



DOI: <https://doi.org/10.23857/dc.v10i2.3839>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

Resistencia a flexión de vigas de hormigón con refuerzo de caña guadúa

Flexural strength of concrete beams with guadua cane reinforcement

Resistência à flexão de vigas de concreto com armadura de cana guadua

Gilbert Damián Reyes Muñoz^I

greyes8106@utm.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0004-6104-117X>

Gloria Magdalena Valdivieso Villagómez^{II}

gvaldivieso7862@utm.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0003-9983-6384>

Alfonso Bernardo Horacio Romero Hidrovo^{III}

alfonso.romero@utm.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-0223-0486>

Correspondencia: greyes8106@utm.edu.ec

***Recibido:** 30 de marzo de 2024 ***Aceptado:** 05 de mayo de 2024 * **Publicado:** 21 de mayo de 2024

- I. Estudiante de la Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Facultad de Ingenierías y Ciencias Aplicadas, Carrera de Ingeniería Civil, Ecuador.
- II. Estudiante de la Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo. Facultad de Ingenierías y Ciencias Aplicadas, Carrera de Ingeniería Civil, Ecuador.
Ingeniero Civil, graduado en la Universidad de Guayaquil en 1995 reg. Senescyt 1006-02-77255. Magíster en Administración de Empresas por la Universidad del Mar de Viña del Mar en 2006, reg. Senescyt 1016R- 09-5515, Diplomado de Fiscalización de Obras Civiles por el Instituto Tecnológico de Monterrey, 2004. Consultor de Infraestructura del Programa Nuestros Niños, MBS - BID (1999 – 2006), ejercicio de la profesión durante (1995 – 2017) en construcción y mantenimiento de Obras Civiles. Profesor Auxiliar tiempo completo del área de Estructuras de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Aplicadas de la Universidad Técnica de Manabí desde 2017. Director de 8 trabajos de Titulación. Ponente en 2 eventos internacionales. Autor y coautor de 1 artículo científico en revistas especializadas. Autor del libro de relatos “Por los Niños adónde sea”, ISBN n° 9978-42-456-3, Ecuador.

Resumen

El objetivo principal de esta investigación fue analizar el potencial de la caña Guadúa angustifolia Kunth (GaK), como una alternativa viable para reforzar vigas de hormigón. A través del ensayo a flexión, se evaluó el comportamiento estructural de las dos vigas que fueron reforzadas con GaK, las cuales de aquí en adelante serán mencionadas como “vigas de hormigón reforzadas con GaK”, comparándolas con vigas de hormigón con un refuerzo de cuantía máxima de acero según el ACI 318-14, las cuales de aquí en adelante serán mencionadas como “vigas de referencia”. Los resultados obtenidos revelaron que las vigas de hormigón reforzadas con GaK tuvieron una capacidad de carga ligeramente superior a las vigas de referencia, debido al porcentaje de refuerzo utilizado en las mismas. No obstante, respecto a los desplazamientos cabe destacar que las vigas reforzadas con GaK no presentaron un óptimo comportamiento estructural ya que tuvieron mayores desplazamientos que las vigas de referencia, atribuible al bajo módulo de elasticidad de la caña comparándolo con el acero. En lo que respecta a la medición de desplazamientos, se realizó un análisis comparativo entre el sistema de medición por imagen conocido como fotogrametría y por el transductor de desplazamiento lineal variable (LVDT), obteniendo resultados consistentes y similares entre ambos métodos, lo que destaca la confiabilidad de los resultados obtenidos en los ensayos realizados para esta investigación.

Palabras Claves: Refuerzo de caña guadúa; Viga de hormigón; Ensayo a flexión; Fotogrametría; Bambú.

Abstract

The main objective of this research was to analyze the potential of Guadúa angustifolia Kunth (GaK) cane, as a viable alternative to reinforce concrete beams. Through the flexural test, the structural behavior of the two beams that were reinforced with GaK was evaluated, which from now on will be mentioned as “concrete beams reinforced with GaK”, comparing them with concrete beams with a significant amount of reinforcement. maximum steel according to ACI 318-14, which from now on will be mentioned as “reference beams”. The results obtained revealed that the concrete beams reinforced with GaK had a slightly higher load capacity than the reference beams, due to the percentage of reinforcement used in them. However, regarding displacements, it should be noted that the beams reinforced with GaK did not present optimal structural behavior since they had greater displacements than the reference beams, attributable to the low modulus of elasticity of the cane

Resistencia a flexión de vigas de hormigón con refuerzo de caña guadúa

compared to steel. Regarding the measurement of displacements, a comparative analysis was carried out between the image measurement system known as photogrammetry and the linear variable displacement transducer (LVDT), obtaining consistent and similar results between both methods, which highlights the reliability of the results obtained in the tests carried out for this research.

Keywords: Guadua cane reinforcement; concrete beam; Bending test; Photogrammetry; Bamboo.

Resumo

O objetivo principal desta pesquisa foi analisar o potencial da cana Guadúa angustifolia Kunth (GaK), como alternativa viável para reforço de vigas de concreto. Através do ensaio de flexão foi avaliado o comportamento estrutural das duas vigas que foram reforçadas com GaK, que doravante serão denominadas “vigas de concreto reforçadas com GaK”, comparando-as com vigas de concreto com quantidade significativa de armadura máxima de aço. conforme ACI 318-14, que doravante serão mencionados como “feixes de referência”. Os resultados obtidos revelaram que as vigas de concreto armado com GaK apresentaram capacidade de carga um pouco superior às vigas de referência, devido ao percentual de armadura nelas utilizado. Porém, em relação aos deslocamentos, deve-se destacar que as vigas reforçadas com GaK não apresentaram comportamento estrutural ótimo, pois apresentaram deslocamentos maiores que as vigas de referência, atribuíveis ao baixo módulo de elasticidade da cana em comparação ao aço. Quanto à medição dos deslocamentos, foi realizada uma análise comparativa entre o sistema de medição de imagens conhecido como fotogrametria e o transdutor linear de deslocamento variável (LVDT), obtendo resultados consistentes e semelhantes entre os dois métodos, o que destaca a confiabilidade dos resultados obtidos nos testes. realizado para esta pesquisa.

Palavras-chave: Reforço de cana Guadua; viga de concreto; Teste de flexão; Fotogrametria; Bambu.

Introducción

Debido al alto costo de los materiales de construcción y la dificultad que tiene la población del sector rural del Ecuador y de varios países de Sudamérica para poder costear materiales como el acero, y la disponibilidad de recursos renovables ecológicos como la GaK, se consideró necesario llevar a cabo una investigación que incorpora la caña Guadúa angustifolia Kunth en el proceso

Resistencia a flexión de vigas de hormigón con refuerzo de caña guadúa

constructivo. Esto permite el uso de un material tradicional en la construcción, al mismo tiempo que se busca mejorar la resistencia estructural a la flexión de vigas de hormigón.

