pese a ello, estas expresiones pueden estar sobreestimando o subestimando el módulo de elasticidad del hormigón real (Serrano & Pérez, 2010).

Tabla 2.

Módulo de elasticidad del hormigón según el ACI 318-14

Especificación	Módulo de elasticidad	Unidades
Para hormigones con peso específico entre 1440 y 2560 kg/m ³	$E_c = w_c^{1,5} * 0,14 * \sqrt{f'_c}$	kg/cm ²
Para hormigón de peso específico normal	$E_c = 15100 * \sqrt{f'_c}$	kg/cm ²

Fuente: American Concrete Institute (2014, p. 315).

2.1.2.2. Resistencia a la Compresión.

La resistencia a la compresión es una propiedad mecánica del hormigón, que depende de las características de los materiales utilizados en la fundición del mismo. De forma general en obra, la resistencia a la compresión es un parámetro; el cual sirve como indicador de la calidad estructural del hormigón.

La forma de controlar la resistencia del hormigón en obra es a través del muestreo de especímenes cilíndricos, tal como lo estipulan las normas ASTM C-172, ASTM C-31 y ASTM C-39. Este control de calidad permite identificar potenciales riesgos y deficiencias del hormigón en obra, como, por ejemplo: la segregación, o una mala compactación.

El comportamiento de la resistencia del hormigón se ve influida por el lapso de tiempo después de su colocación. Se expone que el hormigón adquiere un 70 % de su resistencia de diseño a los 7 días, y que el 30 % está sujeto a las condiciones de humedad y de temperatura del periodo final hasta llegar a los 28 días (Nilson, 1999).

2.1.2.3. Resistencia a la Tracción.

La resistencia a la tracción no es una de las principales bondades del hormigón, en contraste a su resistencia a la compresión. Esta propiedad es de interés en la formación y propagación de grietas de este material, ya que estas grietas se suscitan cuando el hormigón está sometido a esfuerzos de flexión, y al momento en que este se agrieta, su comportamiento cambia. El comportamiento a tensión en el concreto, también se puede suscitar por los efectos de cortante, y por torsión.

A través de los años, la resistencia del hormigón a esfuerzos de tensión se ha determinado con base en su módulo de rotura, acorde a las especificaciones de la norma ASTM C-78 o de la ASTM C-293. Estos son métodos de obtención indirecta, se usan debido a las dificultades experimentales de los ensayos de tensión directa; que permite determinar la resistencia a la tracción del hormigón. Por otro lado, existe una correlación directa entre la resistencia a la compresión y a la tensión, ya que: “The tensile strength of concrete in flexure (modulus of rupture) is a more variable property than the compressive strength and is approximately 10 to 15 percent of the compressive strength”⁴ (American Concrete Institute, 2014, p.348).

⁴ “La resistencia a la tracción del hormigón sometido a esfuerzos de flexión (módulo de ruptura) es una propiedad más variable que la resistencia a la compresión y es aproximadamente del 10 a 15 % la resistencia a la compresión” (Traducción propia).

2.1.2.4. Dosificación Referencial.

Los agregados pétreos se obtuvieron de la mina de Pintag para la conformación del hormigón. No obstante, el alcance de la investigación no contempla el desarrollo de una dosificación en específico. Por tal motivo, la investigación toma como referencia, los datos obtenidos por Cevallos (2012); ya que estos también provienen de la mina de Pintag. Los datos obtenidos por Cevallos (2012) para la dosificación se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3.

Dosificación referencial de Cevallos (2012) para un hormigón de 240 kg/cm²

Parámetro	Resultado
Asentamiento	8 cm
Tamaño máximo nominal	25,4 mm
Estimación del contenido de aire	1,50 %
Estimación del contenido de agua de la mezcla	247,8 kg/m ³
Resistencia de diseño	240 kg/cm ²
Selección de relación agua/cemento	0,5045
Contenido de cemento	416,3 kg/m ³
Peso Unitario de los agregados	2204,2 kg/m ³
Porcentaje de participación de los agregados	Agregado Fino: 49 %
	Agregado Grueso: 51 %
Contenido de Agregados Pétreos en estado saturado con superficie seca	Agregado Fino: 773,22 kg/m ³
	Agregado Grueso: 804,78 kg/m ³
Cantidad de agregados pétreos en estado seco	Agregado Fino: 726,2 kg/m ³
	Agregado Grueso: 813,8 kg/m ³

Fuente: Cevallos (2012, p. 52).

2.1.2.4.1. Caracterización de los Agregados.

Los resultados de los ensayos de la granulometría del agregado fino y de la granulometría del agregado grueso realizados por Cevallos (2012) se indican en la Tabla 4 y en la Tabla 5, respectivamente.

Tabla 4.

Granulometría del Agregado Fino, realizado por Cevallos (2012).

Malla No.	Abertura (mm)	Masa Retenida Parcial (g)	Masa Retenida Acumulada (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje que Pasa (%)	Especificación del % que pasa
1/2"	12,7	0	0	0	100	100
3/8"	9,51	4,9	4,9	0	100	100
No. 4	4,76	51	55,9	3,61	96,39	95-100
No. 8	2,36	280,5	336,4	21,74	78,26	80-100
No. 16	1,19	299,4	635,8	41,09	58,91	50-85
No. 30	0,595	243,5	879,3	56,83	43,17	25-60
No. 50	0,297	217,8	1097,1	70,90	29,10	10-30
No. 100	0,149	149,3	1246,4	80,55	19,45	2-10
Pasa No. 100		300,9	1547,3	100,00	0,00	
Suma		1547,3				

Fuente: Cevallos (2012, p. 26).

Tabla 5.*Granulometría del Agregado Grueso, realizado por Cevallos (2012).*

Malla No.	Abertura (mm)	Masa Retenida Parcial (g)	Masa Retenida Acumulada (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje que Pasa (%)	Especificación del % que pasa
2 1/2 "	64	0	0	0,00	100,00	100
2 "	50,8	0	0	0,00	100,00	100
1 1/2 "	38,1	0	0	0,00	100,00	100
1 "	25,4	325	325	1,03	98,97	95-100
3/4 "	19,0	1005	1330	4,22	95,78	60-80
1/2 "	12,7	5220	6550	20,77	79,23	25-60
3/8 "	9,51	5320	11870	37,65	62,35	16-40
No. 4	4,76	12655	24525	77,78	22,22	0-10
Pasa No. 4		7005	31530	100	0	
Suma		31530				

Fuente: Cevallos (2012, p. 27).

Por otro lado, los ensayos realizados para la caracterización del material pétreo fueron: material que pasa el tamiz # 200, porcentaje de abrasión, gravedad específica *Bulk* del agregado fino, gravedad específica *Bulk* del agregado grueso y equivalente de arena. Los resultados de estos ensayos se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6.*Propiedades físicas y mecánicas de los agregados, ensayos realizado por Cevallos (2012).*

Propiedades Físicas y Mecánicas de los materiales	Resultados
Porcentaje de material que pasa el tamiz 200	15,30 %
Porcentaje de abrasión	27,25 %
Gravedad Específica de <i>Bulk</i> (Fino):	2,17
Gravedad Específica de <i>Bulk</i> (Grueso):	2,14
Equivalente de arena:	79,40 %

Fuente: Cevallos (2012, págs. 28, 29, 33, 37, & 38).

2.1.2.4.2. *Resumen de las Propiedades Mecánicas.*

El cuadro de resumen de las propiedades mecánicas para un hormigón simple y sin aditivo según la investigación de Cevallos (2012) se indica en la Tabla 7.

Tabla 7.

Resumen de las propiedades mecánicas del hormigón

	7 días	28 días
Ensayos de compresión simple sin aditivo (kg/cm ²):	189,31	257,4
Ensayos de flexión sin aditivo (kg/cm ²):	-	50,796
Módulo de elasticidad sin aditivo (kg/cm ²):	-	140357,11

Fuente: Cevallos (2012, págs. 72, 82, 92, 93, & 94).

2.2. **Bambú**

El bambú puede ser descrito como un tipo de planta, que se caracteriza por tener un tallo con varias secciones huecas. El bambú es el nombre común, con el cual se denomina a la subfamilia de las gramíneas.

De forma aproximada existen 1040 especies de esta subfamilia. Esto se debe a que, el bambú es una especie común en zonas tropicales y subtropicales alrededor del mundo. Algunas de estas especies pueden tener alturas mayores a 30 m, mientras que otras especies son vistas tan sólo como pequeños arbustos (Rodríguez & Morales, 2008).

2.2.1. *Importancia del Bambú*

El bambú se ha convertido en una de las plantas más usadas por el ser humano, y esto se debe a la múltiple cantidad de usos que este puede brindar. Por ejemplo, en la construcción de viviendas rurales, en la fabricación de balsas y puentes, en la fabricación de instrumentos musicales, o como parte de acabados de una vivienda (González, 2001).

Una de las áreas con mejor desempeño del bambú es en la construcción. Esto se debe a los costos de adquisición del material y a su facilidad de montaje. Por ello, Van Der Lugt et al. (2005) exponen: “Bamboo has a very efficient natural structural design; because of the hollowness and the fibers in longitudinal direction, less material mass is needed than in case of materials with a massive section, e.g., timber”⁵(p.2). Pese a ello, el material posee ciertas deficiencias mecánicas: su resistencia al corte y su módulo de elasticidad a la tracción; las cuales han delimitado su desempeño en obra.

2.2.2. Propiedades Mecánicas del Bambú

Las propiedades mecánicas del bambú están sujetas a diferentes variables. Las cuales varían dependiendo de la subespecie analizada. No obstante, también influye la edad del bambú, el tipo de lote seleccionado, y la ubicación geográfica.

La guadua angustifolia es una de las subespecies, la cual se caracteriza por sus excelentes características físicas y mecánicas, en relación a otras (Rodríguez & Morales, 2008). En la Tabla 8 se indican las principales propiedades mecánicas de la guadua angustifolia.

⁵“El bambú tiene un diseño estructural natural muy efectivo; a causa de sus culmos huecos y de sus fibras en el sentido longitudinal, por lo que necesitan una menor masa frente a secciones masivas, por ejemplo, la madera” (Traducción propia).

Tabla 8.*Propiedades Mecánicas de la Guadua Angustifolia*

Ensayos	Resultados (kg/cm²)
Resistencia a la tracción	430
Módulo de Elasticidad a la tracción	190000
Resistencia a la flexión	740
Módulo de Elasticidad a la flexión	179000
Resistencia a la compresión: paralelo a la fibra	560
Resistencia a la compresión: perpendicular a la fibra	650
Módulo de Elasticidad a la compresión	184000

Fuente: Rodríguez & Morales (2008, pp. 29-30).

2.3. Estado del Arte: el Bambucreto

El uso del bambú como material de refuerzo en el hormigón se denomina bambucreto. El bambucreto es un material compuesto por hormigón y por bambú como material de refuerzo, el cual busca ser una alternativa al hormigón armado. El uso de los cables de bambú se presenta como una buena alternativa al uso del bambú en el hormigón, en relación al uso de caña o de tablillas de bambú como material de refuerzo en el hormigón (González, 2001).

El uso del bambucreto se ha justificado por las propiedades físicas y mecánicas del bambú. Por lo cual, se han realizado una serie de investigaciones desde 1914 con la finalidad de caracterizar el comportamiento del bambú en el hormigón, aunque los resultados han sido poco alentadores (González, 2001). Por ejemplo, el gobierno estadounidense durante la guerra de Vietnam construyó de forma experimental una estructura abovedada en concreto reforzado con resultados lamentables, ya que se produjo el derrumbamiento parcial de la misma (Hidalgo, 1978).

