



DOI: <https://doi.org/10.23857/dc.v11i3.4445>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

Análisis experimental comparativo entre una viga armada con PRFV y con acero de refuerzo

Comparative experimental analysis between a beam reinforced with GRP and steel reinforcement

Análise experimental comparativa entre uma viga armada com PRFV e com aço de refúgio

José Martín Rivera-Delgado ^I
jrivera8369@utm.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0008-9113-9724>

Roque Tomás Linzan-Medrandá ^{II}
rlinzan5408@utm.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0001-1399-5495>

Lincoln Javier García-Vinces ^{III}
lincoln.garcia@utm.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-8659-3190>

Correspondencia: jrivera8369@utm.edu.ec

***Recibido:** 11 de abril de 2025 ***Aceptado:** 14 de mayo de 2025 * **Publicado:** 30 de junio de 2025

- 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.
- III. Máster en Ciencias de la Ingeniería, Mención Estructura, Profesor de Tiempo Completo de la Escuela de Ingeniería Civil de la Facultad Ingeniería y Ciencias Aplicadas de la Universidad Técnica de Manabí, Especialista en Cálculos de Hormigón, Especialista en Cálculos Estructurales, Portoviejo, Ecuador.

Resumen

El objetivo principal de esta investigación fue analizar el potencial de las varillas de polímero reforzadas con fibra de vidrio denominadas “PRFV”, como una opción factible para reforzar vigas de hormigón. A través del ensayo a flexión, se determinó el comportamiento estructural de una viga que fue reforzada con varillas de PRFV y acero corrugado, las cuales de aquí en adelante será mencionada como “viga de hormigón con armado mixto” comparándola con una viga de hormigón que fue reforzada únicamente con acero de refuerzo corrugado, la cual de aquí en adelante será mencionada como “viga estándar”. Los resultados demostraron que la viga de hormigón con armado mixto tuvo una capacidad de carga superior con relación a la viga estándar, debido a las propiedades mecánicas del PRFV. No obstante, respecto a los desplazamientos cabe destacar que la viga reforzada con PRFV y acero corrugado no presentó un comportamiento estructural óptimo ya que tuvo mayor desplazamiento que la viga estándar, atribuible al bajo modulo elástico que este material posee. En lo que respecta a la medición de desplazamientos, se realizó un análisis por el transductor de desplazamiento lineal variable (LVDT) el cual posee una precisión de 2 micras, destacando la confiabilidad de los resultados obtenidos en los ensayos realizados para esta investigación.

Palabras Claves: Polímero reforzado con fibra de vidrio; ensayo a flexión; viga de hormigón; acero corrugado; reforzamiento.

Abstract

The main objective of this investigation was to analyze the potential of polymer rods reinforced with glass fiber called “PRFV”, as a feasible option for strengthening structural beams. Through the flexion test, the structural behavior of a beam that was reinforced with PRFV rods and corrugated steel was determined, which hereafter will be referred to as a “hormigón beam with mixed reinforcement” comparing it with a hormigón beam that was reinforced only with corrugated steel, whichever is here next will be referred to as “standard beam”. The results demonstrated that the mixed reinforced reinforced beam has a higher load capacity compared to the standard beam, due to the mechanical properties of the GRP. However, regarding the displacements, it is worth highlighting that the beam reinforced with PRFV and corrugated steel currently has excellent structural behavior and has greater displacement than the standard beam, attributable to the lower elastic modulus that this material poses. Regarding displacement measurement, an analysis was carried out using the linear

Análisis experimental comparativo entre una viga armada con PRFV y con acero de refuerzo

variable displacement transducer (LVDT) which has an accuracy of 2 microns, highlighting the reliability of the results obtained in the tests carried out for this investigation.

Keywords: Glass fiber reinforced polymer; I test the flexion; hormigón beam; corrugated steel; reinforcement.

Resumo

O objetivo principal desta investigação foi analisar o potencial das varilhas de polímero reforçadas com fibra de vidro denominada “PRFV”, como uma opção factível para reforçar vigas de hormigón. Ao longo do ensaio de flexão, se for determinado o comportamento estrutural de uma viga que foi reforçada com varillas de PRFV e aço corrugado, os quais aqui em adelante serão mencionados como “viga de hormônio com armado misto” comparando com uma viga de hormigão que foi reforzada apenas com aço de refuerzo corrugado, la cualquier coisa aqui em adelante será mencionada como “viga padrão”. Os resultados demonstraram que a viga de hormigón armada combinava com você uma capacidade de carga superior em relação à viga padrão, devido às propriedades mecânicas do PRFV. No entanto, a respeito dos desplazamientos cabe destacar que a viga reforçada com PRFV e aço corrugado não apresentou um comportamento estrutural óptimo, pois seu maior desplazamiento que a viga padrão, atribuível ao baixo módulo elástico que este material representa. No que diz respeito à medição de deslocamentos, foi realizada uma análise pelo transdutor de deslocamento linear variável (LVDT), que possui uma precisão de 2 micras, destacando a confiabilidade dos resultados obtidos nos ensaios realizados para esta investigação.

Palavras-chave: Polímero reforçado com fibra de vidro; ensaio a flexão; viga de hormigón; aço ondulado; reforço.

