

Comparative study of bamboo as an alternative to use against steel in construction structures in Cajamarca-Peru 2025

Torres Mariñas Noelia Belén, student of the 10 th cycle Civil Engineering¹, Valdivia Portal Wendy Milagros, student of the 10th cycle Civil Engineering², Carrion Rabanal katia Nataly, Teacher Universidad Privada del Norte³

¹Universidad Privada del Norte, Perú, N00278381@upn.pc,

²Universidad Privada del Norte, Perú, N00292120@upn.pc

³Universidad Privada del Norte, Perú, Katia.carrion@upn.edu.pe

Abstract- *This study evaluates the flexural behavior of concrete beams reinforced with Guadua angustifolia bamboo and grade 60 corrugated steel, using three-point bending tests performed according to ASTM standards and the E.060 regulation. After 28 days of curing, the bamboo-reinforced beams reached an average flexural strength of 9.59 MPa, a flexural modulus of 614.43 MPa, and a maximum deflection of 5 mm, while the steel-reinforced beams reached 10.06 MPa, 643.69 MPa, and 5 mm, respectively. ANOVA analysis showed significant differences between the two reinforcements at 7 days ($p < 0.001$) and 14 days ($p = 0.008$), but not significant differences at 28 days ($p = 0.105$). Although steel showed less dispersion ($SD = 0.23$ MPa) compared to bamboo ($SD = 0.63$ MPa), the results indicate that bamboo can be considered a viable alternative structural reinforcement, provided that aspects of adhesion and variability are controlled.*

Keywords: *Bamboo, Steel, Flexural strength, Deflection, Deflection modulus, Load, Adhesion.*

Estudio comparativo del bambú como alternativa de uso frente al acero en estructuras de construcción en Cajamarca- Perú 2025

Torres Mariñas Noelia Belén, estudiante del 9° ciclo Ing Civil¹, Valdivia Portal Wendy Milagros, estudiante del 10° ciclo Ing Civil², Carrion Rabanal katia Nataly, Docente Universidad Privada del Norte³

¹Universidad Privada del Norte, Perú, N00278381@upn.pc,

²Universidad Privada del Norte, Perú, N00292120@upn.pc

³Universidad Privada del Norte, Perú, Katia.carrion@upn.edu.pe

Resumen - Este estudio evalúa el comportamiento a flexión de vigas de concreto reforzadas con bambú *Guadua angustifolia* y acero corrugado grado 60, mediante ensayos de flexión a tres puntos realizados conforme a normas ASTM y al reglamento E.060. A los 28 días de curado, las vigas reforzadas con bambú alcanzaron una resistencia promedio a flexión de 9.59 MPa, un módulo de flexión de 614.43 MPa y una deflexión máxima de 5 mm, mientras que las vigas reforzadas con acero alcanzaron 10.06 MPa, 643.69 MPa y 5 mm, respectivamente. El análisis ANOVA mostró diferencias significativas entre ambos refuerzos a los 7 días ($p < 0.001$) y 14 días ($p = 0.008$), pero no significativas a los 28 días ($p = 0.105$). Aunque el acero presentó menor dispersión ($SD = 0.23$ MPa) frente al bambú ($SD = 0.63$ MPa), los resultados indican que el bambú puede considerarse un refuerzo estructural alternativo viable, siempre que se controlen aspectos de adherencia y variabilidad.

Palabras claves: Bambú, Acero, Resistencia de flexión, Deflexión, Módulo de deflexión, Carga, Adherencia.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente en el sector de la construcción, el acero es el segundo material de construcción más utilizado por el ser humano, su producción ha aumentado desde el 2018, pasando de 1595,4 millones de toneladas a más de 2000 millones de toneladas anuales en 2022 [1] [2]. La fabricación de acero produce sustancias dañinas y contaminantes del aire como el óxido nitroso (N_2O), monóxido de carbono (CO_2) y el dióxido de azufre (SO_2) lo que causa precipitaciones ácidas y afectación al suelo y vegetación. Por otro lado, es importante considerar que, por cada tonelada de acero producida, se liberan aproximadamente 1,8 toneladas de CO_2 [3], además se prevé que la demanda del acero aumente en más de un tercio para 2050, aumentando la producción del acero anual a 3000 millones de toneladas anuales [4].

Teniendo en cuenta los problemas ambientales que causa la fabricación de acero y el incremento de emisión de gases tóxicos anualmente, la industria de la construcción ha propuesto como alternativa de solución sustituir el acero por bambú (*Guadua Angustifolia*), que lo convierten en una excelente alternativa, además de ser económica, de fácil obtención en muchas regiones del mundo, también captura el CO_2 y transforma el oxígeno en mayor cantidad que los árboles; por ende, desempeña un rol crucial en un ecosistema saludable y sano [5].

La *Guadua Angustifolia* es una buena alternativa de solución en el área de construcción, pues es un recurso inagotable con una alta tasa de renovación y con características óptimas estructurales, apropiadas para vivienda y otros tipos de edificaciones [6]. La *Guadua Angustifolia* tiene una densidad baja, y tiene altos valores de resistencia y rigidez específica si se compara con otros materiales convencionales como el acero, el concreto, o el ladrillo; además el bambú *Guadua Angustifolia* requiere solo el 57% de su masa cuando es usado como viga y solo un 40% cuando es usado como columna [7].