2.3.1. *Propiedades Mecánicas del Bambú como Material de Refuerzo*

2.3.1.1. **Ensayos Realizados en Whangpoo, China.**

En la segunda década del siglo XX, la Jefatura de Conservación de Whangpoo fue uno de los primeros institutos en realizar ensayos del bambú como material de refuerzo del hormigón. Sus resultados se indican en la Tabla 9.

Tabla 9.

Resultados de los ensayos mecánicos realizados por la Jefatura de Conservación de Whangpoo, China.

Resultados ensayos mecánicos	MPa	kg/cm ²
Flexión	93,5	952,77
Esfuerzo cortante (muestra seca)	8,32	84,78
Esfuerzo cortante (muestra verde)	7,26	73,98
Módulo de elasticidad	11,67	118,92
Tensión	98,59	1004,63
Compresión	38,67	394,05

Fuente: González (2001, p.17)

Estos ensayos se realizaron sobre una base de 220 muestras. De estos ensayos se determinó que uno de los principales inconvenientes del bambú es su bajo módulo de elasticidad comparado al del hormigón.

2.3.1.2. **Ensayos Realizados por K. Datta.**

En 1935, Datta desarrolló una serie de ensayos, basados en las investigaciones del profesor Bauman sobre las propiedades mecánicas del bambú. Los resultados se indican en la Tabla 10.

Tabla 10.

Ensayos de Datta sobre el uso del bambú como material de refuerzo en el hormigón

Resultado ensayos mecánicos	MPa	kg/cm ²
Flexión	46,95	478,42
Módulo de elasticidad (flexión)	19500	198705,00
Tensión	184,85	1883,62
Módulo de elasticidad (tensión)	17500	178325,00
Compresión	82,85	844,24
Módulo de elasticidad (compresión)	19400	197686,00

Fuente: González (2001, p. 18).

Datta determinó que el uso del bambú como material de refuerzo incrementa la resistencia a la compresión del hormigón, pero no es muy práctico para tolerar los efectos de tracción en relación al acero; ya que el bambú necesita una mayor área de sección transversal para lograr el mismo efecto. Pese a ello, el uso del bambú como material de refuerzo en vigas podría reemplazar, en casas pequeñas y económicas, a las vigas de madera y a las vigas de hormigón armado (González, 2001).

2.3.1.3. Ensayos Realizados por H. E. Glenn.

Glenn en colaboración con la “War Production Board” realizaron en 1944 una serie de ensayos sobre el empleo del bambú como material de refuerzo en el hormigón. Los resultados se indican en la Tabla 11.

Tabla 11.

Ensayos de Glenn sobre el uso del bambú como material de refuerzo en el hormigón

Resultado ensayos mecánicos	MPa	kg/cm ²
Adherencia	2,5	25,48
Módulo de elasticidad (flexión)	15819,75	161203,25
Tensión	267,2	2722,77
Módulo de elasticidad (tensión)	22850,75	232849,14
Compresión	56,3	573,70
Módulo de elasticidad (compresión)	15187	154755,53

Fuente: González (2001, pp. 21-22).

Glenn determinó que el factor de contracción del bambú es muy alto, cuando este se seca por completo. A su vez, él demostró que el módulo de elasticidad y la resistencia a la tracción del bambú, no varía de forma lineal con la edad del tallo como se pensaba antiguamente (González, 2001).

Finalmente, Glenn no recomienda el uso del bambú como material de refuerzo en elementos importantes de hormigón. Pero, sugiere que el bambú se podría utilizar en miembros secundarios de la estructura.

2.3.2. Limitaciones del Bambú Como Material de Refuerzo en el Hormigón

2.3.2.1. Pérdida de Adherencia.

2.3.2.1.1. Variaciones Volumétricas.

Un limitante en el uso de cañas o de tablillas de bambú como material de refuerzo en el concreto, es la pérdida de adherencia por la variación volumétrica del bambú, la cual se suscita en el proceso de fundición del hormigón.

Estas variaciones afectan al hormigón en dos fases. En la primera, la mezcla pierde humedad por el bambú, afectando la relación agua/cemento. Mientras que en la segunda, se

produce un efecto contrario, el hormigón fraguado absorbe la humedad del bambú; haciendo que este se marchite (Hidalgo, 1978).

Hidalgo (1978) puntualiza que, por efecto de la humedad, tanto el diámetro como el espesor de una tablilla aumentan en un 2,5 % y en un 8 %, respectivamente. Mientras, que en las cintas de bambú sólo aumenta un 3,5 % de su espesor. Por lo cual, él infiere que no es necesario un tratamiento de impermeabilizante en el caso de los cables de bambú.

2.3.2.1.2. Impermeabilizantes Químicos.

Hidalgo (1981) sugiere el empleo de impermeabilizantes químicos para evitar la pérdida de adherencia entre el bambú y el hormigón. Algunos impermeabilizantes son: las emulsiones asfálticas, la solución del cloruro de zinc al 2 %, o resinas epóxicas. No obstante, el uso de estos impermeabilizantes químicos puede encarecer la obra de forma considerable.

2.3.2.2. Limitaciones en el Área de Refuerzo.

Datta (1936) sugiere que el bambú no podrá sustituir por completo al acero, ya que el área efectiva del bambú para sustituir el acero debe ser al menos doce veces la de este. Por otro lado, González (2001) quién cita a Glenn (1950) expone que, la cuantía óptima de bambú como material de refuerzo se da, cuando este tiene valores del 3 al 4 % del área total de la sección transversal de la viga (p.38).

En consecuencia, el uso del bambú bajo los métodos tradicionales en vigas de carácter estructural resulta impráctico y poco económico. Es por ello, que se deben desarrollar nuevas metodologías de aprovechamiento del bambú para sopesar estas falencias. Siendo una de estas potenciales alternativas, la implementación de los cables de bambú en el hormigón (Hidalgo, 1978).

2.3.3. *Uso de Cables de Bambú Como Material de Refuerzo en el Hormigón*

Las limitaciones vinculadas a las tablillas, y a las cañas de bambú como material de refuerzo en el hormigón, han derivado en un menor uso de las mismas en la construcción. Lo cual, motivó a Hidalgo a investigar acerca del potencial uso de los cables de bambú, como material de refuerzo en el hormigón con la finalidad de sopesar dichas falencias.

2.3.3.1. Cables de Bambú.

Los cables de bambú son un tipo de material vegetal, que se pueden obtener por trenzado o por torsión de las tiras de bambú. Las cintas o tiras de bambú son un tipo de material vegetal de piezas alargadas y estrechas, que provienen de la capa externa del tallo de bambú.

2.3.3.1.1. *Ensayos de Tracción en las Cintas de Bambú.*

Hidalgo (1978) realizó un total de 163 ensayos de tracción de las cintas de bambú, la especie estudiada fue la *Guadua Angustifolia*. La distribución de los resultados de los ensayos se indica en la tabla 12.

Tabla 12.*Distribución de los ensayos a tracción en las cintas de bambú*

Resistencia a la tracción.	%
1017-1249 kg/cm ²	4,3
1250-1499 kg/cm ²	9,2
1500-1749 kg/cm ²	27
1750-1999 kg/cm ²	23,3
2000-2249 kg/cm ²	12,9
2250-2499 kg/cm ²	9,2
2500-2749 kg/cm ²	9,8
2750-2999 kg/cm ²	2,4
3000-3213 kg/cm ²	1,9

Fuente: Hidalgo (1978, p. 116).

La resistencia máxima a la tracción de las cintas de bambú fue de 3213 kg/cm², la mínima fue de 1017 kg/cm² y la resistencia promedio fue de 1919 kg/cm². A su vez, de estos ensayos Hidalgo (1978) estableció, que la capacidad de resistencia a tracción de las cintas de bambú se reduce a partir de los 5 años.

Por otro lado, Hidalgo (1978) determinó de un análisis de 65 muestras, que el módulo de elasticidad de las cintas de bambú oscilaba de 135 000 kg/cm² a 277 000 kg/cm²; con un módulo de elasticidad promedio de 215 000 kg/cm².

2.3.3.2. Ensayos de Flexión de Vigas.

2.3.3.2.1. Fundición de las Vigas de Hormigón.

En el proceso de fundición de las vigas de hormigón, las armaduras de las vigas ensayadas por Hidalgo (1978) fueron en su totalidad hechas a base de bambú. A su vez, las dimensiones de las vigas ensayadas fueron: 2,20 m de largo, 12 cm de ancho y 20 cm de

altura. La resistencia a la compresión de las vigas fue de 87,88 kg/cm² a los 7 días y de 151,65 kg/cm² a los 28 días.

2.3.3.2.2. *Ensayos de Flexión.*

En total se fundieron 26 vigas de hormigón reforzadas con bambú. De estas se fundieron en grupos de 3, en cada uno de estos grupos se utilizó como material de refuerzo a las tablillas y los cables de bambú. Los ensayos se realizaron a los 28 días de fundición del hormigón y considerando una luz entre apoyos de 2 metros. En la tabla 13 se indican los resultados de los ensayos.

Tabla 13.

Cuadro de resumen de los ensayos de flexión de Hidalgo (1978)

Tiempo (meses)	Carga máxima (kg)			Módulo Rotura (kg/cm ²)		
	Tabl. H	Tabl. V	Cable	Tabl. H	Tabl. V	Cable
10	771	961	1179	32,13	40,04	49,13
12	816	961	1179	34,00	40,04	49,13
18	907	929	1179	37,79	38,71	49,13
24	-	1587	1723	-	66,13	71,79
30	2086	2177	2222	86,92	90,71	92,58
36	1814	1769	2041	75,58	73,71	85,04
42	1224	1360	1859	51,00	56,67	77,46
48	1768	1603	1723	73,67	66,79	71,79

Fuente: Hidalgo (1978, p. 128).

2.3.3.2.3. *Ventajas de los Cables de Bambú.*

De forma general, el uso de los cables de bambú resulta más óptimo en relación a las tablillas y a la caña de bambú porque posee una mayor resistencia, mayor adherencia y mayor capacidad de refuerzo; para una misma área transversal.

El principal motivo por el cual las tiras de bambú tienen mejores propiedades que las tablillas, se justifica porque la zona de mayor resistencia de la caña de bambú sólo ocupa apenas un 30 % de la pared externa del bambú. Por lo que, el 70 % restante no genera ningún aporte (Hidalgo, 1978).

El uso de los cables de bambú mejora la adherencia, ya que según Hidalgo (1978), la adherencia máxima de las tablillas de bambú fue de 5,09 kg/cm²; mientras que la adherencia entre los cables de bambú oscilaba de 6,42 a 18,22 kg/cm². Según Hidalgo (1978), esta capacidad de adherencia se podría incrementar, si se usaran cintas de bambú más anchas, o si se aumentan el número de cintas de bambú en la fabricación del cable.

Por otro lado, se desconoce el comportamiento de los cables de estudio ante efectos de compresión. Hidalgo (1978) no realizó ninguna investigación sobre el tema, por lo que en la presente investigación se considera que el bambú no genera ningún aporte en la zona de compresión de la viga.

3. Capítulo 3

En el presente capítulo se discute las características de las vigas de hormigón simple, de hormigón armado, y de bambuceto. También, se discute el comportamiento de las vigas sometidas a esfuerzos de flexión, y la distribución de los cables de bambú a utilizar en la conformación de las vigas de estudio.