En el mundo existen alrededor de 32 especies de bambú del género guadúa los cuales son endémicos de Centro y Sur América, en la que la Guadúa angustifolia Kunth es reconocida como la mejor a nivel internacional por sus excelentes propiedades físicas y mecánicas, es originaria de Colombia, Ecuador y Perú, aunque en la actualidad se la encuentra en otros países debido a su gran potencial. Es un tipo de bambú leñoso que se desarrolla en regiones tropicales y puede alcanzar alturas aproximadas de 30 metros (NEC-SE-GUADÚA, 2017).

En el mapeo de manchas productivas de la GaK en el Ecuador, tanto en su especie de caña brava como caña mansa, se localiza un 66,5% en la costa, un 10% en la sierra y un 23,5% en la Amazonía. La provincia de Manabí cuenta con la mayor superficie de GaK, 145.529 ha, con un total de 24% de todo el país (MAG, 2018).

El notable desarrollo en la construcción aumentó la conciencia sobre el impacto ambiental del proceso de construcción y ha fomentado el uso de materiales amigables con el medio ambiente. Por ello, se han realizado innumerables estudios sobre el uso del bambú en la construcción, y su excelente comportamiento físico-mecánico ha catalogado al bambú como una excelente alternativa en este campo (Gómez et al, 2020).

Debido al impacto ambiental y particularmente a la huella de carbono que causan ambos materiales, es necesario elegir entre el acero y la caña, dado que la energía almacenada en el acero de medio carbono se sitúa entre los 29 y 35 MJ/kg, mientras que en las cañas de bambú oscila aproximadamente entre los 4 y 6 MJ/kg. También, la huella de carbono vinculada al acero es considerablemente superior a la del bambú, se estima en 2,2-2,8 kgCO₂/kg de material para el acero de medio carbono (Ashby et al, 2013), en contraste con aproximadamente 0,25 kgCO₂/kg para el bambú (Lugt & Vogtlander, 2015). Dado que el acero requiere de un proceso de fabricación que implica la extracción de hierro y de energía para convertirlo en acero, provocando emisiones significativas de gases de efecto invernadero, la opción de utilizar caña, conocida por ser un recurso renovable, se convierte en una opción ecológica.

El uso de bambú como refuerzo en una viga de hormigón es un elemento innovador que se podría recomendar para viviendas con bajo presupuesto con la ventaja de reemplazar a las varillas de acero (Dey & Chetia, 2018). Según Ramos (2023) en su investigación obtuvo resultados favorables

Resistencia a flexión de vigas de hormigón con refuerzo de caña guadúa

y menciona que en el uso de vigas reforzadas con bambú, estas tuvieron un comportamiento idóneo para estructuras de hasta dos niveles y que es esencial escoger el bambú de acuerdo a su edad vegetativa, ya que si se corta la caña en los años no recomendados (antes de los 3 o después de los 5 años) se puede obtener resultados no deseados, y realizar un preservado a la caña con líquido inmunizante “Sika Merulex”.

Sin embargo, Glenn (1950) menciona que el bambú como refuerzo en elementos de hormigón sujetos a altas solicitaciones no es aconsejable, pero que se podría utilizar para elementos secundarios de una estructura, aunque se limita a un porcentaje óptimo para el área del refuerzo longitudinal del 3-4% del área de la sección transversal.

Según Mark y Rusell (2011), los resultados de sus ensayos con vigas de hormigón reforzadas con bambú fueron similar a las reforzadas con acero, las vigas estaban reforzadas en porcentajes del 4-5% del área de sección transversal para el refuerzo longitudinal de bambú, comprobando porcentajes óptimos de investigaciones anteriores de 3-5%.

En un estudio realizado por Ghavami (2005), se llevaron a cabo pruebas con vigas fabricadas con refuerzo de acero y vigas sin refuerzo, utilizando dos proporciones diferentes de bambú en relación con la sección transversal de la viga, 3,33% y 5% respectivamente. Aplicó dos capas de material bituminoso “Negrolin” para impermeabilizar las latillas de bambú, y posterior a la segunda capa de pintura esparció arena fina. Este tratamiento del bambú ayudó a aumentar la fuerza de adherencia entre los materiales. Los resultados indicaron que la cantidad óptima de bambú para reforzar las vigas es del 3% en relación con la sección transversal. Además, se encontró que las vigas reforzadas con bambú pudieron soportar una carga 4 veces mayor, en comparación con las vigas sin ningún tipo de refuerzo.

Ferreira (2002) experimentó con vigas que empleaban armaduras hechas de bambú en su forma natural y también tratadas con barniz envueltas en alambre de púas para mejorar la conexión entre los materiales. Al analizar los resultados, observó que el bambú demostraba un comportamiento estructural satisfactorio cuando se utilizaba como refuerzo en el hormigón.

En un estudio llevado a cabo por Agarwal et al (2014), se examinó vigas en diferentes condiciones: sin refuerzo, reforzadas con acero, reforzadas con bambú tratado, y sin tratar. El porcentaje de refuerzo de las muestras de bambú fue del 1,49%, y el tratamiento consistió en la aplicación de un adhesivo epóxico “Sikadur 32 Gel” y posterior una capa de arena. Los resultados de los ensayos de

Resistencia a flexión de vigas de hormigón con refuerzo de caña guadúa

flexión indicaron que las vigas reforzadas con bambú tratado, experimentaron un considerable aumento en la resistencia a la ruptura en comparación con las vigas reforzadas con acero. Cuantitativamente, un refuerzo de bambú tratado del 1,49% condujo a un incremento del 29% en la capacidad de resistencia. Sin embargo, las vigas con refuerzo de bambú no tratado, mostraron un rendimiento inferior incluso respecto a las vigas sin refuerzo. Por tanto, el estudio evaluó el comportamiento estructural de vigas de hormigón reforzadas con tablillas de bambú, utilizando tallos de la especie *Bambusa vulgaris*, mediante los ensayos de flexión.

El enfoque de Geymayer y Cox (1970), consiste en calcular la resistencia a la flexión basada en la capacidad original del hormigón y agregar entre un 3% y 4% de refuerzo de tensión de bambú, lo que parece proporcionar una seguridad aceptable incluso después del apareamiento de grietas. No obstante, hay que garantizar la correcta adhesión entre el bambú y el concreto para evitar el cambio de volumen del refuerzo de bambú, ya que es crucial para lograr un rendimiento efectivo en la práctica.

Uno de los inconvenientes en la utilización del bambú como refuerzo en una viga de hormigón es la poca adherencia que este presenta debido a la humedad que puede absorber al estar en contacto con el hormigón provocando cambios de volumen en el elemento (Hidalgo, 1978), así mismo, la capa cerosa y resbaladiza que contiene la parte externa del bambú hace que las fisuras en la viga no se extiendan y por ende produzcan una falla por deslizamiento entre el elemento de refuerzo de bambú y el hormigón (Muhtar et al, 2018).

Materiales y métodos

En esta sección se describe la fase de diseño y construcción de las vigas para su posterior análisis de resultados obtenidos.