A pesar de que las características mecánicas de la *Guadua* se determinan por la especie botánica que la compone, la resistencia a flexión también se basa en la edad de corte de la planta, la sección que se utilice y de las propiedades físicas como son la humedad, la densidad básica y el peso específico; se debe tener en cuenta que para poder utilizar el bambú de manera estructural se recomienda que tenga una edad mínima de 4 años debido a que logra tener su mayor resistencia, y además proceso de obtención y curado [8].

No obstante, el bambú en su condición de rollizo posee algunas características que hacen que su manejo sea todo un verdadero reto. Primero, debido a su estructura anatómica y morfológica, pues es imposible tener una sección transversal uniforme [5].

Por lo tanto, la producción de láminas de bambú se ha convertido en una opción de solución para superar estos retos, logrando obtener secciones transversales uniformes reduciendo de manera significativa la variabilidad en las propiedades mecánicas. Además, se debe tener en cuenta que el bambú *Guadua Angustifolia* tiene la presencia de nudos en las que sus fibras se encuentran orientadas de dos maneras, axialmente en los entrenudos y horizontalmente en el nudo; se ha comprobado que la orientación axial hace que la *Guadua* posea una alta resistencia a la tensión, por lo que es mejor utilizar los 70 cm de longitud de cada barra entre los entrenudos.

En la actualidad no se tienen métodos estandarizados para la fabricación de laminados de bambú, pero en el estudio de [9] se llevaron a cabo pruebas con bambú y acero, obteniendo como resultados que se sigue trabajando en mejorar la eficiencia de los pegantes, y reducir el alto desperdicio de material, la falta de tecnología adecuada para la transformación del bambú (principalmente en países en vía de desarrollo) y los elevados

costos de producción. Según esta necesidad hay estándares nacionales e internacionales que establecen procedimientos para valorar su resistencia y deformación, factores que se deben evaluar considerando la variabilidad de las condiciones naturales en que se sustenta el material.

De acuerdo a lo anteriormente indicado en el presente trabajo de investigación, nos formulamos el siguiente problema de investigación: ¿Cuál es la viabilidad del uso de varillas de *Guadua angustifolia* como refuerzo en concreto, comparado con el acero convencional, evaluando su resistencia a la flexión, módulo de flexión y deflexión?

Para dar respuesta al problema de investigación, debemos de cumplir con el siguiente objetivo general: Determinar el uso de varillas de *Guadua angustifolia* como refuerzo en concreto, mediante la evaluación comparativa de la resistencia a la flexión, el módulo de flexión y la deflexión, frente a varillas convencionales de acero; para ello nos trazamos los siguientes objetivos específicos: a) Determinar las propiedades físicas de los agregados y seleccionar el bambú *Guadua angustifolia* según criterios normativos para su uso estructural , b) Determinar la resistencia a la flexión, módulo de flexión y deflexión de las vigas de concreto reforzadas con acero convencional a los 7, 14 y 28 días de curado , c) Determinar la resistencia a la flexión, módulo de flexión y deflexión de las vigas de concreto reforzadas con varillas de bambú a los 7, 14 y 28 días de curado , d) Contrastar los resultados obtenidos de las vigas reforzadas con bambú vs las vigas reforzadas con acero (muestra patrón) sometidos a flexión. Según lo expresado tenemos como hipótesis: Las vigas de concreto reforzadas con varillas de bambú es viable como uso de material estructural alternativo respecto al acero.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Tipo de investigación

Esta investigación es de carácter aplicativo porque se basa en un proceso que permite transformar el conocimiento teórico que proviene de la investigación en conceptos, es decir un enlace entre la teoría y el producto, además es sistemática porque tiene como objetivo, comparar y contrastar los resultados divergentes de la literatura, responder interrogantes nuevas que los estudios iniciales no habían planteado, o no podían responder, guiando así a trabajos futuros, creando nuevas hipótesis de trabajo y prediciendo futuros resultados [10].

Se emplea un enfoque cuantitativo, ya que se recolectarán y analizarán datos numéricos para medir la variación en la resistencia a la flexión y la deflexión de los elementos estructurales. El proceso será secuencial y probatorio, partiendo de una hipótesis que será contrastada con los resultados experimentales obtenidos de las vigas reforzadas con acero y bambú.

El nivel de la investigación es experimental con un diseño comparativo. Se manipulará deliberadamente una variable independiente (el tipo de refuerzo: varillas de bambú *Guadua*

angustifolia y acero) para observar y cuantificar su efecto sobre las variables dependientes (resistencia a la flexión, módulo de flexión y deflexión del concreto)

En la presente investigación, la población de estudio está constituida por vigas de concreto reforzadas con acero convencional y vigas reforzadas con bambú de la especie *Guadua angustifolia*. La muestra censal comprendió la elaboración de 18 probetas en total, distribuidas equitativamente en dos grupos experimentales: 9 probetas reforzadas longitudinalmente con varillas de bambú y 9 con varillas de acero. En todos los especímenes se dispusieron estribos de acero con una distribución de 1@5 cm, 2@6 cm y el resto @8 cm; asimismo, el bambú empleado fue preservado y seleccionado rigurosamente bajo los criterios de la norma E.100, garantizando una edad de cosecha entre 4 y 6 años para asegurar sus propiedades estructurales

Para garantizar la homogeneidad y validez de la muestra, se establecen los siguientes criterios:

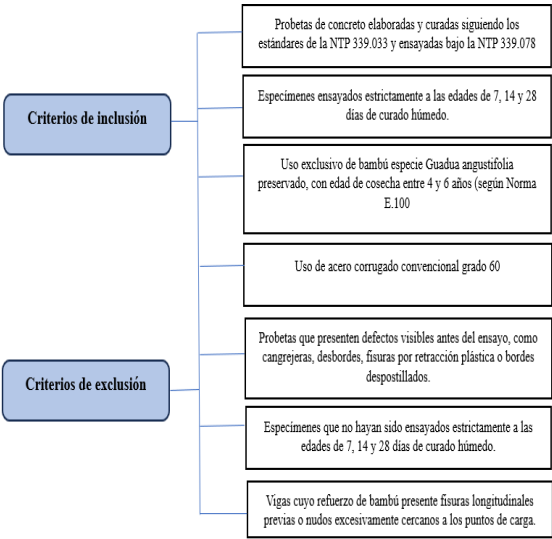


Fig. 1- Criterio de inclusión y exclusión

Para el diseño de mezcla fue necesario realizar ensayos en base al agregado grueso y fino por lo que se utilizó lo siguiente:

Por otra parte, cabe indicar que la investigación está alineada a la normativa E.100 de Bambú y la normativa vigente de concreto armado E060, la cual describe los requisitos y exigencias mínimas para el análisis, diseño y construcción de estructuras de concreto armado; así mismo, se consideró las normativas ASTM C78 y la ASTM C290 para vigas de concreto de tamaño normal, y la norma NTP 339.078, que establecen el método de ensayo de flexión para el concreto y permite verificar el cumplimiento de las especificaciones.

Adicionalmente, las evaluaciones de agregados y diseño de mezcla se realizaron conforme a estándares internacionales ASTM, incluyendo ASTM C117 (material fino que pasa el tamiz N°200), ASTM C128 (densidad y absorción del agregado

fino) y ASTM C33 (agregados para concreto), con el fin de reforzar la validez técnica y procedimiento.

Los protocolos empleados fueron:

A. Elaboración de ensayos del agregado en laboratorio de la Universidad privada del Norte.

- Contenido de humedad del agregado grueso: ASTM C566
- Lavado para material fino que pasa tamiz #200: ASTM C117
- Granulometría: ASTM C136
- Densidad relativa y absorción del agregado grueso: ASTM C127
- Densidad relativa y absorción del agregado fino: ASTM C128
- Peso unitario del agregado grueso y fino: ASTM C29/C29M

Características de los materiales

- Cemento: Se utilizará Cemento Portland Pacasmayo Tipo I, el cual cumple con las normas NTP 334.009 / ASTM C150.1 Es un cemento de uso general con una densidad de 3.10 g/cm^3 y resistencias reportadas que superan los 42 MPa
- Agregados: Se emplearán agregados finos y gruesos de la cantera del Río Chonta, Cajamarca. Antes de usarlos, se analizaron ensayos en laboratorio para determinar sus propiedades (granulometría, humedad, densidad, absorción) según las Normas Técnicas Peruanas y así cuantificar y determinar la combinación más práctica de los materiales para satisfacer exigencias técnicas particulares determinando las proporciones de agregados finos, gruesos y la relación entre agua y cemento.
- Acero de Refuerzo: Para las vigas de control, se emplearon varillas de acero corrugado convencional de grado 60, con un diámetro nominal de $3/8''$, caracterizadas por un límite de fluencia de 4200 kg/cm^2 , conforme a las exigencias de diseño para concreto armado.
- Bambú *Guadua angustifolia*: El material utilizado corresponde a culmos en estado de madurez (4 a 6 años), lo que garantiza la completa lignificación de las fibras y las propiedades físico-mecánicas requeridas para uso estructural. Se habilitaron varillas de 50 cm de longitud con sección transversal rectangular aproximada de 2.4 cm de espesor.
En cuanto a los nudos generan discontinuidades en las fibras, reduciendo la resistencia a flexión, por lo que se controló su ubicación, evitando su concentración en la zona central y priorizando los extremos para mejorar el comportamiento estructural y el anclaje con el concreto.

A. PROCESO DE ELABORACIÓN DE PROBETAS DE CONCRETO CON ACERO

Todas las vigas fueron reforzadas con 4 varillas de acero longitudinal, se utilizaron en total para las 9 probetas 36 varillas de 50 cm de longitud con un diámetro de $3/8''$ y estribos de $3/8''$ en cada una de las probetas.

Estas vigas tienen una sección rectangular de 54 cm de largo, 15 cm de ancho y 15 cm de alto. Es importante garantizar que el refuerzo posea un recubrimiento en sus seis caras y que las barras de refuerzo se mantengan en el lugar inicial al momento de vaciar el concreto. El recubrimiento que se consideró en los extremos axiales y las caras laterales es de 2 cm. Estas probetas se desmoldaron 24 horas después de haber sido elaborados (fraguado) e inmediatamente fueron sumergidos en agua para que el concreto se cure. Las vigas se sacaron del curado a los 7, 14 y 28 días en el que se obtiene su resistencia máxima, e inmediatamente se colocaron en la prensa hidráulica para realizar el ensayo a flexión, cabe mencionar que estas vigas fueron ensayadas en base al reglamento de edificaciones E.060.

B. PROCESO DE ELABORACIÓN DE PROBETAS DE CONCRETO CON BAMBÚ

Todas las vigas fueron reforzadas con 4 varillas de bambú de 50 cm, se utilizaron en total 36 varillas de 50 cm de longitud con un grosor de 2.4 cm y estribos de $3/8''$, realizando 9 probetas en total.