Las dimensiones de la viga fueron 170 cm de longitud, 15 cm de peralte y 11 cm de espesor. Y, en las especificaciones del refuerzo transversal de las vigas de hormigón armado se considera las recomendaciones de Budi & Rahmadi (2019) y de Budi et al. (2017).

3.1. Características Preliminares

3.1.1. Clasificación de Vigas

Las vigas son miembros estructurales, cuya función principal es la transmisión de cargas verticales hacia las columnas de una estructura. Existen varios tipos de vigas, cuya clasificación depende del parámetro utilizado. Por ejemplo, las vigas se pueden clasificar de acuerdo a su sección, a su material, a su peralte, o a su uso en obra.

Las vigas de acuerdo a su sección se clasifican como vigas rectangulares, vigas en T o vigas irregulares. Las vigas de acuerdo con su material se clasifican como vigas de hormigón simple, vigas de hormigón armado, vigas pretensadas, vigas de acero y vigas de madera. A su vez, Martínez (2015) señala que las vigas de acuerdo a su peralte se clasifican como vigas chatas o vigas peraltadas. Y las vigas de acuerdo a su uso en obra se clasifican como vigas principales, vigas secundarias, viguetas y vigas de amarre (1min22s).

También Martínez (2015) indica que las vigas principales son las vigas que resisten las cargas estructurales de la losa; mientras que las vigas secundarias son vigas cuya función

principal es la transmisión de cargas de la losa hacia las vigas principales; además de conferir rigidez y estabilidad a la estructura (1min10s).

3.1.1.1. Vigas Hormigón Simple.

Las vigas de hormigón simple no tienen ningún material de refuerzo; por lo cual, su resistencia depende enteramente del hormigón. Una vez que los esfuerzos internos de la viga exceden el módulo de rotura, se suscita un agrietamiento en la viga. Luego de lo cual, la viga falla.

La expresión matemática usada para el cálculo de esta propiedad, cuando falla en la mitad del vano según la norma ASTM C-293 (2018) es la siguiente:

$$R = \frac{3*P*L}{2*b*d^2}$$

Donde:

R: módulo de rotura

P: máxima carga aplicada en el ensayo

L: longitud del vano libre del espécimen

b: ancho del espécimen

d: peralte del espécimen

Pese a ello, el uso de vigas de hormigón simple para tolerar esfuerzos de flexión no es muy práctico. Ya que como Nilson (1999) expone: “Las vigas de concreto simple son ineficientes como elementos sometidos a flexión debido a que la resistencia a la tensión en flexión es una pequeña fracción de la resistencia a la compresión” (pp.64-65). Es decir, las vigas fallan a tracción antes de desarrollar por completo su resistencia a la compresión.

3.1.1.2. Vigas de Hormigón Armado.

El hormigón armado es un material compuesto por el hormigón y por el acero como material de refuerzo. Las vigas de hormigón armado son vigas, que por las cualidades de sus materiales son eficientes ante los efectos de compresión y de tracción. Por lo que, es común el uso de las mismas como miembros estructurales en viviendas, o en edificaciones.

Por otro lado, el comportamiento del hormigón armado es óptimo; pues existe una adherencia química entre los materiales, lo cual permite la transmisión de esfuerzos entre los materiales.

3.1.1.3. Vigas Bambucreto.

Las vigas de bambucreto son vigas constituidas por el hormigón y por el bambú como material de refuerzo. El uso del bambú dentro del hormigón puede ser como caña de bambú, como tablilla de bambú, o como cable de bambú.

3.1.2. Cubiertas

Por otro lado, las cubiertas son elementos arquitectónicos, que tienen una función estética y funcional en las viviendas. Su principal rol es proteger el interior de la vivienda de los ocupantes frente a agentes externos como: la lluvia, el humo, la ceniza, la nieve, el viento, etc. Los principales tipos de cubiertas que existen son: cubiertas a dos aguas, a cuatro aguas, holandesa, y plana.

De forma general, las cubiertas no tienen cargas muy significativas; ya que el peso específico de los materiales que la constituyen no es muy grande. Los principales materiales que se utilizan en las cubiertas son: tejas de cerámica, teja de hormigón, y tejas de PVC. Aunque también, se puede utilizar como alternativas chapas de acero galvanizado con Zinc, chapas de acero inoxidable, láminas de cobre, entre otras.

3.2. Análisis de Vigas Sometidas a Flexión

El principal motivo de estudio de la flexión en vigas es determinar la capacidad máxima de tolerancia de la viga ante ciertas solicitaciones. Es decir, que su capacidad ante los efectos de flexión depende: de las propiedades mecánicas del hormigón, de las propiedades mecánicas del material de refuerzo, de la condición de apoyo de la viga, y del tipo de solicitación.

De forma general, la flexión se refiere al tipo de deformación lateral que se presenta en los miembros estructurales alargados cuando son sometidas a cargas verticales. La flexión es de suma importancia, ya que es un fenómeno que se presenta en todas las vigas. Las vigas de hormigón armado tienen un comportamiento dúctil ante los efectos de la flexión porque el hormigón y el acero trabajan de forma conjunta para tolerar los efectos de compresión y tracción, derivados de la flexión (Nilson, 1999).

3.2.1. Teoría Elástica

La teoría elástica en el hormigón nos indica que se mantiene una proporcionalidad entre los esfuerzos y las deformaciones del material, lo cual se debe a la ley de Hooke (Nilson, 1999). Pero, esta ley sólo es válida mientras los materiales se mantengan en el rango elástico; ya que, si se excede el límite elástico, se produce una plastificación en el material. A su vez, Nilson (1999) afirma:

Mientras el esfuerzo de tensión en el concreto se mantenga por debajo del módulo de rotura, de manera que no se desarrollen grietas de tensión, la distribución de deformaciones unitarias y esfuerzos que aparece es esencialmente la misma que en una viga elástica y homogénea. La única diferencia es la presencia de otro material: el acero de refuerzo. (p.66)

Nilson (1999) indica, que las hipótesis consideradas para el estudio del hormigón armado son las siguientes:

1. Las secciones planas permanecen planas para pequeñas deflexiones.
2. Las deformaciones en el hormigón son proporcionales a la distancia desde el eje neutro.
3. Se trabaja sólo en el rango elástico.
4. El hormigón no tolera esfuerzos de tensión.
5. Los esfuerzos de compresión en el hormigón varían de forma proporcional a su distancia con el eje neutro (pp.62-64).

3.2.2. Teoría de Última Resistencia.

Hoy en día, “el diseño de estructuras de concreto reforzado se fundamenta en el concepto de proporcionar suficiente resistencia para sostener sobrecargas hipotéticas” (Nilson, 1999, p.74). Por ello, el código *ACI 318-14* del American Concrete Institute (2014) se basa en el diseño por la teoría de última resistencia, ya que considera el comportamiento no lineal de los materiales.

En esta teoría se determina de forma analítica una resistencia nominal, a la cual se le aplica un coeficiente de reducción en base a su función estructural, y se la compara con la resistencia requerida (Nilson, 1999). Estos factores se utilizan por varios motivos: por la calidad de mano de obra, por la calidad de los materiales usados en obra, por una inexactitud de la teoría misma, etc.

Las hipótesis consideradas por el American Concrete Institute (2014) para el estudio del hormigón armado bajo la teoría de última resistencia son las siguientes:

1. Las secciones planas permanecen planas para pequeñas deflexiones.
2. El hormigón no tolera esfuerzos de tensión.

3. El hormigón falla por compresión cuando tiene una deformación unitaria de 0,003.
4. Se puede modelar los esfuerzos de compresión en el hormigón a través del rectángulo de Whitney.
5. Los esfuerzos de fluencia en el acero son directamente proporcionales a las deformaciones en el rango elástico y constantes en el rango plástico (pp.347-348).

3.2.3. Estados de Agrietamiento del Hormigón

Al momento que se induce una viga a esfuerzos de flexión, estas atraviesan por tres etapas diferentes, previo a su colapso. Etapa de no agrietamiento, etapa de agrietamiento y etapa de resistencia última (Nilson, 1999).

En la etapa de no agrietamiento no existe fisuración alguna en el hormigón porque el módulo de rotura no ha sido excedido.

En la etapa de agrietamiento, los esfuerzos de tracción sobrepasan el límite del módulo de rotura y se produce la fisuración en el hormigón. Luego de lo cual, el material de refuerzo empieza a fluir.

Finalmente, en la etapa de resistencia última, el comportamiento del hormigón cambia y deja de ser lineal. Por lo que se produce un desplazamiento vertical del eje neutro y de las grietas de tensión. Luego de lo cual, el hormigón falla.

3.2.4. Mecanismos de Falla en el Hormigón

Nilson (1999), menciona dos posibles mecanismos de falla en el hormigón: falla frágil o falla dúctil (p.66). Una falla frágil es un mecanismo de falla, que se suscita en el hormigón cuando el acero no entra en fluencia, por lo que el hormigón tiene una falla por aplastamiento, la cual es de carácter explosivo (Nilson, 1999).

Por otro lado, una falla dúctil se suscita cuando el acero de refuerzo supera su límite de fluencia. “Entonces las grietas de tensión en el concreto se ensanchan de manera visible y

se propagan hacia arriba, presentándose simultáneamente una deflexión significativa de la viga” (Nilson, 1999, p.66).

3.3. Estimación de la Capacidad de las Vigas de Estudio

3.3.1. Vigas Hormigón Simple

Las vigas de hormigón simple tienen una baja resistencia a la tracción, porque carecen de un refuerzo longitudinal y transversal. Al no existir un refuerzo dentro de la viga, la viga falla al llegar a su etapa de agrietamiento. Es decir, las vigas de hormigón simple al ser ensayadas no tolerarán una gran carga, ni momento externo.

3.3.2. Vigas Hormigón Armado

Las vigas de hormigón armado están conformadas por 4 varillas de 8 mm de diámetro, tal como lo mencionan las publicaciones de Budi & Rahmadi (2019) y de Budi et al. (2017).

A su vez, dichas investigaciones sugieren el uso de un refuerzo transversal de $1\phi 5 @12$ cm y de $1\phi 5 @6$ cm, respectivamente. No obstante, en la investigación se opta por un refuerzo transversal de $1\phi 5 @15$ cm porque la viga de estudio es una viga secundaria, y en la investigación no se busca controlar los efectos de cortante, ya que no se contempla en el alcance de la presente disertación.

La estimación de la capacidad de las vigas a una carga y momento externo será mayor en relación a las de hormigón simple y de bambuceto, porque los resultados de las investigaciones de Budi & Rahmadi (2019) y de Budi et al. (2017) de una viga de hormigón armado en condiciones de refuerzo semejante tenían mayor capacidad en relación a las reforzadas con bambú como material de refuerzo.

3.3.3. Vigas Bambucreto

Las vigas de hormigón reforzadas con cables de bambú están conformadas por 4 cables de bambú, los cuales están elaborados por 3 cintas de bambú cada uno. Se utilizan sólo 4 cables de bambú porque se busca mantener una correspondencia con el armado longitudinal de los cables de bambú de la investigación de Hidalgo (1978).

El refuerzo transversal en las vigas de bambucreto está conformado por cintas de bambú, las cuales al igual que en las vigas de hormigón armado tendrán un refuerzo de $1\phi 5 @ 15$ cm porque no se busca controlar los efectos de cortante en la viga.