A. Selección de guadúa

Para la presente investigación, la especie utilizada como material de refuerzo en las vigas de hormigón fue la Guadúa *angustifolia* Kunth al ser la especie predominante en Ecuador, esta fue adquirida en la provincia de Manabí, la cual pasó por una etapa de curado y secado, el método aplicado de preservación fue por inmersión con ácido bórico y borax con la finalidad de ofrecer protección contra agentes xilófagos, donde finalmente tuvo una humedad relativa promedio medida con el higrómetro de 18,2%.

Resistencia a flexión de vigas de hormigón con refuerzo de caña guadúa

El bórax se encuentra entre los preservantes más apropiados ya que logra extender el tiempo de 30 años o más en el que el bambú deba ser reemplazado para uso interno en una edificación, en virtud de sus propiedades insecticidas y fungicidas (Kaminski, 2016). Si se puede extender el tiempo para uso interno cuando se la preserva correctamente con bórax, se espera que, confinada en el hormigón sin estar expuesta al ambiente, el tiempo de duración podría aumentar.

La resistencia última a la tensión de la caña guadúa es de $\sigma_k = 117,6 \text{ MPa}$ y el módulo de elasticidad a la tensión de $E_k = 8310 \text{ MPa}$ tomado de la NEC-SE-GUADÚA (2017)

B. Caracterización del hormigón

Para la caracterización de la resistencia a compresión del hormigón de las vigas se tomó muestras el día de la fundición en cilindros de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura, en la que se determinó la resistencia a los 7, 14 y 28 días según lo establecido en la ASTM C-39 (2020). A los 28 días se obtuvo una resistencia media a la compresión $f'c = 37,2 \text{ MPa}$.

C. Preparación de las vigas

Las vigas fueron construidas con un ancho de 200 mm, un peralte mínimo de 300 mm que cumple con el requisito 9.3.1 del ACI 318-14 (2014) para una viga simplemente apoyada, y una luz libre de 1700 mm siendo cuatro veces mayor a la altura útil de la sección transversal de acuerdo con el requisito 4.2.1 de la NEC (2017) para elementos a flexión.

La precisión de resultados que debe existir entre dos ensayos realizados adecuadamente por el mismo operador en vigas construidas con un mismo hormigón, no debe diferir en más de 12% según lo mencionado en ASTM C-293 (2016).

Se consideró 4 vigas de hormigón de las mismas dimensiones, sin estribos, ni acero mínimo en la zona de compresión, solo armado en la zona a tracción: 2 vigas se construyeron con refuerzo de GaK, y para la comparación de resistencia entre vigas con distinto material de refuerzo se tomó de referencia los resultados de los ensayos a flexión de 2 vigas de hormigón con cuantía máxima de acero realizados por Moreira et al., (2024) en su trabajo investigativo titulado “Demostración experimental de la resistencia a flexión de una viga de hormigón armado con cuantía máxima y adecuaciones en el marco de reacción de la UTM”

Para el armado longitudinal de las 2 vigas, el porcentaje de sección transversal para el área de refuerzo utilizado en la zona a tracción fue 5%, aproximadamente $A_{GaK} = 30 \text{ cm}^2$, considerado

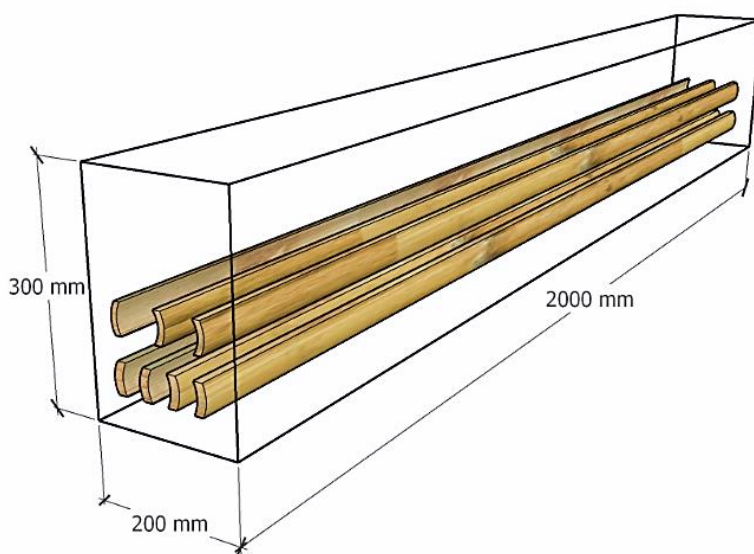
Resistencia a flexión de vigas de hormigón con refuerzo de caña guadúa

como cuantía máxima para vigas reforzadas con este material, como lo estipulan Mark y Russell (2011).

La impermeabilización de las latillas se realizó con pintura elastomérica en la cara interna del elemento para evitar problemas de adhesión por cambios de volumen; se colocó 7 latillas, de canto, en la zona a tracción por cada viga, distribuidas en 2 capas: 4 latillas en la capa inferior de refuerzo y 3 latillas en la capa que está encima, como se muestra en la Figura 1.

Figura 1

Dimensiones de viga y distribución de refuerzo de GaK



Cada viga contiene 2 strain gauges, esencial para el registro de deformaciones del elemento durante el ensayo a flexión. Estos fueron colocados en las dos latillas internas de la capa inferior del refuerzo.

Para la colocación de los strain gauges se siguió las instrucciones del fabricante, se lijó la superficie de la latilla para conseguir que esté totalmente lisa, se limpió las impurezas presentes en la superficie con ayuda de hisopos; el dispositivo se ubicó en la parte de mayor tracción de la latilla donde se espera que se produzcan deformaciones significativas durante el ensayo y para que quede adherido a la latilla se utilizó un adhesivo instantáneo “Loctite Super Bonder” de fácil colocación con aplicador de gran precisión. Los cables fueron soldados en los terminales de los dos strain gauges,

Resistencia a flexión de vigas de hormigón con refuerzo de caña guadúa

fueron envueltos con cinta auto fundente para protegerlos al momento de fundir las vigas y finalmente con un multímetro se comprobó la lectura de resistencia eléctrica, que debe estar alrededor de $120 \pm 3 \text{ ohm}$.