Estas vigas tienen una sección rectangular de 54 cm de largo, 15 cm de ancho y 15 cm de alto. Es importante asegurar que el refuerzo cuente con un recubrimiento en sus seis caras y que las barras de refuerzo se mantengan en el lugar inicial al momento de vaciar el concreto. El recubrimiento que se consideró en los extremos axiales y las caras laterales de 2 cm. Las varillas de bambú que se utilizaron como refuerzo tenían sus nudos a los extremos. Estas probetas se desmoldaron 24 horas después de haber sido elaborados (fraguado) e inmediatamente fueron sumergidos en agua para que el concreto se cure. Las vigas se sacaron del curado a los 7, 14 y 28 días en el que se obtiene su resistencia máxima, e inmediatamente se colocaron en la prensa hidráulica para realizar el ensayo a flexión.

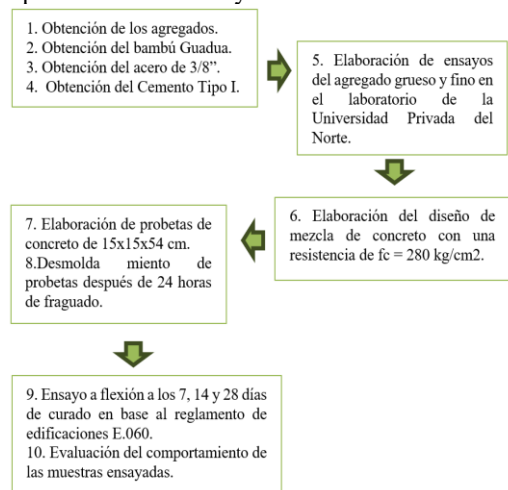


Fig. 2 Diagrama de flujo del proceso realizado para la elaboración de vigas de concreto armado con bambú y acero.

FLEXIÓN EN CONCRETO REFORZADO CON ACERO Y BAMBÚ

Las pruebas se realizaron en una máquina universal de ensayos marca FORNEY, capacidad 2890.4 kN, con velocidad de un rango de 241 ± 34 kPa/s (35 ± 5 psi/s), temperatura ambiente de 18°C y humedad relativa situada entre 58% y 78%.



Fig. 3 Máquina de ensayo con capacidad adaptable para pruebas de flexión, marca FORNEY.

En el ensayo de flexión de las probetas se obtuvo las cargas en la cual se incrementa la grieta desarrollada en el concreto y también la carga máxima que soporta la viga antes de fallar.

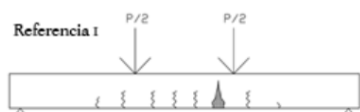


Fig. 4 Fuerzas a las que es sometida el elemento de concreto armado.

En la Fig. 4 se aprecia que la falla de la viga ocurre en la zona central, exactamente en el punto donde se concentran los mayores momentos de flexión. Esta ubicación coincide con la región más solicitada del elemento durante el ensayo, por lo que la aparición de la fisura y su posterior ruptura es coherente con el comportamiento esperado bajo cargas flectoras.

En el ensayo de flexión se analizaron dos parámetros fundamentales para evaluar el comportamiento mecánico del material: la resistencia a la flexión y el módulo de flexión. Estos conceptos resultan esenciales, especialmente en el ensayo de flexión en tres puntos utilizado en este estudio, ya que permiten determinar tanto la capacidad del material para soportar esfuerzos flectores como su rigidez ante la deformación. Durante el ensayo se registró también la deflexión que experimentó la viga conforme aumentaba la carga aplicada. Para ello se empleó la combinación de un nivel óptico y una cinta métrica, un método comúnmente utilizado en trabajos de laboratorio y de campo para medir deformaciones verticales en elementos estructurales como vigas, puentes o losas. En este procedimiento, el nivel se utiliza para establecer una línea de referencia horizontal fija, mientras que la cinta métrica permite cuantificar la distancia entre dicha referencia y la superficie

inferior del elemento, registrando así el descenso progresivo generado por la flexión. Aunque no existe una normativa específica que establezca este método, su uso es reconocido por su practicidad y precisión cuando se aplica en condiciones controladas, evitando interferencias como vibraciones, cambios de temperatura o corrientes de aire. Esta medición de la deflexión resultó esencial para determinar la deformación instantánea del material durante el ensayo y constituye un parámetro fundamental para el análisis del módulo de flexión y la evaluación del comportamiento mecánico del concreto reforzado bajo cargas flectoras.



Fig. 5 Dispositivos de lectura directa para controlar la curvatura del elemento durante el ensayo.

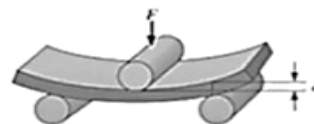


Fig. 6 Representación del ensayo a flexión.