Por otro lado, la capacidad de las vigas reforzadas con cables de bambú a carga y a momento externo será mayor en relación a las de hormigón simple por el aporte de resistencia a la tracción de los cables de bambú, pero menor a las vigas de hormigón armado por los resultados de las investigaciones de Budi & Rahmadi (2019) y de Budi et al. (2017).

4. Capítulo 4

En este capítulo se discute el proceso de fabricación de los cables de bambú; el proceso de elaboración de los encofrados; el proceso de montaje de las armaduras; los resultados de la caracterización de los materiales pétreos en el laboratorio; la resistencia a la compresión de la mezcla referencial; los ensayos de tracción en las tiras de bambú; y los resultados obtenidos de la flexión en vigas en los casos de estudio.

4.1. Elaboración de las Tiras de Bambú

Las cintas o tiras de bambú son un tipo de material vegetal, que proviene de la caña de bambú. Las tiras de bambú deben ser extraídas de la capa externa del tallo de un bambú de dos a tres años de edad para poder ser usadas en la conformación de los cables de bambú.

Puesto que no existe una normativa que regule el proceso de obtención de las cintas de bambú. Se realizó la obtención de las tiras de bambú en una carpintería local, tal como se indica en las Figuras 1, 2 y 3. Las dimensiones de las cintas de bambú fueron de 1700 mm de largo, 10 mm de ancho y un espesor variable de 4 a 7 mm.

Figura 1.

Proceso de obtención de las tiras de Bambú en una carpintería local



Fuente: *Elaboración Propia*

Figura 2.

Bambú cortado después de realizar el primer corte en la carpintería local



Fuente: *Elaboración Propia*

Figura 3.

Tiras de Bambú obtenidas de la parte externa de la Guadua Angustifolia



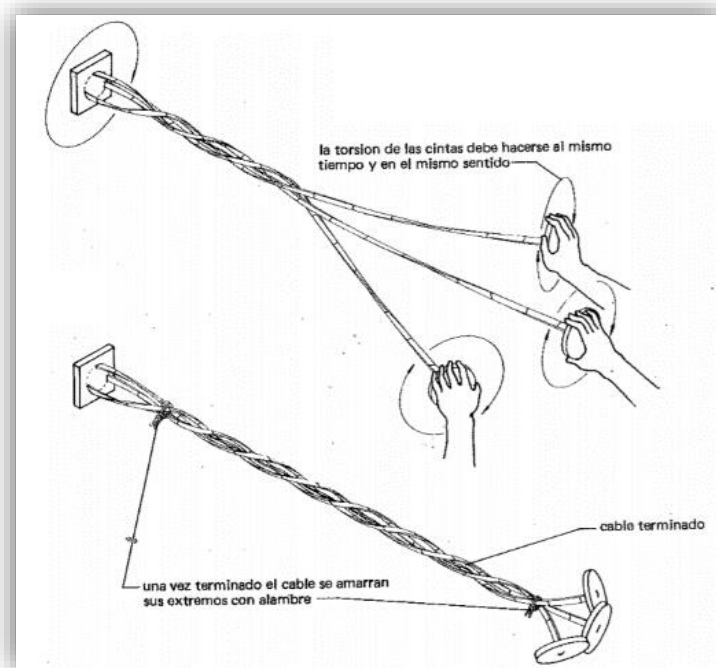
Fuente: *Elaboración Propia*

4.2. Elaboración de los Cables de Bambú

Los cables de bambú son un tipo de material vegetal compuesto, que se obtienen por torsión de las cintas de bambú. Dado que no existe una normativa que regule el proceso de fabricación de los cables, la investigación opta por las especificaciones realizadas por Hidalgo (1978), tal como se indica en la Figura 4.

Figura 4.

Proceso de fabricación de los cables de Bambú acorde a Hidalgo (1981)

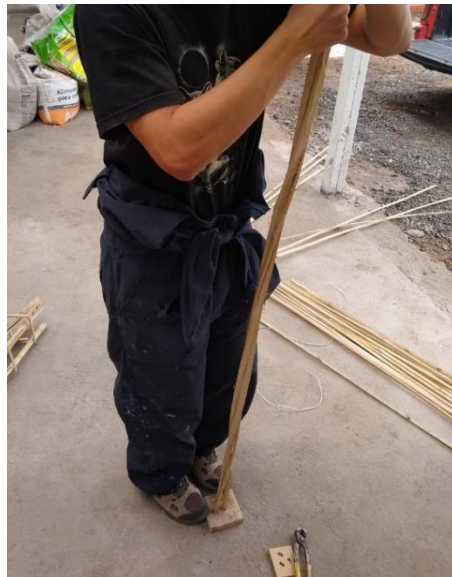


Fuente: Hidalgo (1981, p. 12).

La formación de los cables de bambú por torsión usa el mismo principio de elaboración de las cuerdas de fique. Por lo cual, los extremos de las tiras de bambú se fijan a una superficie de madera para luego torcer todas las tiras a la vez y en el mismo sentido, pero sin exceder de 3 a 4 torsiones por metro lineal (Hidalgo, 1981). El proceso de fabricación de los cables se indica en la Figura 5 y en la Figura 6.

Figura 5.

Fabricación cables de Bambú: Proceso de torsión en las tiras de Bambú



Fuente: *Elaboración Propia*

Figura 6.

Fabricación cables de Bambú: Proceso de ajuste con alambre en el extremo del cable.



Fuente: *Elaboración Propia*

4.3. Elaboración del Armado de las Viguetas

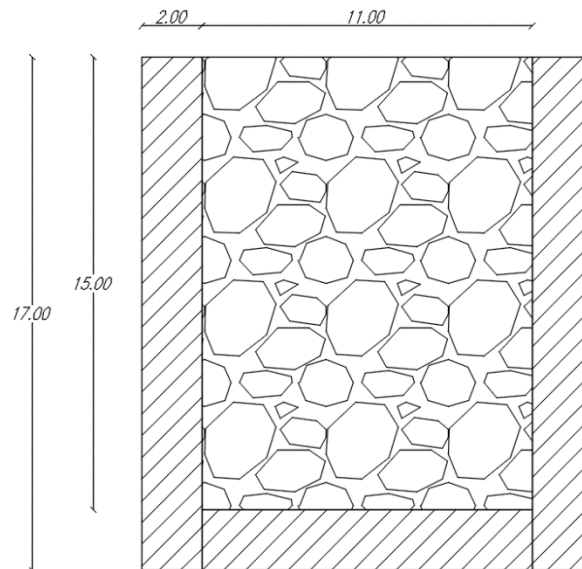
La investigación considera tres casos de estudio: el caso de una viga de hormigón simple, el caso de una viga de hormigón armado y el caso de una viga de hormigón reforzada con cables de bambú.

4.3.1. Elaboración de los Encofrados

En el proceso de elaboración de los encofrados se consideró el uso de la tabla de monte, por su disponibilidad en el mercado y su bajo costo económico. Las dimensiones de las viguetas analizadas fueron de 170 cm de largo, por 11 cm de ancho y por 15 cm de peralte. En la Figura 7 se indica un corte transversal del dimensionamiento de la viga y de su encofrado.

Figura 7.

Corte Transversal de la viga encofrada



Fuente: *Elaboración Propia*

Se encofraron un total de 9 viguetas, acorde a las especificaciones del alcance de la presente disertación. En la Tabla 14 se indica el detalle del análisis de costos reales para el encofrado de las viguetas. Y en la Figura 8 se indica el resultado final de los encofrados.

Tabla 14.

Análisis de Costo de materiales en la fabricación del encofrado de las vigas

Materiales:				
Descripción:	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo
		A	B	C=A*B
Tabla de monte de 15 (240x15x2)	m2	1,68	10,85	18,23
Tabla de monte de 30 (240x30x2)	m2	4,59	18,33	84,13
Clavos 2", 2 1/2", 3", 3 1/2"	Kg	0,4	2,13	0,85
SUBTOTAL				103,21

Fuente: Cámara de la Industria de la Construcción (2020, p. 23).

Figura 8.

Encofrados terminados de las viguetas



Fuente: *Elaboración Propia*

4.3.2. *Elaboración del Armado*

4.3.2.1. **Armadura de Acero.**

Se utilizó como refuerzo longitudinal y transversal, una armadura de una cadena de amarre, ya que, esta cumplía con las especificaciones del armado indicadas en la presente disertación. En la Figura 9 se indica el detalle del armado de acero.

Figura 9.

Detalle de la armadura de acero



Fuente: *Elaboración Propia*

4.3.2.2. **Armadura de Bambú.**

La conformación de la armadura de bambú contempla 2 cables de bambú en la zona de compresión y 2 cables en la zona de tracción. El refuerzo transversal de la viga está hecho a base de los residuos de tiras de bambú, en contraposición a lo indicado por Hidalgo (1978).

Por lo cual, se podría esperar leves afecciones al comportamiento de las vigas sometidas a flexión. El armado de las vigas de bambú se indica en la Figura 10 y el detalle de los estribos se indica en la Figura 11. Las dimensiones de los estribos son de 8 cm de ancho, de 11 cm de alto y de 1 cm de espesor.

Figura 10.

Armado en las vigas de Bambú



Fuente: *Elaboración Propia*

Figura 11.

Detalle de los estribos de Bambú



Fuente: *Elaboración Propia*

4.4. Caracterización de los Agregados

El material que se usa para la elaboración de las vigas y los cilindros de hormigón proviene de la mina de “Pintag” por las buenas propiedades físicas y mecánicas del material (Cevallos, 2012).

Pese a ello, el alcance de la investigación no contempla la formulación de una mezcla con base en las propiedades del material. En su lugar, la investigación opta por la

caracterización del material en el laboratorio, para utilizar la dosificación indicada por Cevallos (2012) en su trabajo de titulación.

Los ensayos que se realizan para la caracterización del material son: granulometría del agregado fino, granulometría del agregado grueso, ensayo de abrasión, material fino que pasa el tamiz # 200, gravedad específica del agregado fino y gravedad específica del agregado grueso.

4.4.1. *Granulometría del Agregado Fino*

Tabla 15.

Granulometría del Agregado Fino proveniente de la mina de Pintag

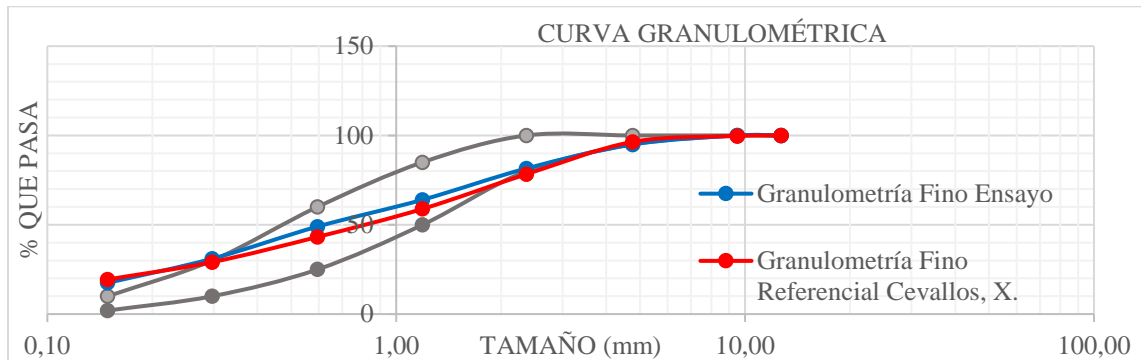
Malla No.	Abertura (mm)	Masa Retenida Parcial (g)	Masa Retenida Acumulada (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje que Pasa (%)	Especificación del % que pasa	Porcentaje que pasa Tesis referencial (Cevallos) ^a
1/2"	12,7	0	0	0	100	100	100
3/8"	9,51	0	0	0	100	100	99,7
No. 4	4,76	50	50	5	95	95-100	96,4
No. 8	2,36	185	185	18,5	81,5	80-100	78,3
No. 16	1,19	175	360	36	64	50-85	58,9
No. 30	0,595	150	510	51	49	25-60	43,2
No. 50	0,297	180	690	69	31	10-30	29,1
No. 100	0,149	135	825	82,5	17,5	2-10	19,4
Pasa No. 100		125	950	95	5		
Suma		1000					

Nota. ^a Los datos descritos en esta columna son extraídos de Cevallos (2012, p. 26).