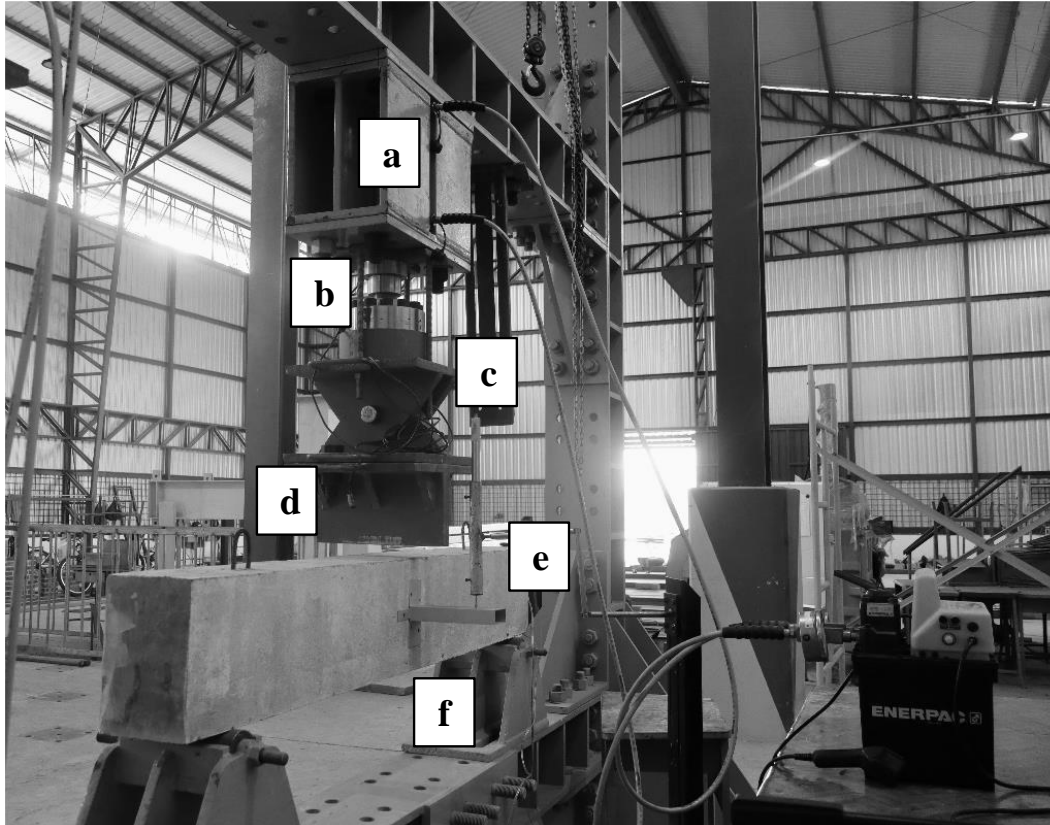
Para la fundición de las vigas se armó los encofrados de madera, se colocó las capas de refuerzo de GaK de la manera descrita; posteriormente se preparó la mezcla, donde se realizó el ensayo de asentamiento de acuerdo con la norma ASTM C143 (2020) mediante el método del cono de Abrams y se obtuvo un asentamiento medio de 3,5 cm. Para una mejor distribución del hormigón se utilizó un vibrador, al siguiente día las vigas y los cilindros fueron desencofrados y sometidos al curado, a las vigas se les esparció agua hasta dejarlas totalmente humedad y se las envolvió en papel film para mantener la humedad. En cuanto, a los cilindros estos fueron sumergidos en agua el tiempo definido para la realización de las pruebas según las edades establecidas en la norma ASTM C-39 (2020).

Para la obtención de los desplazamientos en las vigas se utilizó dos métodos: mediante el transductor de desplazamiento lineal variable (LVDT), el cual tiene una precisión de 2 micras y se ubicó en el centro de la viga; y el sistema de medición por imagen conocido como fotogrametría que además da la posibilidad de evaluar deformaciones y obtener desplazamientos de varios puntos, así como el análisis de patrones y desarrollo de las fisuras (Ortiz et al, 2018); en la implementación de esta última técnica se utilizó las imágenes captadas por una cámara CANON EOS R100, y se utilizó el software GOM Correlate para la correlación de imágenes digitales (DIC) que consiste en el seguimiento de puntos para medir coordenadas con precisión de subpíxeles y rastrearlas a lo largo del tiempo. Para facilitar la interpretación y el correcto análisis del programa se pintó una de las caras frontales de las vigas de color blanco, se realizó cuadrículas de 5x5 cm, se marcó puntos de color negro en los vértices de estas, y se salpicó pintura negra para procurar cumplir con una proporción de 50% blanco y 50% negro para realizar la correlación de puntos en el programa para la fotogrametría.

El ensayo a flexión de las vigas se lo realizó con una configuración en 3 puntos: 2 apoyos móviles y el acople que representa la carga puntual encargada de transmitir la carga en el punto medio de la longitud de la viga. En la Figura 2 se muestra el sistema completo para el ensayo.

Figura 2

Instrumentos usados para ensayo a flexión: a) Actuador hidráulico, b) Acoples, c) Celdas de cargas, d) Acople para ensayo, e) LVDT y f) Apoyos



Resultados

En esta sección se presenta los resultados de los diferentes ensayos utilizados en la investigación.

A. Ensayo a compresión del hormigón

A continuación, en la Tabla se presenta la resistencia promedio a la compresión del hormigón.

Resistencia a flexión de vigas de hormigón con refuerzo de caña guadúa

Tabla 1

Resumen de resultados de ensayo a compresión del hormigón a los 7, 14 y 28 días.

	Resistencia a la compresión a los 7 días (MPa)	Resistencia a la compresión a los 14 días (MPa)	Resistencia a la compresión a los 28 días (MPa)
Vigas de hormigón reforzadas con GaK	23,3	27,4	37.2
Norma	ASTM C-39		

B. Ensayo a flexión de vigas de hormigón reforzadas con GaK

Las vigas identificadas como VGaK1 y VGaK2, fueron sometidas al ensayo con una aplicación de carga progresiva, la configuración para la obtención de datos se estableció para captar 5 muestras por segundo, donde se observó fisuras generadas durante el ensayo, se obtuvo los desplazamientos medidos por el LVDT y por fotogrametría donde las imágenes se captaron cada 2 segundos, y las deformaciones medidas por los strain gauges; para el registro de datos se usó el instrumento Datalog encargado del procesamiento y almacenamiento de datos.

B.1. Ensayo de la viga VGaK1

En la Figura 3 se muestra la curva carga-desplazamiento de los resultados de los desplazamientos de la viga medidos con el LVDT debido a la carga aplicada durante el ensayo; en la Figura 4 los resultados de los desplazamientos de la viga captados cada 2 segundos a través de la fotogrametría y LVDT; en la Figura 5 se muestra la curva carga-deformación de los resultados de las deformaciones medidas en los elementos de refuerzo por los strain gauges. Se puede apreciar el aumento tanto de deformaciones y desplazamientos a medida que se incrementa la carga

Resistencia a flexión de vigas de hormigón con refuerzo de caña guadúa

Figura 3

Curva carga-desplazamiento de la viga VGaK1.