F: Carga aplicada
L: Separación entre los apoyos
W: Ancho de la barra
H: Espesor
 δ : Deflexión

A. Resistencia de flexión

Es la capacidad máxima de un material para resistir una carga aplicada que produce una flexión. Esta resistencia se calcula a partir de la ecuación (1):

$$\sigma_{flexión} = Resistencia\ la\ flexión = \frac{3FL}{2wh^2} \quad (1)$$

B. Módulo de flexión

El módulo de flexión describe la rigidez del material ante la flexión. Este módulo de flexión se calcula a partir de la ecuación (2):

$$E_{flexión} = Módulo\ de\ flexión = \frac{L^3 F}{4Wh^3 \delta} \quad (2)$$

III. RESULTADO

A. RESULTADOS A FLEXIÓN DE VIGAS REFORZADAS

De acuerdo con la metodología establecida en el ensayo realizado, los resultados obtenidos de las vigas de bambú y acero, son los siguientes:

TABLA IV
RESULTADOS DE FALLA A FLEXIÓN EN VIGAS REFORZADAS CON BAMBÚ ENSAYADAS A LOS 7 DÍAS

Elemento	Carga (N)	Resistencia a flexión (Mpa)	Módulo de flexión (Mpa)
1V - B	24495.57	5.661	452.81
2V - B	22043.070	5.114	409.63
3V - B	23416.47	5.40	431.73
Promedio		5.39	431.39

Nota: La resistencia máxima obtenida de las tres probetas ensayadas a los 7 días es de 5.661 MPa.

TABLA V
RESULTADOS DE FALLA A FLEXIÓN EN VIGAS REFORZADAS CON BAMBÚ ENSAYADAS A LOS 14 DÍAS

Elemento	Carga (N)	Resistencia a flexión (Mpa)	Módulo de flexión (Mpa)
4V - B	35590.68	8.24	527.72
5V - B	35453.34	8.19	524.30
6 V -B	34462.53	7.96	512.34
Promedio		8.13	521.45

Nota: La resistencia máxima obtenida de las tres probetas ensayadas a los 14 días es de 8.24 MPa.

TABLA VI
RESULTADOS DE FALLA A FLEXIÓN EN VIGAS REFORZADAS CON BAMBÚ ENSAYADAS A LOS 28 DÍAS.

Elemento	Carga (N)	Resistencia a flexión (Mpa)	Módulo de flexión (Mpa)
7V - B	39357.72	9.11	583.57
8V - B	36090.99	8.34	533.73
9V - B	41329.53	9.59	614.43
Promedio		9.01	577.24

Nota: La resistencia máxima obtenida de las tres probetas ensayadas a los 28 días es de 9.59 MPa.

TABLA VII

RESULTADOS DE FALLA A FLEXIÓN EN VIGAS REFORZADAS CON ACERO ENSAYADAS A LOS 7 DÍAS

Elemento	Carga (N)	Resistencia a flexión (Mpa)	Módulo de flexión (Mpa)
1V - A	30970.17	7.19	381.67
2V - A	33138.18	7.64	407.31
3V - A	32471.1	7.50	400.16
Promedio		7.44	396.38

Nota: La resistencia máxima obtenida de las tres probetas ensayadas a los 7 días es de 7.64 MPa.

TABLA VIII
RESULTADOS DE FALLA A FLEXIÓN EN VIGAS REFORZADAS CON ACERO ENSAYADAS A LOS 14 DÍAS

Elemento	Carga (N)	Resistencia a flexión (Mpa)	Módulo de flexión (Mpa)
4V - A	38445.39	8.88	571.55
5V - A	37405.53	8.68	556.09
6 V - A	39396.96	9.14	585.70
Promedio		8.9	571.11

Nota: La resistencia máxima obtenida de las tres probetas ensayadas a los 14 días es de 9.14 MPa.

TABLA IX
RESULTADOS DE FALLA A FLEXIÓN EN VIGAS REFORZADAS CON ACERO ENSAYADAS A LOS 28 DÍAS.

Elemento	Carga (N)	Resistencia a flexión (Mpa)	Módulo de flexión (Mpa)
7V - A	41574.78	9.61	614.82
8V - A	42438.06	9.79	625.94
9V - A	43526.97	10.06	643.69
Promedio		9.82	628.15

Nota: La resistencia máxima obtenida de las tres probetas ensayadas a los 28 días es de 10.06 MPa.

TABLA X
RESULTADOS DE DEFLEXIONES EN VIGAS REFORZADAS CON BAMBÚ Y ACERO

Días de curado	Viga	Carga máxima (N)	Deflexión (mm)	Promedio de deflexión por días de curado
7 días	1V - B	24495.57	4	4
	2V - B	22043.07	4	
	3V - B	23416.47	4	
14 días	4V - B	35590.68	5	5
	5V - B	35453.34	5	
	6 V -B	34462.53	5	
28 días	7V - B	39357.72	5	5

	8V - B	36090.99	5	
	9V - B	41329.53	5	
7 días	1V - A	30970.17	6	6
	2V - A	33138.18	6	
	3V - A	32471.10	6	
14 días	4V - A	38445.39	5	5
	5V - A	37405.53	5	
	6V - A	39396.96	5	
28 días	7V - A	41574.78	5	5
	8V - A	42438.06	5	
	9V - A	43526.97	5	

Nota: La deflexión bajo carga máxima en las vigas de bambú es de 4 mm (7 días) y 5 mm (14 y 28 días), mientras que en las de acero es de 6 mm (7 días) y 5 mm (14 y 28 días). Estos valores corresponden al estado último del ensayo, al registrarse bajo carga máxima aplicada.