Fuente: *Elaboración Propia.*

Figura 12.

Curva Granulométrica del agregado Fino proveniente de la mina de Pintag



Nota. La información de la curva granulométrica referencial es extraída de Cevallos (2012, p. 26).

Fuente: Elaboración Propia.

Tras el ensayo, se evidencia que el material fino cumple con la especificación de la granulometría referencial, tal como se indica en la Tabla 15 y en la Figura 12.

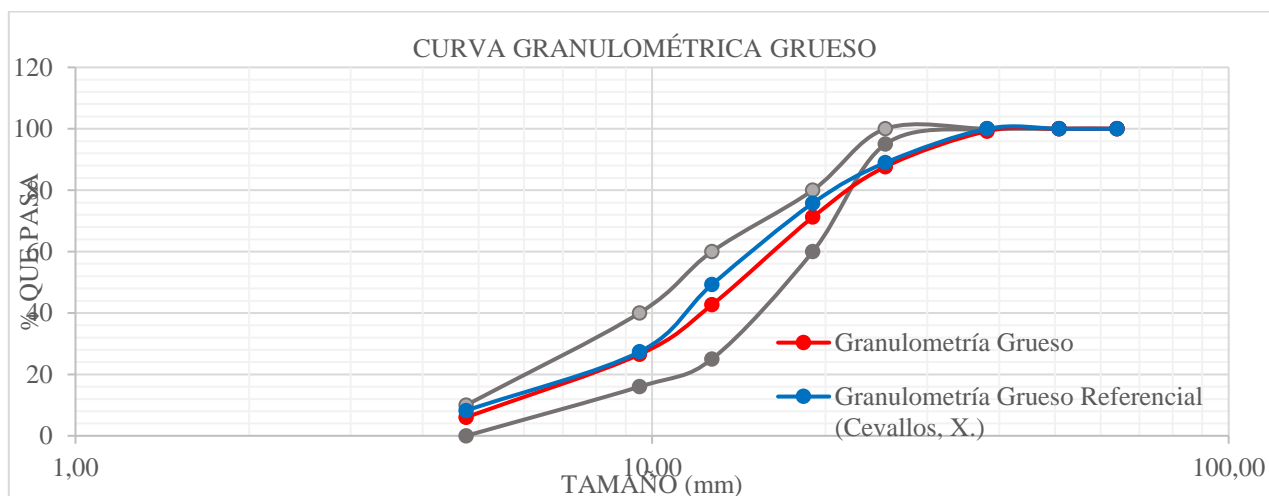
4.4.2. Granulometría del Agregado Grueso

Tabla 16.*Granulometría del Agregado Grueso proveniente de la mina de Pintag*

Malla No.	Abertura (mm)	Masa Retenida Parcial (g)	Masa Retenida Acumulada (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje que Pasa (%)	Especificación del % que pasa	Porcentaje que pasa Tesis referencial (Cevallos) ^b
2 1/2 "	64	0	0	0,00	100,00	100	100
2 "	50,8	0	0	0,00	100,00	100	100
1 1/2 "	38,1	155	155	0,78	99,23	100	100
1 "	25,4	2470	2470	12,35	87,65	95-100	88,97
3/4 "	19,0	3285	5755	28,78	71,23	60-80	75,78
1/2 "	12,7	5715	11470	57,35	42,65	25-60	49,23
3/8 "	9,51	3230	14700	73,50	26,50	16-40	27,35
No. 4	4,76	4090	18790	93,95	6,05	0-10	8,22
Pasa No. 4		1055	19845	99,225	0,775		
Suma		20000					

Nota. ^b Los datos descritos en esta columna son extraídos de Cevallos (2012, p.27).

Fuente: *Elaboración Propia.*

Figura 13.*Curva Granulométrica del agregado Grueso proveniente de la mina de Pintag*

Nota. La información de la curva granulométrica referencial es extraída de Cevallos (2012, p. 27).

Fuente: *Elaboración Propia.*

Tras el ensayo, se evidencia que el material grueso cumple con la especificación de la granulometría referencial, tal como se indica en la Tabla 16 y en la Figura 13.

4.4.3. *Desgaste de los Agregados Gruesos*

$$C = A - B$$

$$\% \text{ Abrasión} = \frac{C \cdot 100}{A}$$

Donde:

A: Masa inicial de la muestra (g)

B: Material que retiene el tamiz N°12 (g)

C: Masa que pasa el tamiz N°12 (g)

% Abrasión: Porcentaje de desgaste (%)

Tabla 17.

Cuadro de Resumen del ensayo de abrasión

	Ensayo	Ensayo Tesis Referencial (Cevallos, X) ^c
A:	5000	5010
B:	3648,7	3645
C:	1351,3	1365
% Abrasión	27,03 %	27,25 %

Nota. ^c Los datos descritos en esta columna son extraídos de Cevallos (2012, p. 33).

Fuente: *Elaboración Propia.*

Tras el ensayo de abrasión, se confirma que el material pétreo es semejante al de la tesis referencial en esta propiedad, tal como se indica en la Tabla 17. Por lo que se lo considera para la abrasión.

4.4.4. Material Fino que Pasa el Tamiz N°200

$$P = \frac{(W-R)*100}{W}$$

Donde:

P: Porcentaje de material que pasa el tamiz N°200 (%)

W: Masa inicial de la muestra (g)

R: Masa de material retenida en el tamiz N°200 después del ensayo (g)

Tabla 18.

Cuadro de resumen del ensayo del material fino que pasa el tamiz N°200

	Ensayo	Ensayo Referencial (Cevallos, X.) ^d
W (g):	300	626,1
R (g):	256,3	530,31
P (%):	14,57 %	15,30 %

Nota. ^dLos datos descritos en esta columna son extraídos de Cevallos (2012, p. 28).

Fuente: *Elaboración Propia.*

Tras el ensayo del material fino que pasa el tamiz N°200, se confirma que el material pétreo es semejante al de la tesis referencial en esta propiedad. Tal como se indica en la Tabla 18.

4.4.5. Gravedad Específica del Agregado Fino

$$Ge = \frac{A}{B+S-C}$$

$$Ges = \frac{S}{B+S-C}$$

$$Gea = \frac{A}{B+A-C}$$

$$Ab = \frac{(S-A)*100}{A}$$

Donde:

Ge: Gravedad específica de *Bulk*

A: Masa de la muestra seca (g)

B: Masa del matraz con agua (g)

C: Masa de la muestra + Masa matraz + agua (g)

S: Masa de la muestra saturada con superficie seca (g)

Ges: Gravedad específica del material saturado con superficie seca

Gea: Gravedad específica aparente

Ab: Porcentaje de absorción (%)

Tabla 19.

Datos y resultados de los ensayos de gravedad específica para el agregado fino

	Ensayo # 1	Ensayo # 2
A (g):	494,2	493,8
B (g):	646,9	646,3
C (g):	942,2	942
S (g):	500,2	500
Ge:	2,41	2,42
Ges:	2,44	2,45
Gea:	2,48	2,49
Ab (%):	1,21 %	1,26 %

Nota. Se realizaron 2 ensayos para determinar la gravedad específica del material por la alta sensibilidad de los mismos.

Fuente: *Elaboración Propia.*

Tabla 20.*Cuadro comparativo de los resultados y de la tesis referencial*

	Valor Promedio de los Ensayos:	Ensayo Tesis Referencial (Cevallos) ^e
Ge:	2,41	2,17
Ges:	2,44	2,31
Gea:	2,49	2,52
Ab (%):	1,23 %	6,28 %

Nota. ^e Los datos descritos en esta columna son extraídos de Cevallos (2012, p. 37).

Fuente: *Elaboración Propia.*

En la gravedad específica del material fino existe una pequeña diferencia entre los valores obtenidos del material y de la tesis referencial. Tal como se evidencia en la Tabla 19 y en la Tabla 20.

Por lo cual, se podría esperar una variación no muy significativa en la resistencia de la mezcla. Dado que la diferencia no es muy grande y que el material sigue cumpliendo con las otras especificaciones, se sigue considerando al agregado fino como apto.

4.4.6. Gravedad Específica del Agregado Grueso

$$Ge = \frac{A}{B-C}$$

$$Ges = \frac{B}{B-C}$$

$$Gea = \frac{A}{A-C}$$

$$Ab = \frac{(B-A)*100}{A}$$

Donde:

Ge: Gravedad específica de *Bulk*

A: Masa de la muestra seca (g)

B: Masa de la muestra con superficie seca (g)

C: Masa de la muestra sumergida en el agua (g)

Ges: Gravedad específica del material saturado con superficie seca

Gea: Gravedad específica aparente

Tabla 21.

Datos y resultados de los ensayos de gravedad específica para el agregado grueso

	Ensayo # 1	Ensayo # 2
A (g):	3945	3965
B (g):	4050	4060
C (g):	2346	2346
Ge:	2,32	2,31
Ges:	2,38	2,37
Gea:	2,47	2,45
Ab (%):	2,66 %	2,40 %

Nota. Se realizaron 2 ensayos para determinar la gravedad específica del material por la alta sensibilidad de los mismos.

Fuente: *Elaboración Propia.*

Tabla 22.

Cuadro comparativo de los resultados y de la tesis referencial

	Valor Promedio del Ensayo:	Ensayo Tesis Referencial (Cevallos) ^f
Ge:	2,31	2,14
Ges:	2,37	2,23
Gea:	2,46	2,35
Ab (%):	2,53 %	4,29 %

Nota. ^fLos datos descritos en esta columna son extraídos de Cevallos (2012, p. 38).

Fuente: *Elaboración Propia.*

En los ensayos de gravedad específica del material grueso se evidencia que existe una pequeña diferencia entre los valores obtenidos y de la tesis referencial. Tal como se evidencia en la Tabla 21 y en la Tabla 22. Pese a ello, se espera que la variación en la resistencia del

hormigón no sea muy significativa; ya que el material sigue cumpliendo con las otras especificaciones. Por lo cual, se considera el material grueso como apto.

4.5. Ensayos de Tracción de Cintas de Bambú

Actualmente no existe una norma que regule los ensayos a tracción de las tiras de bambú de la zona externa del tallo, por lo que los resultados son sólo referenciales. Se realizaron en total tres ensayos a tracción de las tiras de bambú de la parte externa del tallo usando la máquina universal, los resultados obtenidos se indican en la Tabla 23. A su vez, se determinó que la resistencia a la tracción promedio de las cintas de bambú fue de 2201,04 kg/cm².

Tabla 23.

Resultados de los ensayos de tracción de las tiras de bambú

	Longitud inicial (cm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Carga máx. (N)	Fy (kg/cm ²)
Nº1	36,0	13,08	4,55	14497,50	2484,01
Nº2	35,5	15,98	6,50	17376,90	1705,93
Nº3	35,9	14,52	4,17	14335,20	2414,24

Fuente: *Elaboración Propia*

Figura 14.