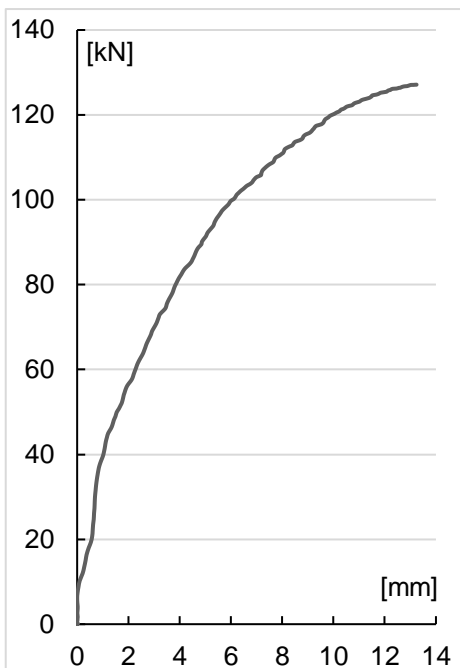


Figura 4

Curvas de desplazamiento captados cada 2 segundos por Fotogrametría y LVDT de la viga VGaK1

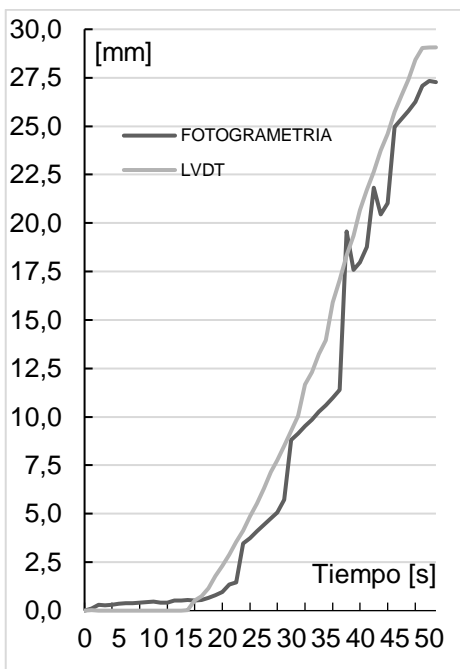
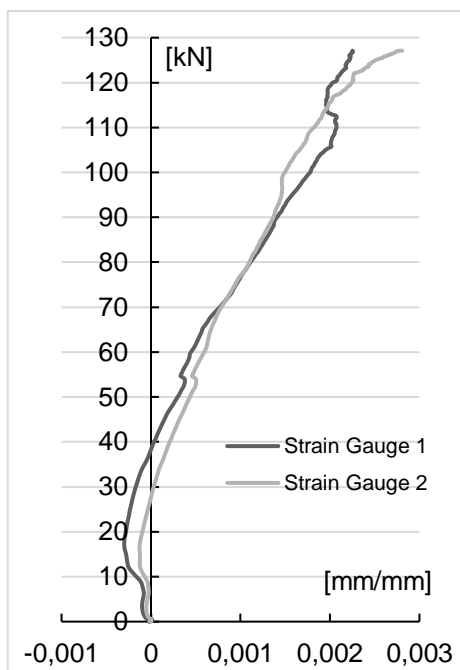


Figura 5

Curva carga-deformación del elemento de refuerzo en la viga VGaK1



A continuación, se presenta una secuencia de los registros que se obtuvo durante el ensayo y la respuesta estructural de la viga VGaK1.

En los datos registrados de los primeros 46 segundos se obtuvo una carga de 79,63 kN, el desplazamiento adquirido por el LVDT fue de 3,812 mm, y en el punto de análisis ubicado en el centro de la viga por fotogrametría fue de 3,462 mm como se muestra en la

Figura 6, la deformación que se registró en el Datalog a través del strain gauge 1 fue de 0,0003658 y strain gauge 2 fue de 0,0004948. En esta primera etapa no se observó notables fisuras producidas por la flexión ni por la fuerza cortante en la viga.

A los 60 segundos se empezó a observar las primeras fisuras por flexión y luego por corte donde se evidenció los inicios de la falla del bloque de compresión, registró una carga de 115,42 kN, el desplazamiento obtenido por el LVDT fue de 8,932 mm, y por fotogrametría de 8,797 mm como se muestra en la Figura 7, la deformación que se registró en el Datalog a través del strain gauge 1 fue de 0,0019607 y strain gauge 2 de 0,0019917.

A los 71 segundos se registró la carga máxima de 127,11 kN, el desplazamiento adquirido por el LVDT fue de 13,243 mm, y por fotogrametría de 10,977 mm como se muestra en la Figura 8, la deformación que se registró en el Datalog a través del strain gauge 1 fue de 0,0022522 y strain gauge

Resistencia a flexión de vigas de hormigón con refuerzo de caña guadúa

2 de 0,0028077. En esta etapa se evidenció una falla de flexión-cortante, observándose considerables grietas verticales debido a la flexión, que se extendieron a la grieta diagonal provocando finalmente la falla en el bloque de compresión por cortante.

La duración del ensayo fue de 102 segundos; después de alcanzar la carga máxima esta empezó a disminuir hasta 29,043 kN sin producir un colapso, se obtuvo un desplazamiento máximo medido por el LVDT de 29,07 mm, y por fotogrametría de 27,281 mm como se muestra en la Figura 9, la deformación que se registró en el Datalog a través del strain gauge 1 fue de 0,0001364 y strain gauge 2 de 0,0004861.

Figura 6

Desplazamiento medido por fotogrametría durante el ensayo a los 46 segundos



Resistencia a flexión de vigas de hormigón con refuerzo de caña guadúa

Figura 7

Desplazamiento medido por fotogrametría durante el ensayo a los 60 segundos



Figura 8

Desplazamiento medido por fotogrametría durante el ensayo a los 71 segundos



Resistencia a flexión de vigas de hormigón con refuerzo de caña guadúa

Figura 9

Desplazamiento medido por fotogrametría durante el ensayo a los 102 segundos



B.2. Ensayo de la viga VGaK2

En la Figura 10 se muestra la curva carga-desplazamiento de los resultados de los desplazamientos de la viga medidos con el LVDT; en la Figura 11 los resultados de los desplazamientos de la viga a través de la fotogrametría y LVDT debido a la carga aplicada durante el ensayo; en la Figura 12 se muestra la curva carga-deformación de los resultados de las deformaciones medidas en los elementos de refuerzo por los strain gauges. Se puede apreciar el aumento tanto de deformaciones y desplazamientos a medida que se incrementa la carga.

Resistencia a flexión de vigas de hormigón con refuerzo de caña guadúa

Figura 10

Curva carga-desplazamiento de la viga VGaK2

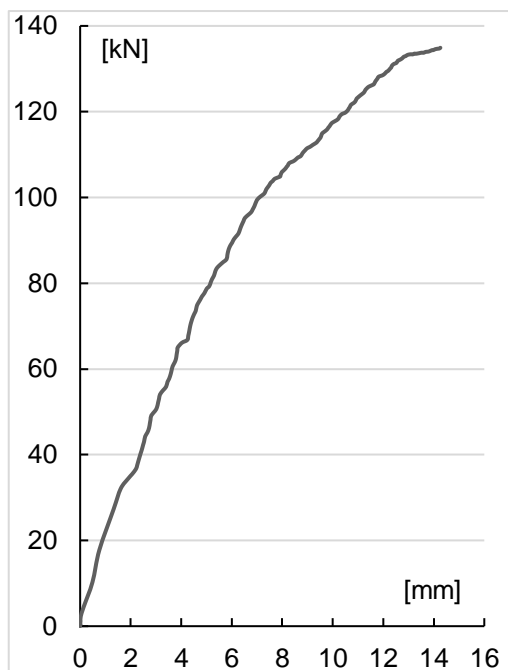


Figura 11

Curvas de desplazamientos captados cada 2 segundos por fotogrametría y LVDT de la viga VGaK2