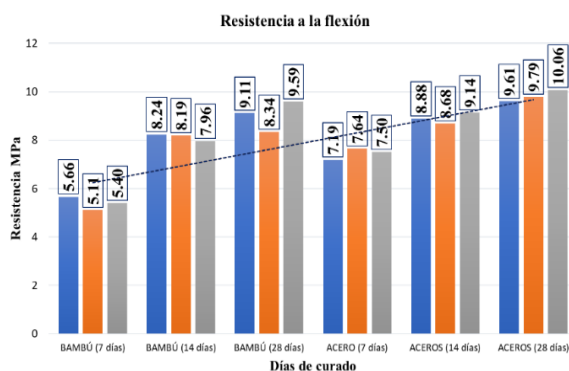


Fig. 7 Resistencia a la flexión de vigas con refuerzo de bambú y vigas con refuerzo de acero.

Nota. Las vigas de bambú con mayor resistencia fueron las que tenían 28 días de curado alcanzando una resistencia del 100%, la resistencia máxima fue de 9.59 MPa; además las vigas de acero ensayadas a los 28 días tuvieron una resistencia máxima de 10.06 MPa.

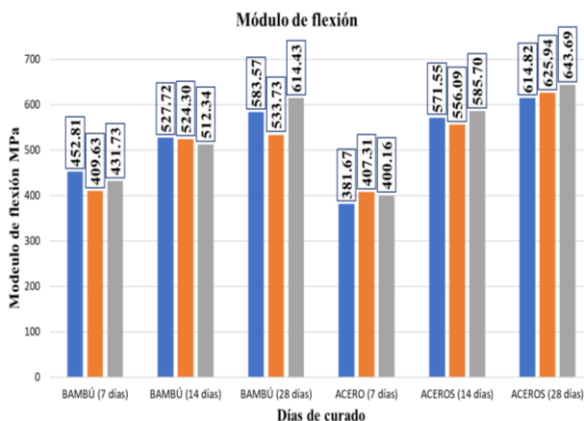


Fig. 8 Módulo de flexión de vigas con refuerzo de bambú y vigas con refuerzo de acero.

Nota. Las vigas de bambú que tuvieron mayor módulo de flexión fueron las vigas ensayadas a los 28 días con un valor de 614.43 MPa; además en las vigas reforzadas con acero se tuvo el mayor módulo de flexión fue las vigas ensayadas a los 28 días con un módulo de 643.69.50 MPa.

Seguidamente se presenta la desviación estándar por cada grupo de probetas las cuales fueron obtenidas con el SPSS, un software de análisis estadístico de IBM.

TABLA XI
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (SD) – RESISTENCIA A FLEXIÓN (MPa)

Edad	Grupo	SD
7 días	Acero	0.23029
	Bambú	0.27514
14 días	Acero	0.23065
	Bambú	0.14933
28 días	Acero	0.22650
	Bambú	0.63058

Nota: En la resistencia a flexión, el concreto reforzado con acero muestra una variabilidad consistentemente baja en todas las edades, con desviaciones estándar de 0.23029 MPa a los 7 días, 0.23065 MPa a los 14 días y 0.22650 MPa a los 28 días. En el caso del bambú, se observa baja variabilidad a los 7 y 14 días, con desviaciones estándar de 0.27514 MPa y 0.14933 MPa, respectivamente. Sin embargo, a los 28 días la desviación estándar aumenta notablemente a 0.63058 MPa.

TABLA XII
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (SD) – MÓDULO DE FLEXIÓN (MPa)

Edad	Grupo	SD
7 días	Acero	13.23135
	Bambú	21.59201
14 días	Acero	14.80983
	Bambú	8.07550
28 días	Acero	14.56133
	Bambú	40.72030

Nota: En el módulo de flexión, el acero mantiene baja variabilidad en todas las edades, con desviaciones estándar de 13.23135 MPa (7 días), 14.80983 MPa (14 días) y 14.56133 MPa (28 días), reflejando un desempeño uniforme. Por su parte, el bambú muestra una variabilidad moderada a los 7 días (21.59201 MPa) y baja a los 14 días (8.07550 MPa), pero presenta una dispersión muy elevada a los 28 días, alcanzando una desviación estándar de 40.72030 MPa.

A continuación, se expone el análisis de varianza (ANOVA) realizado sobre los datos de resistencia a la flexión con el software SPSS. Este análisis permite determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre los grupos de probetas reforzadas con acero y bambú, así como estimar la magnitud del efecto del tipo de refuerzo sobre el comportamiento del material.

TABLA XIII
TAMAÑO DE EFECTO – RESISTENCIA A FLEXIÓN (MPa)

Edad	F	Sig.	Eta ²
7 días	98.254	<0.001	0.961
14 días	23.559	0.008	0.855
28 días	4.348	0.105	0.521

Nota: El análisis ANOVA mostró que el tipo de refuerzo (acero o bambú) tiene un efecto significativo sobre la resistencia a flexión del concreto a los 7 días ($p < 0.001$) y 14 días ($p = 0.008$), con tamaños de efecto muy grandes ($\eta^2 = 0.961$ y 0.855). Sin embargo, a los 28 días no se encontraron diferencias significativas entre ambos refuerzos ($p = 0.105$).

IV. DISCUSIÓN

El análisis del comportamiento a flexión de las vigas reforzadas con *Guadua angustifolia* frente al acero convencional revela una evolución significativa durante el proceso de curado. Si bien el acero mantiene una hegemonía en la resistencia a flexión en todas las etapas, la brecha con el bambú se reduce drásticamente conforme avanza el curado, alcanzando valores máximos de 10.06 MPa y 9.59 MPa a los 28 días, respectivamente. Esta convergencia, representada por una diferencia final de 4.64%, valida la eficiencia de la *Guadua angustifolia* para integrarse de manera colaborativa en la matriz de concreto, posicionándose como un refuerzo funcional, aunque con un comportamiento más disperso en etapas tardías.