Ensayo de tracción de las tiras de bambú en el laboratorio de Pontificia Universidad Católica del Ecuador



Fuente: *Elaboración Propia*

4.6. Ensayos de Tracción de Cables de Bambú

Se elaboraron tres cables de bambú con la intención de medir su resistencia a la tracción de forma referencial. Al momento de realizar el ensayo en la máquina universal se obtuvo un inconveniente dado que la superficie de los extremos del cable es irregular.

Para lo cual, se optó por la realización de una modificación de la probeta para poder ser ensayada. En los extremos laterales del cable se colocó un tubo hueco de acero de 2 pulgadas de diámetro, relleno con material epóxico adherente para fijar los cables de bambú. Tal como se indica en la Figura 15.

Figura 15.

Detalle de las probetas de los cables de bambú



Fuente: *Elaboración Propia*

A pesar de ello, no se pudo realizar los ensayos porque las mordazas de la máquina universal fueron presionando los bordes de los tubos, haciendo que estos se deformen por la alta presión. Por lo que, no se registró ningún valor de las tres probetas.

La incidencia de estos resultados no es significativa para el alcance global de la investigación porque los ensayos de flexión nos indican la capacidad máxima de las vigas ante los efectos de cargas y momentos externos. Estos ensayos a tracción de los cables de bambú se indican en la Figura 16.

Figura 16.*Ensayos de tracción de los cables de Bambú*Fuente: *Elaboración Propia***4.7. Ensayo a Tracción de la Varilla de Acero**

Se realiza un ensayo de tracción de una varilla de acero de 8 mm de diámetro, con la finalidad de caracterizar la resistencia a la fluencia del acero que conforma el material de refuerzo en el hormigón armado. Los resultados del ensayo a la tracción de la varilla de acero se indican en la Tabla 24 y en la Figura 17.

Tabla 24.*Resultados del ensayo a la tracción de la varilla de acero*

Nº	L (cm)	d (mm)	P. última (kg)	σ últim. (kg/cm ²)
1	80,8	8	2113	4203,68

Fuente: *Elaboración Propia*

Figura 17.

Ensayo a la tracción de la varilla de acero



Fuente: *Elaboración Propia*

4.8. Ensayos a Compresión de los Cilindros de Hormigón

Los ensayos de compresión se realizaron a los 7, a los 14 y a los 28 días. Los resultados de todos los ensayos se indican en la Tabla 25. En la Tabla 26 se observa la resistencia promedio a la compresión del hormigón en las vigas de hormigón simple, en las vigas de hormigón armado y en las vigas de hormigón reforzadas con cables de bambú. A su vez, en las Figuras 18, 19 y 20 se muestran las curvas de resistencia a la compresión del hormigón en las vigas de estudio.

Tabla 25.*Resultados de los ensayos a la compresión en todos los cilindros de hormigón*

Ensayos de cilindros a compresión:			
	f'c (kg/cm ²) a los 7 días:	f'c (kg/cm ²) a los 14 días:	f'c (kg/cm ²) a los 28 días:
Viga Hormigón Simple # 1	122,42	212,26	241,01
Viga Hormigón Simple # 2	123,43	194,78	244,12
Viga Hormigón Simple # 3	128,09	203,09	253,69
Viga Hormigón Armado # 1	114,92	194,74	241,79
Viga Hormigón Armado # 2	128,21	225,76	246,34
Viga Hormigón Armado # 3	122,68	210,25	249,34
Viga Bambucreto # 1	119,31	201,86	247,86
Viga Bambucreto # 2	146,16	208,96	256,18
Viga Bambucreto # 3	131,04	195,85	242,31

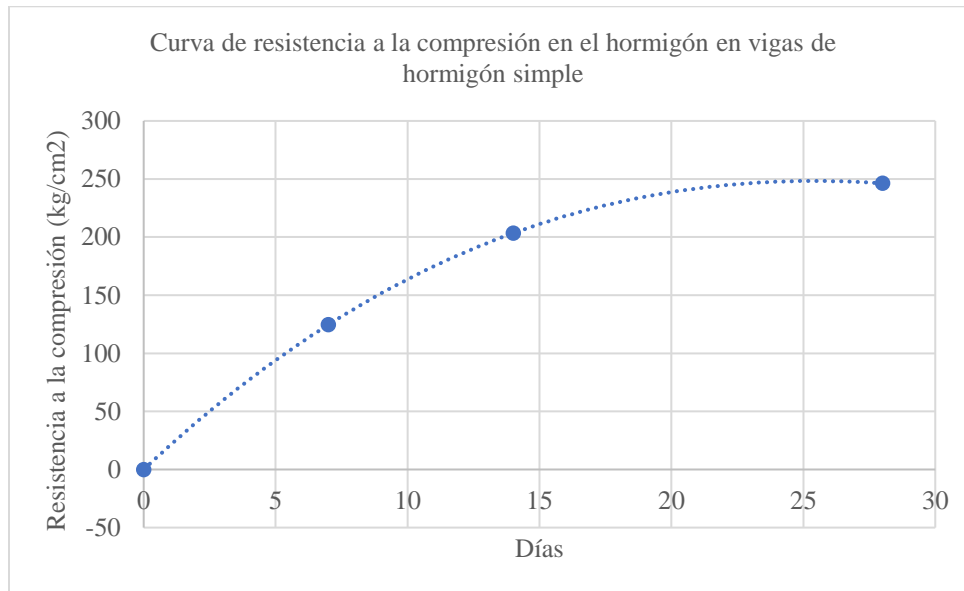
Fuente: *Elaboración Propia***Tabla 26.***Resistencia promedio a la compresión del hormigón*

Resumen de Ensayos a Compresión			
	Viga Hormigón Simple	Viga Hormigón Armado	Viga Bambucreto
Días	f'c (kg/cm ²)	f'c (kg/cm ²)	f'c (kg/cm ²)
0	0	0	0
7	124,65	121,94	132,17
14	203,38	210,25	202,22
28	246,27	245,82	248,78

Fuente: *Elaboración Propia*

Figura 18.

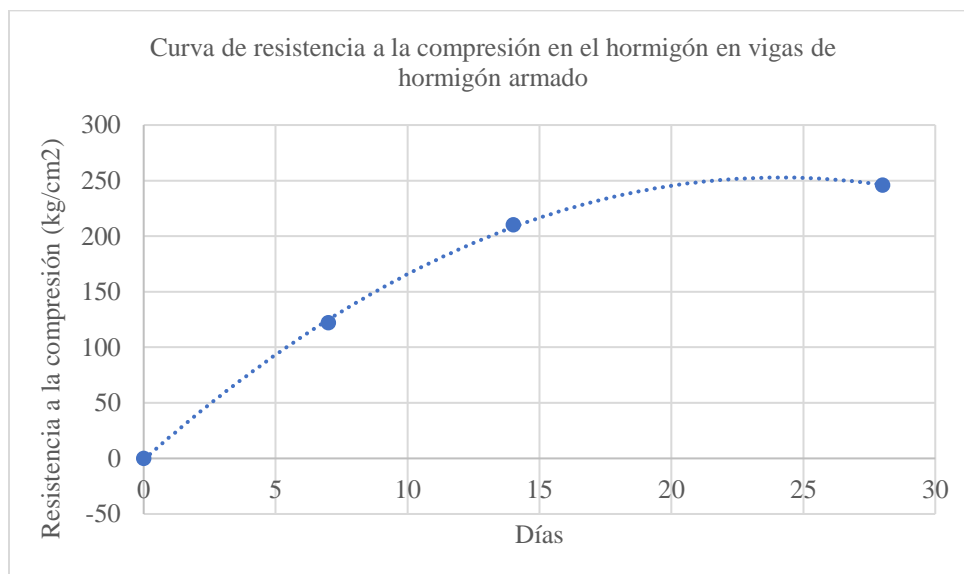
Curva de resistencia a la compresión en el hormigón en vigas de hormigón simple



Fuente: *Elaboración Propia*

Figura 19.

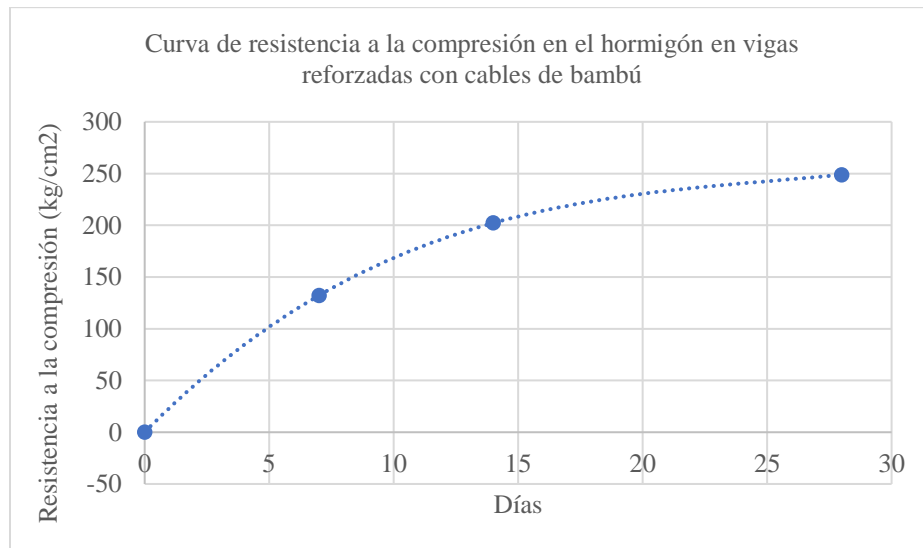
Curva de resistencia a la compresión en el hormigón en vigas de hormigón armado



Fuente: *Elaboración Propia*

Figura 20.

Curva de resistencia a la compresión en el hormigón en vigas reforzadas con cables de bambú



Fuente: *Elaboración Propia*

4.9. Ensayos a Flexión de las Viguetas de Hormigón

Los resultados de todos los ensayos a flexión de las vigas de estudio se muestran en la Tabla 27, y los valores promedio de la carga máxima y del momento máximo se indican en la Tabla 28.

Tabla 27.*Resultados de los ensayos a flexión en las vigas de hormigón*

Ensayos de flexión en el hormigón						
	P (kg)	L (cm)	b (cm)	d (cm)	R (kg/cm ²)	M (ton.m)
Viga Hormigón Simple # 1	759,735	80	11	15	36,84	0,152
Viga Hormigón Simple # 2	635,82	80	11,5	14,5	31,56	0,127
Viga Hormigón Simple # 3	883,65	80	11	15	42,84	0,177
Viga Hormigón Armado # 1	3395,9	80	12	13,5	186,33	0,679
Viga Hormigón Armado # 2	3282,9	80	11,1	13,6	191,88	0,657
Viga Hormigón Armado # 3	3181,8	80	11,3	13	199,94	0,636
Viga Bambucreto # 1	1558,55	80	11,4	12,5	105,00	0,312
Viga Bambucreto # 2	1646,2	80	11,5	12,6	108,20	0,329
Viga Bambucreto # 3	1470,9	80	11,3	12,8	95,34	0,294

Fuente: *Elaboración Propia.***Tabla 28.***Carga Máxima y Momento Máximo Promedio en los Ensayos a Flexión de las Vigas de Estudio*

Resumen de Ensayos a Flexión		
	P (kg)	M (ton.m)
Vigas Hormigón Simple	759,735	0,152
Vigas Hormigón Armado	3286,87	0,657
Vigas Bambucreto	1558,55	0,312

Fuente: *Elaboración Propia.*

5. Discusión de Resultados

En el presente capítulo se discute un análisis de eficiencia de las vigas de estudio, considerando un análisis económico, y un análisis de la máxima carga aplicada en las vigas de estudio. Y, finalmente se establece una discusión de los resultados de las vigas de hormigón reforzadas con cables de bambú para evaluar su potencial uso en el medio rural para una cubierta sencilla.