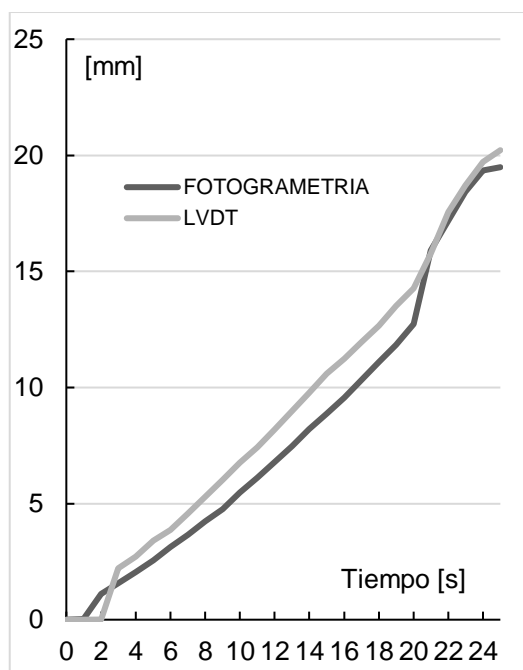
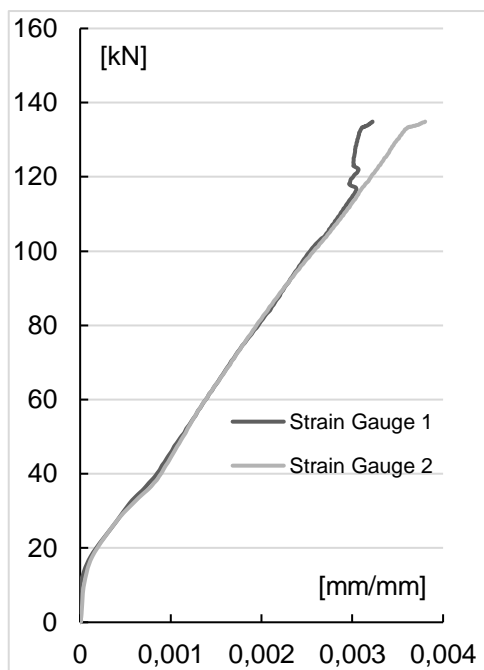


Figura 12

Curva carga-deformación del elemento de refuerzo en la viga VGaK2



A continuación, se presenta una secuencia de los registros que se obtuvo durante el ensayo y la respuesta estructural de la viga VGaK2.

En los datos registrados de los primeros 8 segundos se obtuvo una carga de 37,49 kN, el desplazamiento adquirido por el LVDT fue de 2,256 mm y en el punto de análisis ubicado en el centro de la viga por fotogrametría fue de 2,048 mm como se muestra en la Figura 13, la deformación que se registró en el Datalog a través del strain gauge 1 fue de 0,0007558 y del strain gauge 2 fue de 0,0008114. En esta primera etapa no se observó notables fisuras producidas por la flexión ni por la fuerza cortante en la viga.

En los datos registrados a los 22 segundos se obtuvo una carga de 91,17 kN, el desplazamiento obtenido por el LVDT fue de 6,828 mm y por fotogrametría fue de 6,121 mm como se muestra en la Figura 14, la deformación que se registró en el Datalog a través del strain gauge 1 fue de 0,0024487 y del strain gauge 2 fue de 0,0024753. En esta etapa se presenciaron fisuras producidas por la flexión y la aparición de una fisura diagonal indicadora de una futura falla en el bloque de compresión por cortante.

A los 41 segundos se registró la carga máxima de 134,9 kN, el desplazamiento medido por el LVDT fue de 14,261 mm y por fotogrametría fue de 15,909 mm como se muestra en la Figura 15, la

Resistencia a flexión de vigas de hormigón con refuerzo de caña guadúa

deformación registrada por el Datalog a través del strain gauge 1 fue de 0,0032223 y del strain gauge 2 fue de 0,0038024. En esta se observó una falla flexión-cortante, debido a las grietas verticales, que se extendieron hasta la grieta diagonal finalizando con una falla en el bloque de compresión por cortante. La duración del ensayo fue 61 segundo sin que la viga colapse, posterior a la carga máxima esta fue disminuyendo, sin embargo, a los 50 segundos se registró el máximo desplazamiento por el LVTD que fue de 20,164 mm y por fotogrametría fue de 19,488 mm como se muestra en la Figura 16, con una carga de 40,66 kN, la deformación que obtenida en el Datalog a través del strain gauge 1 fue de 0,001761 y del strain gauge 2 fue de 0,001966.