Esta variabilidad observada en la resistencia del bambú se atribuye principalmente a la presencia de nudos en las varillas de bambú y la falta de adherencia, debido a su superficie lisa y la variación volumétrica que sufre el bambú, ya que, al contacto con el concreto fresco, absorbe agua y se expande; para luego contraerse cuando la mezcla endurece y pierde humedad. Esta deficiencia en el enlace mecánico es corroborada por investigaciones realizadas en la India y Pakistán realizada por [11] y [12] respectivamente, las cuales tuvieron como objetivos analizar el fenómeno de la adherencia vinculado a la naturaleza higroscópica del bambú, así como evaluar el comportamiento mecánico y la viabilidad económica de este material como refuerzo sostenible en el concreto.

En el estudio desarrollado en la India, se tuvo como resultados que el bambú en su estado natural posee una adherencia de 0.35 a 0.50 MPa, valores que pudieron incrementarse hasta en un 200% (alcanzando 1.12 MPa) mediante el uso de recubrimientos epóxicos y rociado de arena para mitigar el efecto de la humedad. Por otro lado, la investigación en Pakistán determinó que la resistencia a la flexión de los elementos reforzados con bambú tratado alcanza aproximadamente el 72% de la capacidad de carga del acero convencional, mientras que el material sin tratar experimenta una pérdida de rendimiento de hasta un 31% tras la primera semana de exposición al concreto debido a su alta tasa de absorción de humedad. En cuanto a la adherencia en este mismo estudio, se reportó una interfaz débil que favorece el deslizamiento prematuro; sin embargo, mediante la aplicación del agente adhesivo Sikadur 32 y arena, la resistencia de adherencia se incrementó significativamente hasta alcanzar los 2.75 MPa. Estos hallazgos internacionales refuerzan la conclusión de la presente investigación: si bien el bambú demuestra una capacidad a flexión competitiva de 9.59 MPa frente a los 10.06 MPa del acero, su implementación técnica definitiva requiere de tratamientos que estabilicen la interfaz

bambú-concreto para reducir la variabilidad y prevenir fallas frágiles por deslizamiento.

En la presente investigación, esta incompatibilidad físico-química se ve reflejada en la desviación estándar: mientras el acero mantuvo una variabilidad baja y constante con una SD entre 0.226 y 0.231 MPa, el bambú mostró una dispersión que se triplicó a los 28 días alcanzando una SD de 0.63 MPa, lo que evidencia una menor estabilidad mecánica en la etapa final de curado. Por otro lado, el módulo de flexión mostró una tendencia creciente en ambos materiales, confirmando que la rigidez del sistema aumenta con la hidratación del concreto hasta alcanzar, a los 28 días, valores de 614.43 MPa para el bambú y 643.69 MPa para el acero. Paralelamente, las deflexiones máximas registradas de 4–5 mm para el bambú y 5–6 mm para el acero tendieron a estabilizarse conforme avanzó el curado, reflejando el incremento de la rigidez conjunta del elemento estructural.

El análisis de varianza (ANOVA) confirma que el tipo de refuerzo ejerce un efecto significativo sobre la resistencia a los 7 días ($F = 98.254$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.961$) y a los 14 días ($F = 23.559$, $p = 0.008$, $\eta^2 = 0.855$), pero resulta fundamental destacar que a los 28 días la diferencia deja de ser estadísticamente significativa con un valor $p = 0.105$ y un $F = 4.348$ ($\eta^2 = 0.521$). Esto indica que las capacidades de ambos refuerzos tienden a igualarse cuando el concreto alcanza su resistencia final, validando la competitividad técnica del bambú en el largo plazo. No obstante, es imperativo reconocer que estos resultados obtenidos en laboratorio no deben extrapolarse directamente a estructuras de gran escala sin considerar la variabilidad de las propiedades mecánicas y la sensibilidad ambiental del material

Limitantes presentes en el estudio

- ✓ La evaluación del comportamiento a flexión de vigas de concreto reforzadas con bambú y acero se realizó en condiciones de laboratorio, por lo que los resultados no pueden extrapolarse directamente a estructuras reales de mayor escala.
- ✓ El uso del bambú como refuerzo en concreto se plantea en sistemas constructivos ligeros y viviendas de bajo costo en regiones donde el acero es limitado o de alto costo. Su aplicación se asocia a edificaciones de baja altura, construcciones de carácter no crítico y elementos estructurales secundarios (como vigas de pequeña luz o losas ligeras). Sin embargo, su uso se restringe frente a estructuras de mayor exigencia, debido a la variabilidad de sus propiedades mecánicas y su sensibilidad a factores ambientales [13], [14].
- ✓ Asimismo, el acero presenta una resistencia significativamente mayor en comparación con el bambú, el cual alcanza valores menores y muestra mayor dispersión en sus propiedades. Esta diferencia influye en el comportamiento a flexión de elementos como vigas; sin embargo, el bambú puede desarrollar un desempeño adecuado en condiciones de baja a moderada sollicitación,

siempre que sus características sean consideradas en el diseño estructural [13].