5.1. Análisis de Eficiencia

El análisis de eficiencia de las vigas de hormigón reforzadas con cables de bambú se lo realiza en relación con las vigas de hormigón simple y de hormigón armado, considerando el aspecto económico y la carga máxima de la viga. De forma adicional, en este análisis se considera a la eficiencia como una relación entre la capacidad de la viga y el costo de producción.

Los resultados de la capacidad promedio de las vigas de estudio se indican en la tabla 38. Y los detalles acerca de los precios unitarios de las vigas de estudio se indican en las tablas 39, 40 y 41.

Tabla 29.

Resultados promedio de la capacidad de las vigas de estudio

Resumen de Ensayos a flexión			
	P (kg)	M (ton.m)	Costo Producción (\$)
Viga Hormigón Simple	759,735	0,152	14,66
Viga Hormigón Armado	3286,87	0,657	18,35
Viga Bambucreto	1558,55	0,312	16,86

Fuente: *Elaboración Propia*

Tabla 30.*Detalle precios unitarios para una viga de hormigón simple de 170x11x15 cm*

Materiales:				
Descripción:	Unidad	Cantidad A	Precio Unitario B	Costo C=A*B
Aux: Hormigón simple f'c = 240 kg/cm2	m3	0,02805	86,83	2,44
Tabla de monte de 15 (240x15x2)	m2	0,187	10,85	2,03
Tabla de monte de 30 (240x30x2)	m2	0,51	18,33	9,35
Clavos 2", 2 1/2", 3", 3 ½	Kg	0,4	2,13	0,85
SUBTOTAL				14,66

Fuente: Cámara de la Industria de la Construcción (2020, págs. 22, & 26).

Tabla 31.*Detalle precios unitarios para una viga de hormigón armado de 170x11x15 cm*

Materiales:				
Descripción:	Unidad	Cantidad A	Precio Unitario B	Costo C=A*B
Aux: Hormigón simple f'c = 240 kg/cm2	m3	0,02805	86,83	2,44
Armatura de acero (cadena amarre)	Unidad	0,2833	13	3,68
Tabla de monte de 15 (240x15x2)	m2	0,187	10,85	2,03
Tabla de monte de 30 (240x30x2)	m2	0,51	18,33	9,35
Clavos 2", 2 1/2", 3", 3 ½	Kg	0,4	2,13	0,85
SUBTOTAL				18,35

Fuente: Cámara de la Industria de la Construcción (2020, págs. 22, & 26).

Tabla 32.*Detalle precios unitarios para una viga de hormigón reforzada con cables de bambú de 170x11x15 cm*

Materiales:				
Descripción:	Unidad	Cantidad A	Precio Unitario B	Costo C=A*B
Aux: Hormigón simple f'c = 240 kg/cm2	m3	0,02805	86,83	2,44
Bambú de 2 a 3 años de edad	Unidad	0,2833	3,5	0,99
Obtención tiras de bambú (carpintería)	Unidad	12	0,10	1,20
Tabla de monte de 15 (240x15x2)	m2	0,187	10,85	2,03
Tabla de monte de 30 (240x30x2)	m2	0,51	18,33	9,35
Clavos 2", 2 1/2", 3", 3 ½	Kg	0,4	2,13	0,85
SUBTOTAL				16,86

Fuente: Cámara de la Industria de la Construcción (2020, págs. 22, & 26).

Las tablas 39, 40 y 41 indican que las vigas de hormigón reforzadas con cables de bambú son 1,15 veces más caras que las vigas de hormigón simple y 0,92 veces más baratas que las de hormigón armado.

La tabla 42 indica que las vigas de bambucreto frente a las vigas de hormigón simple tienen aproximadamente 2,04 veces la capacidad de carga y de momento, lo cual es una ventaja en relación a estas últimas.

Por otro lado, las vigas de estudio frente a las vigas de hormigón armado tienen de forma aproximada 0,47 veces la capacidad de carga y de momento. Es decir, una desventaja respecto a estas últimas.

No obstante, estos criterios por separado no nos indican la eficiencia de las vigas en relación a las vigas de hormigón simple y a las vigas de hormigón armado. Con el fin de determinar la eficiencia de las vigas de estudio, se relaciona la carga máxima y el momento máximo con el costo de producción de las vigas. Los resultados se indican en la Tabla 42.

Tabla 33.

Análisis de Eficiencia General de las vigas de estudio

Análisis de Eficiencia General							
	P (kg)	M (ton.m)	Costo Producción (\$)	Relación P/\$	Relación M/\$	Eficiencia P/\$	Eficiencia M/\$
Viga Hormigón Simple	759,74	0,152	14,66	51,82	0,010	0,49	0,49
Viga Hormigón Armado	3286,87	0,657	18,35	179,12	0,036	2,11	2,11
Viga Bambucreto	1558,55	0,312	16,86	92,44	0,018	1	1

Fuente: *Elaboración Propia*

Los resultados de la Tabla 42 nos indican que las vigas de hormigón reforzadas con cables de bambú son más eficientes que las vigas de hormigón simple, pero menos eficientes que las vigas de hormigón armado. En consecuencia, y acorde a los resultados de la presente

investigación se puede validar el uso de las vigas de hormigón reforzadas con cables de bambú de la sección estudiada como vigas secundarias en determinadas estructuras, siempre y cuando estas no excedan una luz mayor a 1,7 m y las solicitaciones no superen la capacidad última de las vigas.

5.2. Evaluación del Potencial Uso de las Vigas de Estudio

Las vigas de estudio sirven como una alternativa a las vigas secundarias de hormigón simple para cubiertas sencillas. Las cubiertas sencillas se refieren a las cubiertas que no tienen aislación térmica ni sonora, por lo cual sus cargas no suelen ser muy significativas.

Por otro lado, el uso de las vigas de bambuceto como alternativa a las vigas secundarias de hormigón armado es inapropiado porque la tolerancia de las vigas de hormigón armado a carga y momento externo es mayor.

De forma general, el uso de vigas reforzadas con cables de bambú como vigas secundarias se presenta como una potencial alternativa en el medio rural para vigas secundarias de hormigón simple, ya que aumenta la capacidad de las vigas en relación con las de hormigón simple. Pero, se debe desarrollar una mayor investigación referente a las mismas, considerando la interacción del bambú y del hormigón, la tolerancia de las vigas ante efectos de corte y de flexión, la potencial afección de la viga por la humedad y por agentes patógenos.

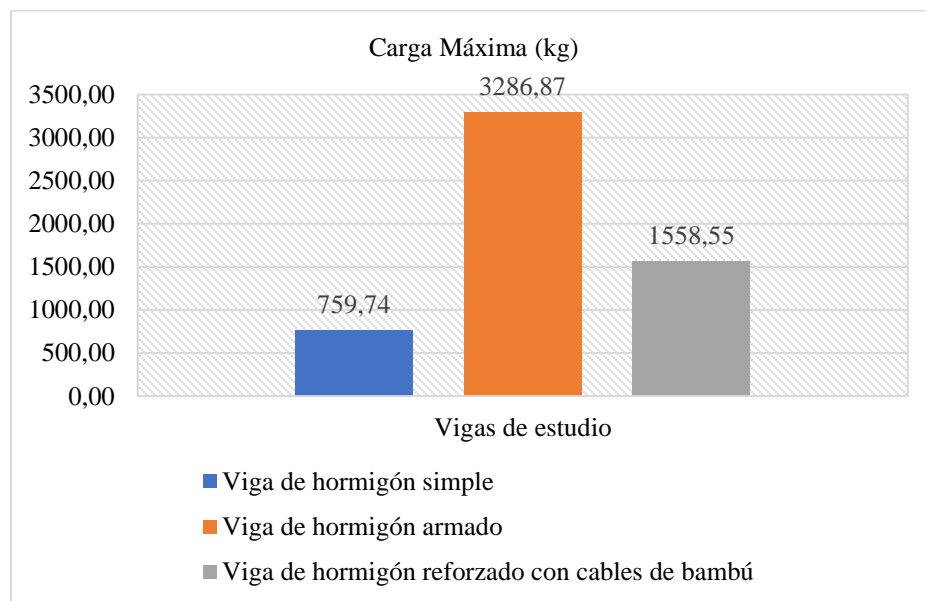
6. Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones y Comentarios

Tras los ensayos de laboratorio, se evidenció que el uso de las vigas de bambucreto supera de forma notable la capacidad de las vigas de hormigón simple, pero no a la capacidad de las vigas de hormigón armado, debido a que la carga máxima promedio de las vigas de hormigón simple y de hormigón armado fueron de 759,74 kg y de 3286,87 kg respectivamente, mientras que la carga máxima promedio de las vigas de bambucreto fue de 1558,55 kg. Tal como se indica en la Figura 21.

Figura 21.

Gráfica Comparativa de la Carga Máxima de las Vigas Analizadas



Fuente: Elaboración Propia

Se determinó que la resistencia promedio de las cintas de bambú de la presente investigación fue de 2201,04 kg/cm², mientras que la resistencia promedio de las tiras de bambú según Hidalgo (1978) era de 1919 kg/cm². Por tal motivo se concluye que la

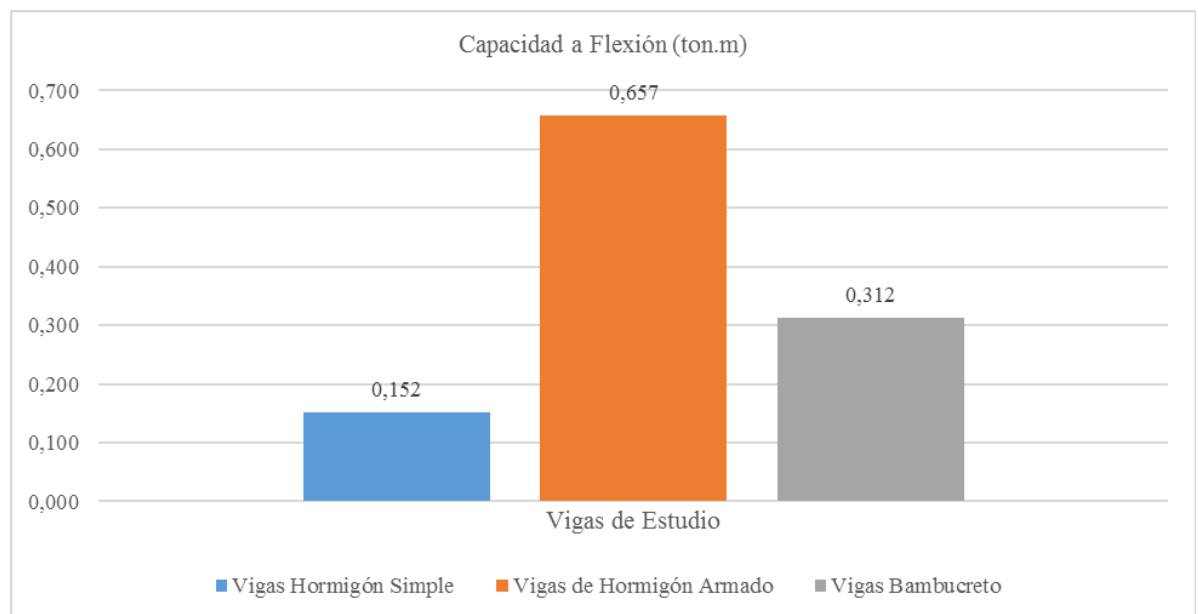
resistencia a la tracción promedio de las cintas de bambú de la Guadua Angustifolia oscila de 1900 a 2200 kg/cm².