Figura 13

Desplazamiento medido por fotogrametría durante el ensayo a los 8 segundos

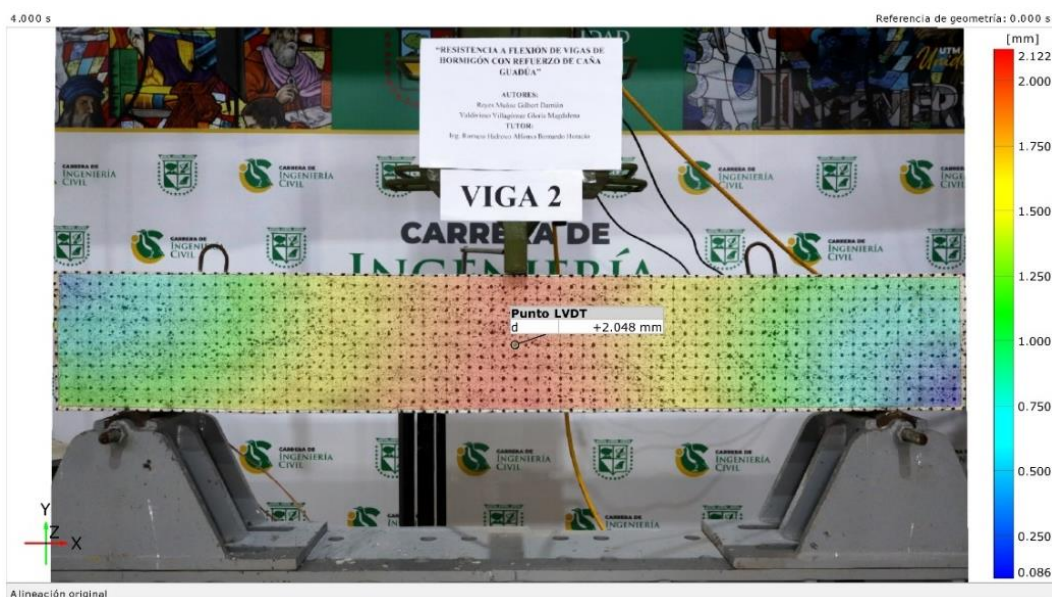


Figura 14

Desplazamiento medido por fotogrametría durante el ensayo a los 22 segundos

Resistencia a flexión de vigas de hormigón con refuerzo de caña guadúa



Figura 15

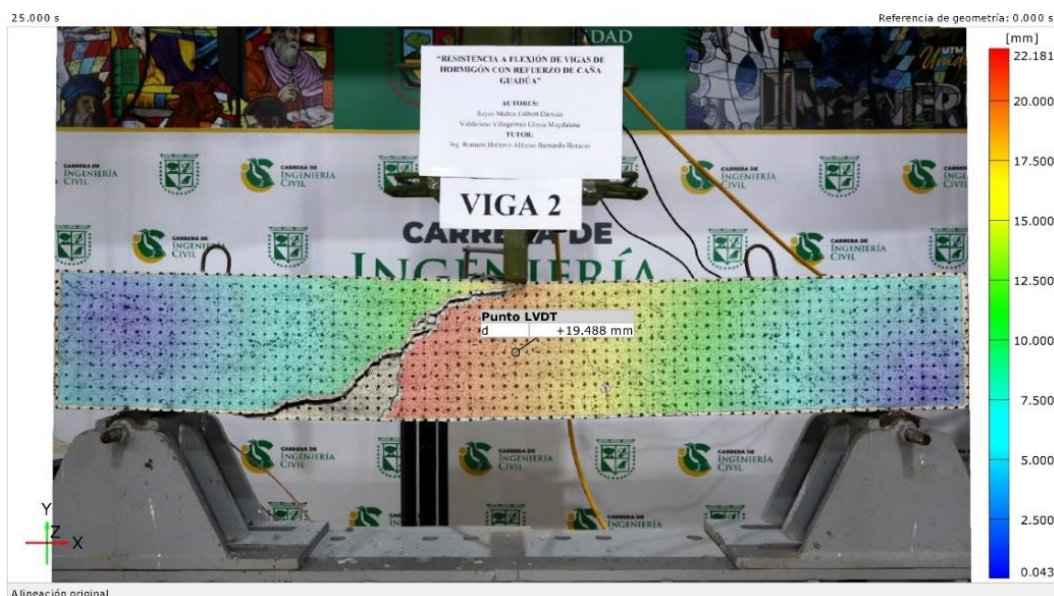
Desplazamiento medido por fotogrametría durante el ensayo a los 41 segundos



Figura 16

Desplazamiento medido por fotogrametría durante el ensayo a los 50 segundos

Resistencia a flexión de vigas de hormigón con refuerzo de caña guadúa



C. Reporte de resultados de vigas de hormigón reforzadas con GaK

En la Tabla se muestran los resultados de la carga máxima, desplazamiento y deformaciones de las vigas de hormigón reforzadas con GaK.

Tabla 2

Resultados del ensayo a flexión durante la carga máxima de las vigas de hormigón reforzadas con GaK

Viga	Carga	Desplazamiento	Deformación 1	Deformación 2
	kN	mm		
Viga de hormigón reforzadas con GaK, VGaK1	127,11	-13,243	0,0022522	0,0028077
Viga de hormigón reforzadas con GaK, VGaK2	134,9	-14,261	0,0032223	0,0038024

Resistencia a flexión de vigas de hormigón con refuerzo de caña guadúa

D. Reporte de resultados de vigas de referencia

En la Tabla se muestran los resultados de la carga máxima, desplazamiento y deformaciones de las vigas de referencia tomados de los ensayos de Moreira et al., (2024).

Tabla 3

Resultados del ensayo a flexión durante la carga máxima de las vigas de referencia

Viga	Carga	Desplazamiento	Deformación 1	Deformación 2
	kN	mm		
Viga con cuantía máxima sin junta fría, E3A	115,19	-4,858	0,0013486	0,0013738
Viga con cuantía máxima con junta fría, E3B	121,07	-5,722	0,0012391	

Fuente: (Moreira et al, 2024)

Análisis y discusión de resultados

Los resultados durante la carga máxima de los ensayos a flexión de las vigas de hormigón reforzadas con GaK identificadas como VGaK1 y VGaK2 se obtuvo una resistencia media de 131,005 kN con una capacidad de carga ligeramente superior respecto a la resistencia media de 118,130 kN de las vigas de referencia, sin embargo, las vigas de hormigón reforzadas con GaK presentaron una mayor deflexión media de 13,752 mm que las vigas de referencia con una deflexión media de 5,29 mm, esto debido a que la caña posee un bajo módulo de elasticidad en comparación con el acero. Pese a que se usó una cuantía de 5% considerada como máxima en las vigas de hormigón reforzadas con GaK, el elemento de refuerzo que sufrió mayor deformación fue la caña respecto al acero que tuvo una menor deformación debido a su rigidez y resistencia.

Las vigas de hormigón reforzadas con GaK, presentaron la falla flexión-cortante, originada principalmente por las grietas a flexión que se extendieron a la grieta diagonal por la ausencia de estribos en las vigas, lo que condujo finalmente a una falla en el bloque de compresión por cortante; en las vigas de referencia, se observó la falla en el bloque de compresión por cortante, pero en estas no se presentaron grietas considerables a flexión.

Resistencia a flexión de vigas de hormigón con refuerzo de caña guadúa

Los métodos aplicados para medir los desplazamientos de las vigas de hormigón reforzadas con GaK, tanto el transductor de desplazamiento lineal variable (LVDT) y el sistema de medición por imágenes, proporcionaron una precisión de 8,40% en los resultados de desplazamientos medidos en el centroide de la cara frontal de la viga durante el ensayo.

Conclusiones

Se verificó que la precisión de resultados entre las dos vigas de hormigón reforzadas con GaK realizadas por un mismo operador, no difirieron más del 12% de acuerdo con la norma ASTM C-293 para ensayos a flexión, con una precisión en los resultados del 5,77%.

Se determinó que las vigas de hormigón reforzadas con GaK tuvieron una resistencia a flexión de 9,83% y un desplazamiento de 61,53%, superior a las vigas de referencia (vigas de hormigón reforzadas con acero).

De acuerdo con los resultados de los desplazamientos medidos con el LVDT en las vigas de hormigón reforzadas con GaK, estos podrían disminuir si se usa caña guadúa como refuerzo con una cuantía superior al 5% para igualar el módulo de elasticidad del acero, lo que sería un inconveniente al momento de construir por la separación entre latillas.

De los métodos para medir desplazamientos, el sistema de medición por imagen donde se utiliza una cámara de alta resolución y un programa de correlación de imágenes, tiene una precisión similar a la medida con LVDT, por lo que se recomienda implementar esta técnica debido a que instrumentos como el LVDT son de alto costo y corren el riesgo de dañarse durante el ensayo, además, que la fotogrametría permite analizar los desplazamientos durante el ensayo en cualquier punto de la viga, mostrando una escala de colores referente a los desplazamientos en los resultados proporcionados por el software GOM Correlate.