- ✓ En cuanto al comportamiento del bambú, la presencia de nudos constituye una limitación importante, ya que genera discontinuidades en la orientación de las fibras y reduce la resistencia a la flexión. Estos nudos corresponden a zonas más densas y con menor alineación longitudinal de fibras, disminuyendo su eficiencia estructural frente a cargas flectoras; por ello, el desempeño del material depende en gran medida de su adecuada selección y disposición [15].
- ✓ Finalmente, la adherencia entre el bambú y el concreto representa una limitación crítica, debido a los cambios volumétricos que experimenta el material al pasar de estado verde a seco. Esta contracción y posterior expansión al entrar en contacto con el concreto fresco puede generar fisuras y pérdida de adherencia, afectando el comportamiento conjunto del sistema estructural [16].

V. CONCLUSIONES

- ✓ Se determinó que las vigas de concreto reforzadas con acero convencional presentan un comportamiento mecánico estable, homogéneo y de alta rigidez durante todas las etapas de curado, consolidándose como un parámetro de control confiable para evaluar la eficiencia de materiales alternativos.
- ✓ Se determinó que las vigas reforzadas con varillas de bambú logran un trabajo colaborativo funcional con la matriz de concreto, experimentando un incremento progresivo en su capacidad de carga; no obstante, presentan una mayor sensibilidad a variables anatómicas naturales y a la adherencia interfacial en comparación con el refuerzo patrón.
- ✓ Al contrastar los resultados de ambos grupos experimentales mediante análisis estadístico, se concluyó que las diferencias de desempeño mecánico no son significativas al completarse el periodo de curado de 28 días, lo que valida la competitividad técnica del material vegetal frente al acero convencional en el largo plazo.
- ✓ Finalmente, se determinó que el uso de varillas de Guadua angustifolia como refuerzo en concreto es viable para aplicaciones estructurales alternativas, ya que su evaluación comparativa demuestra una capacidad de resistencia y rigidez adecuada para las exigencias de diseño, siempre que se controlen la ubicación de los nudos y los mecanismos de adherencia.

REFERENCIAS

- [1] COMITÉ COLOMBIANO PRODUCTOR DE ACERO. (2019). *INFORME DEL SECTOR SIDERÚRGICO*. COLOMBIA: ANDI.
- [2] Ghoneim, R., Mete, G., & Hobley, A. (Mayo de 2022). *INDUSTRIAL ANALYTICS PLATFORM*. Obtenido de <https://iap.unido.org/es/articles/como-pueden-el-acero-y-el-cemento-impulsar-la-decada-de-accion-en-el-contexto-del-cambio>.
- [3] Autodesk. (21 de diciembre de 2021). *ProEst*. Obtenido de <https://proest.com/es/construccion/consejos/common-materials/>
- [4] ClimateScience. (13 de abril de 2022). *ClimateScience*. Obtenido de <https://climatescience.org/es/advanced-steel-climate>.
- [5] Gutiérrez González, M., Medina Sandoval, S., & Agudelo Gómez, L. (2020). *RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y FLEXIÓN DE UN LAMINADO DE GUADUA DE BAJO COSTO PRODUCIDO EN COLOMBIA*. Colombia: Taxonomy & Morphology. Obtenido de <https://worldbamboo.net/wbexi/papers/Gutierrez%20Gonzales,%20M.,%20S.%20Medina%20Sandoval,%20L.A.%20Agudelo%20Gomez.pdf>
- [6] Kaminski, S., Lawrence, A., & Trujillo, D. (2016). *Structural use of bamboo. Part 1*. The Institution of Structural Engineers. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/228144527.pdf>
- [7] Zaragoza Hernández, I., Ordóñez Candelaria, V., Barcenaz Pazos, G., Borja de la Rosa, A., & Zamudio Sánchez, F. (2015). *PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE UNA GUADUA MEXICANA*. Mexico: Maderas. Ciencia y tecnología.
- [8] McClure, F. A. (15 de 10 de 2015). *Huellas de Arquitectura*. Obtenido de <https://huellasdearquitectura.com/2015/10/14/las-propiedades-mecanicas-del-bambu/>
- [9] Montoya, W. A. (2011). *Comparación del bambú con el acero como material de refuerzo a flexión en concreto*. Costa Rica: INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN.
- [10] Quispe, A., & Ticona, Y. (Marzo de 2021). *Serie de Redacción Científica: Revisiones Sistemáticas*.
- [11] Rabia Soomro, Zain Ul Abideen, & Aqta Urf Aqsa. (2025). Sustainable Reinforcement in Concrete: Evaluating Bamboo's Flexural Strength, Cost Benefits, and Material Properties. *Global Social Sciences Review*, 145-162.
- [12] IJISSET. (2024). Review on Durability and Strength properties and. *IJISSET*.
- [13] Archila, H., Kaminski, S., Trujillo, D., Zea Escamilla, E., & Harries, K. (2018). *Bamboo reinforced concrete: A critical review. Materials and Structures*. Obtenido de <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-018-1228-6>
- [14] Li, X., et al. (2023). *Engineered bamboo and bamboo-reinforced concrete: A review. Construction and Building Materials*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061823018305>
- [15] Vélez, A., López Calvo, H. Z., Guillén Guillén, C. A., Alonso Guzmán, E. M., & Llaven José, H. D. (2020). Efecto de la altura de culmo y presencia de nudos en las propiedades mecánicas del bambú Otatea fimbriata sonderst, especie nativa del sur de México. *Consejo Superior de Investigaciones Científicas*.
- [16] Vargas Vásquez, W., Cerna Vásquez, A., & Cuéllar Cahahuaringa, J. (2020). *Adherencia en el concreto reforzado con bambú*. Dialnet.