El uso de una dosificación referencial para una resistencia de diseño esperada de $f'c=240$ kg/cm² con materiales pétreos provenientes de la mina de Pintag es aceptable, siempre y cuando se haga una caracterización de los mismos; por cuanto, puede existir una variación en las características de los materiales al no corresponder a un mismo lote.

Con base en los resultados obtenidos de la capacidad de las vigas, se confirma que el uso de cables de bambú como material de refuerzo en el hormigón se presenta como una alternativa viable solamente para las vigas de hormigón simple, mas no para las de hormigón armado. Tomando en cuenta que la capacidad promedio de las vigas de hormigón simple, de hormigón armado y de bambucreto fueron de 0,152 ton.m, de 0,657 ton.m y de 0,312 ton.m; respectivamente, lo cual se indica en la Figura 22.

Figura 22.

Capacidad a Flexión de las Vigas de Estudio



Fuente: Elaboración Propia

6.2. Recomendaciones

En caso de utilizar vigas de hormigón reforzadas con cables de bambú como vigas secundarias en una vivienda rural en particular, se debe evitar que las luces de las vigas secundarias sean excesivas, ya que por el bajo módulo de elasticidad del bambú se pueden suscitar deflexiones indeseables, por lo cual se recomienda realizar un análisis estructural referente a las deflexiones en las vigas.

El desempeño de las vigas de bambuceto fue óptimo, pero estas presentaron una falla frágil. Por tal motivo, se recomienda la elaboración de algunas investigaciones complementarias que profundicen el uso de los cables de bambú como material de refuerzo. Por ejemplo, un análisis de deflexiones en las vigas, una de las vigas ante esfuerzos cortantes, un estudio del comportamiento de las vigas de bambuceto a largo plazo y un análisis de las vigas sometidas a flexión, usando dos cintas de bambú para la elaboración de los cables.

Con base en los resultados de laboratorio, se sugiere que el espesor de las cintas de bambú sea como máximo 3 mm de la zona externa del bambú por dos razones: para asegurar un desempeño dúctil de la viga, y porque la zona de mayor resistencia de la caña de bambú se encuentra en la pared externa.

7. Referencias

- ACI (American Concrete Institute) Committee 318 (2014). *Building Code Requirements or Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318R-14)*. Farmington Hills, Michigan.
- ASTM. (2016). ASTM C293/ C293M-16 Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading). *ASTM International*, 1-4. https://dx.doi.org/10.1520/C0293_C0293M-16
- Budi, A., & Rahmadi, A. (2019). Flexural behavior of petung bamboo strip notched reinforced concrete beams. *Journal of Physics: Conference Series*, 1153(1), 1-6. <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1153/1/012127>
- Budi, A., Rahmadi, A., & Rismunarsi, E. (2017). Experimental study of flexural capacity on bamboo ori strip notched v reinforced concrete beams. *AIP Conference Proceeding*, 1788(1), 1-7. <https://doi.org/10.1063/1.4968305>
- Cámara de la Industria de la Construcción (2020). *Rubros referenciales*. Revista de la Cámara de la Construcción, (267), pp.22-26.
- Cevallos, X. (2012). *Disertación sobre el comportamiento de aditivos plastificantes en el hormigón, en su resistencia y durabilidad* [Tesis de pregrado]. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Datta, K. (1936). *Versuche Über die Verwendung von Bambus im Betonbau*.

- González, L. (2001). *Uso del bambú en el concreto reforzado*. Universidad Nacional de Colombia.
- Hidalgo, O. (1978). *Nuevas técnicas de construcción con bambú*. Universidad Nacional de Colombia.
- Hidalgo, O. (1981). *Manual de construcción con bambú*. Universidad Nacional de Colombia.
- Irías, A. (2013). Refuerzo de elementos estructurales con hormigones con fibras o solo fibras (Tesis de postgrado). Universidad Politécnica de Madrid.
- Martínez, H. [Tutoriales de arquitectura] (4 de julio del 2015). *CLASES DE VIGAS. Tutoriales de arquitectura*. [Archivo de video] YouTube.
<https://www.youtube.com/watch?v=EJcUG7iIIQw>
- Nilson, A. (1999). *Diseño de estructuras de concreto*. (12th ed.). McGraw-Hill
- Rodríguez, A., & Morales, E. (2008). *El Bambú como material estructural. Análisis de un caso Práctico*. Universidad de Girona. Escuela Politécnica Superior.
- Serrano, M., & Pérez, D. (2010). Análisis de sensibilidad para estimar el módulo de elasticidad estático del concreto. *Concreto y Cemento*, 2(1), 17–30.
- Tex Delta (18 de marzo del 2019). Fibras de refuerzo para hormigón. *Tex Delta*.
<https://texdelta.com/blog/fibras-de-refuerzo-para-hormigon/>

Van Der Lugt, P., Van Den Dobbelsteen, A., & Janssen, J. (2005). An environmental , economic and practical assessment of bamboo as a building material for supporting structures. *Elsevier*, 20(9), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.02.023>

8. Bibliografía

- ACI (American Concrete Institute) Committee 318 (2014). *Building Code Requirements or Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318R-14)*. Farmington Hills, Michigan.
- Akmaluddin, A., & Pathurahman. (2014). Effective Moment of Inertia Approach for Predicting Deflection of Concrete Beams Reinforced with Twisted Bamboo Cables. *International Journal of Civil & Environmental Engineering*, 12(3), 6-13.
- Akmaluddin, Pathurahman, Suparjo, & Gazalba, Z. (2015). Flexural behavior of steel reinforced lightweight concrete slab with bamboo permanent formworks. *Elsevier*, 125(1), 865–872. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.054>
- Archila, H., Kaminski, S., Trujillo, D., Escamilla, E., & Harries, K. (2018). Bamboo reinforced concrete: a critical review. *Materials and Structures*, 51(4), 1–18. <https://dx.doi.org/10.1617/s11527-018-1228-6>
- ASTM. (2016). ASTM C293/ C293M-16 Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading). *ASTM International*, 1-4. https://dx.doi.org/10.1520/C0293_C0293M-16
- ASTM. (2017). ASTM C172/ C172M-17 Standard Practice for Sampling Freshly Mixed Concrete. *ASTM International*, 1-3. https://dx.doi.org/10.1520/C0172_C0172M-17
- ASTM. (2018). ASTM C33/ C33M-18 Standard Specification for Concrete Aggregates. *ASTM International*, 1-8. https://dx.doi.org/10.1520/C0033_C0033M-18

ASTM. (2018). ASTM C78/ C78M-18 Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). *ASTM International*, 1-5.
https://dx.doi.org/10.1520/C0078_C0078M-18

ASTM. (2019). ASTM C31/ C31M-19a Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field. *ASTM International*, 1-7.
https://dx.doi.org/10.1520/C0031_C0031M-19A

ASTM. (2020). ASTM C39/ C39M-20 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. *ASTM International*, 1-8.
https://dx.doi.org/10.1520/C0039_C0039M-20

Budi, A., & Rahmadi, A. (2017). Model of Bamboo Strip Notch Reinforced Concrete Beams On The Flexural Capacity. *MATEC Web of Conferences*, 138(2), 1-7.
<https://dx.doi.org/10.1051/matecconf/201713802022>

Budi, A., & Rahmadi, A. (2019). Flexural behavior of petung bamboo strip notched reinforced concrete beams. *Journal of Physics*, 1153(1), 1-6.
<https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1153/1/012127>

Budi, A., Rahmadi, A., & Rismunarsi, E. (2017). Experimental study of flexural capacity on bamboo ori strip notched v reinforced concrete beams. *AIP Conference Proceeding*, 1788(1), 1-7. <https://doi.org/10.1063/1.4968305>

Cámara de la Industria de la Construcción (2020). *Rubros referenciales*. Revista de la Cámara de la Construcción, (267), pp.22-26.

- Cevallos, X. (2012). *Disertación sobre el comportamiento de aditivos plastificantes en el hormigón, en su resistencia y durabilidad* [Tesis de pregrado]. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- CRAterre. (2016). Ecuador: Prácticas Constructivas locales de bajo costo, estrategias locales de respuesta a desastres naturales & capacidad de inversión en vivienda de la población desfavorecida. *CRAterre 2016*, 1-18.
- Cuji, I. (2016). *Análisis de la caña guadúa y bambú como material estructural utilizado en vigas y su incidencia en la resistencia a flexión del concreto* [Tesis de pregrado]. Universidad Técnica de Ambato.
- Díaz, F. (2000). *El Pequeño Manual del Bambú*. Physis.
- Datta, K. (1936). *Versuche Über die Verwendung von Bambus im Betonbau*.
- González, H., Montoya, J., & Bedoya, J. (2007). Resultados del ensayo a flexión en muestras de bambú de la especie *Guadua angustifolia* Kunth. *Scientia et Technica*, 1(35), 503-508.
- González, L. (2001). *Uso del bambú en el concreto reforzado*. Universidad Nacional de Colombia.
- Hidalgo, O. (1978). *Nuevas técnicas de construcción con bambú*. Universidad Nacional de Colombia.
- Hidalgo, O. (1981). *Manual de construcción con bambú*. Universidad Nacional de Colombia.

- Irías, A. (2013). Refuerzo de elementos estructurales con hormigones con fibras o solo fibras (Tesis de postgrado). Universidad Politécnica de Madrid.
- Ismail, R., Bon, Y., Joolkeepri, N., & Ishak, I. (2018). Strength Behavior of Bamboo-Reinforced Concrete Slabs. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 431(11), 1-8. <https://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/431/11/112003>
- Martínez, H. [Tutoriales de arquitectura] (4 de julio del 2015). *CLASES DE VIGAS. Tutoriales de arquitectura.* [Archivo de video] YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=EJcUG7ilIQw>
- Nilson, A. (1999). *Diseño de estructuras de concreto. (12th ed.)*. McGraw-Hill
- Rodríguez, A., & Morales, E. (2008). *El Bambú como material estructural. Análisis de un caso Práctico*. Universidad de Girona. Escuela Politécnica Superior.
- Serrano, M., & Pérez, D. (2010). Análisis de sensibilidad para estimar el módulo de elasticidad estático del concreto. *Concreto y Cemento*, 2(1), 17–30.
- Tegola, A., Yépez, L., Mera, W., & Córdova, P. (2015). Determinación de las propiedades mecánicas de la caña Guadua Angustifolia del Ecuador cuando está sometida a fuerzas axiales. *Alternativas*, 17(1), 54–61.
- Tex Delta (18 de marzo del 2019). Fibras de refuerzo para hormigón. *Tex Delta*. <https://texdelta.com/blog/fibras-de-refuerzo-para-hormigon/>

Van Der Lugt, P., Van Den Dobbelsteen, A., & Janssen, J. (2005). An environmental , economic and practical assessment of bamboo as a building material for supporting structures. *Elsevier*, 20(9), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.02.023>