Se pudo constatar que la GaK en contacto con el hormigón tiene un buen comportamiento cuando es tratada para evitar la absorción del agua del hormigón evitando los cambios de volumen, aunque se puede contrarrestar al tener un cemento de rápido fraguado o con el uso de aditivos como súper plastificantes para disminuir el porcentaje de agua en la mezcla.

Para ensayos a flexión donde la viga no contenga estribos, es aconsejable realizar el ensayo en 4 puntos que consiste en la aplicación de carga en dos puntos, ubicados a 1/3 de los apoyos para garantizar su falla a flexión, sin embargo, el ensayo en 3 puntos tiene la ventaja de poder apreciar una

Resistencia a flexión de vigas de hormigón con refuerzo de caña guadúa

falla flexión-cortante; para posteriores investigaciones se recomienda ensayar vigas de hormigón simplemente apoyadas, con estribos de acero y refuerzo de caña guadúa en la zona a tracción, para conocer su capacidad máxima de carga a flexión.

Se constató que la GaK es un material de poca adherencia y de bajo módulo de elasticidad, que la vuelve poco viable para su uso como refuerzo en una construcción de gran envergadura, sin embargo, para estructuras pequeñas y que requieran de menores solicitaciones el uso de este elemento como refuerzo puede ser viable.

Referencias

- ACI (American Concrete Institute) Committee 318. (2014). Building Code Requirements or Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318R-14). Farmington Hills. MI. ISBN: 978-0-87031-930-3
- Agarwal, A., Nanda, B., & Maity, D. (30 de 11 de 2014). Experimental investigation on chemically treated bamboo reinforced concrete beams and columns. *Construction and Building Materials*, 71, 610-617. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.011>
- Ashby, M., Cope, E., & Cebon, D. (2013). Chapter 10 - Materials Selection for Engineering Design. (K. Rajan, I. f. Engineering, & Butterworth-Heinemann, Edits.) 219-244. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394399-6.00010-2>
- ASTM. (2016). C293/ C293M-16 Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading). ASTM International. https://dx.doi.org/10.1520/C0293_C0293M-16
- ASTM. (2020). C143/C143M-20 Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. ASTM International. https://dx.doi.org/10.1520/C0143_C0143M-20
- ASTM. (2020). C39/ C39M-20 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International. https://dx.doi.org/10.1520/C0039_C0039M-20
- Dey, A., & Chetia, N. (2018). Experimental study of Bamboo Reinforced Concrete beams having various frictional properties. *Materials Today: Proceedings*, 5(1), 436-444. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.103>
- Ferreira, G. C. (2002). Vigas de concreto armadas com bambu. Campinas, SP. <http://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2002.231228>

Resistencia a flexión de vigas de hormigón con refuerzo de caña guadúa

- Geymayer, H. G., & Cox, F. B. (1970). Bamboo Reinforced Concrete. 67(10), 841-846. <https://doi.org/10.14359/7314>
- Ghavami, C. (2005). Bamboo as reinforcement in structural concrete elements. *Cement and Concrete Composites*, 27(6), 637-649. <http://doi.org/10.1016/j.cemc|oncomp.2004.06.002>
- Glenn, H. E. (1950). *Bamboo Reinforcement in Portland Cement Concrete (Vol. 4)*. Clemson, South Carolina: Engineering Experiment Station.
- Gómez, H. J., Ramal, R., & Rodríguez, S. I. (2020). EL BAMBÚ: UNA SOLUCIÓN ECOLÓGICA SUSTENTABLE COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN. *TZHOECOEN*, 12(2), 253–262. <https://doi.org/10.26495/tzh.v12i2.1264>
- Hidalgo, O. (1978). *Nuevas Técnicas de Construcción con Bambú*. Universidad Nacional de Colombia: CIBAM. <https://bambubioartefato.wordpress.com/wp-content/uploads/2014/07/1978-nuevas-tecnicas-de-construccion-con-bambu-o-lopez-149pg.pdf>
- Kaminski, S. L. (2016). Structural use of bamboo: Part 2: Durability and preservation. *The Structural Engineer*, 94(10), 38-43. [https://www.istructe.org/journal/volumes/volume-94-\(2016\)/issue-10/structural-use-of-bamboo-part-2-durability-and-pr/](https://www.istructe.org/journal/volumes/volume-94-(2016)/issue-10/structural-use-of-bamboo-part-2-durability-and-pr/)
- Lugt, P., & Vogtlander, J. (2015). The Environmental Impact of Industrial Bamboo Products - Life-Cycle Assessment and Carbon Sequestration. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.20797.46560>
- MAG. (2018). *Ecuador: Estrategia nacional del bambú 2018-2022*. Quito, Ecuador: Red Internacional del Bambú y el Ratán. <https://bambuecuador.wordpress.com/wp-content/uploads/2019/03/estrategia-nacional-bambc3ba-2018-2022-versic3b3n-resumida.pdf>
- Mark, A.-A., & Russell, A. O. (2011). A Comparative Study of Bamboo Reinforced Concrete Beams Using Different Stirrup Materials for Rural Construction. *International Journal Of Civil and Structure Engineering*, 2(1), 1420-1436. 10.6088.ipajcse.2011213033
- Moreira, L. M., Zambrano, S. A., & Mieles, Y. I. (2024). *Demostración experimental de la resistencia a flexión de una viga de hormigón armado con cuantía máxima y adecuaciones en el marco de reacción de la UTM*. Portoviejo, Ecuador.: Tesis de grado. Universidad Técnica de Manabí, Facultad de Ingenierías y Ciencias Aplicadas.

Resistencia a flexión de vigas de hormigón con refuerzo de caña guadúa

https://drive.google.com/file/d/1OG1QpKbPKq1H4KtDB-hf4LM4sdupIStO/view?usp=drive_link

- Muhtar, Dewi, S. M., Wisnumurti, & Munawir, A. (2018). The Stiffness and Cracked Pattern of Bamboo Reinforced Concrete Beams Using a Hose Clamp. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(8), 273-284.
- NEC. (2017). Norma Ecuatoriana de la construcción. Estructuras de hormigón armado. NEC-SE-HM. Quito, Ecuador. <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/2023/03/8.-NEC-SE-HM-Hormigon-Armado.pdf>
- NEC-SE-GUADUA. (2017). Norma Ecuatoriana de la Construcción, Estructuras de Guadúa (GaK). NEC-SE-GUADÚA. Quito. <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/2023/03/16.-NEC-SE-GUADUA-VERSION-FINAL-WEB-MAR-2017.pdf>
- Ortiz, F., Navarro, J., & Serna, P. (2018). Análisis experimental mediante fotogrametría del comportamiento de fisuras de cortante en vigas esbeltas de hormigón armado reforzado con fibras macro sintéticas. Editorial Universitat Politècnica de València, 567-576. <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.6411>
- Ramos Serrano, J. J. (2023). Análisis Estructural entre una Viga de Concreto Reforzado con Acero y con Bambú en Lambayeque, 2020. Lima, Perú: Tesis de Grado. Universidad Señor de Sipán, Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Urbanismo. <https://hdl.handle.net/20.500.12802/11866>

©2024 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).