Introducción

Con el pasar de los años y la necesidad humana de reinventarse y mejorar, ha llevado al ser humano a buscar mejoras y soluciones a nivel tanto técnico como económico. En el campo de la ingeniería civil, los ingenieros se han visto en la obligación de encontrar avances que combinen una alta resistencia, una mayor durabilidad y un bajo peso en las estructuras de hormigón armado. El uso de varillas de polímero reforzadas con fibra de vidrio “PRFV” ha emergido como un material prometedor para el refuerzo de vigas de hormigón armado, pues este material cuenta con una alta durabilidad, mayor resistencia a tracción, bajo peso y es resistente a la corrosión en medios agresivos,

Análisis experimental comparativo entre una viga armada con PRFV y con acero de refuerzo

la cual nos podría aportar sus propiedades para mejorar y buscar una combinación con el acero de refuerzo corrugado.

Las vigas de hormigón armado son elementos estructurales horizontales esenciales que desempeñan un papel crucial en la distribución de cargas en una edificación. Su función principal consiste en la transmisión de cargas perpendiculares a lo largo de su eje longitudinal desde las cargas aplicadas en los elementos superiores, como losas o muros, hacia las columnas o pilares. (Bautista, & Inca, 2023). Debido a su alta comercialización y su alto grado de manufactura las varillas de acero corrugado han sido utilizado por casi dos siglos como el principal refuerzo que se le coloca a una viga de hormigón armado, ya que esta cuenta con una gran resistencia y ductilidad. Actualmente en Ecuador se utiliza el acero Grado 60, Según Torres & Martínez, (2001) el acero de Grado 60 presenta un esfuerzo a fluencia de 420 MPa, por lo que, si el área de acero se incrementa, la fuerza de tracción resultará ser mayor, pero si se disminuye, esta también disminuirá. Como resultado, es evidente que cualquier grado de corrosión afectará su resistencia.

Por otro lado, el PRFV (Polímero Reforzado con Fibra de Vidrio) está compuesto por filamentos continuos de fibra, los cuales pueden ser de vidrio o carbono, y están encapsulados en una matriz polimérica. Este material se fabrica mediante un proceso denominado pultrusión, en el cual las fibras son sometidas a un estiramiento controlado y guiadas a través de matrices de sección reducida para conformar hilos continuos. En este proceso, la fibra actúa como el elemento de refuerzo, proporcionando alta resistencia mecánica, mientras que la resina cumple la función de matriz, garantizando la cohesión del material y mejorando su comportamiento frente a agentes ambientales y esfuerzos mecánicos. Según el ACI 440, (2015), los polímeros compuestos por fibras poseen algunas propiedades como su alta resistencia a la tracción, bajo peso y resistencia a la corrosión, convirtiéndose en un material adecuado para su uso como refuerzo estructural.

El polímero reforzado con fibra de vidrio (PRFV) a diferencia del acero de refuerzo, presenta una curva elástica hasta la falla cuando es sometida a tensión además de ser anisótropo, es decir, presenta diferencias entre su resistencia a tensión, corte y compresión. Como ya se mencionó, el material carece de un límite de fluencia que compensa con su alta resistencia y un módulo elástico bajo, lo cual le confiere capacidad de deformación y respuesta dúctil al binomio concreto-refuerzo. Sin embargo, esto genera incertidumbre sobre la seguridad del diseño enfocado en la ductilidad del acero (GangaRao, Taly, & Vijay, 2006). Una de las principales limitaciones del acero es su susceptibilidad a la corrosión, un problema que el polímero reforzado con fibra de vidrio (PRFV) mitiga de manera

Análisis experimental comparativo entre una viga armada con PRFV y con acero de refuerzo

eficiente. En condiciones ambientales agresivas, la armadura de acero puede experimentar un deterioro progresivo debido a la acción de agentes corrosivos, lo que compromete sus propiedades mecánicas, como la resistencia, la ductilidad y la estabilidad dimensional. Este proceso de degradación puede generar daños inducidos por la corrosión en los elementos estructurales, afectando su desempeño y reduciendo su vida útil.

Según detallan Sánchez & Aguilar, (2022), este tipo de varillas han tenido grandes demandas en países anglosajones, siendo el refuerzo principal en grandes estructuras como puentes, donde se destaca un apartado exclusivo en la norma AASHTO-GFRP del 2017. (p. 96). Lalvay, (2017) menciona que es un material sumamente novedoso que en los últimos años muchos profesionales están utilizando este material como refuerzo en las construcciones; todo esto debido a que el costo del acero cada día aumenta (p. 15). Aunque en Latinoamérica aun no es un material de uso comercial, ya existen varios ensayos experimentales que lograron determinar la posibilidad de su aplicación como refuerzo en vigas de hormigón armado.

Morales et al., (2019) realizaron una investigación experimental comparativa sobre el comportamiento a flexión de vigas de concreto armado reforzados con varillas de acero convencional y con varillas de polímero reforzado con fibra de vidrio (PRFV). Los resultados indicaron que las vigas reforzadas con PRFV presentaron una mayor deformabilidad, alcanzando una deflexión máxima aproximadamente el doble de la registrada en las vigas reforzadas con acero. Asimismo, la capacidad resistente final de las vigas con PRFV fue comparable o ligeramente superior a la de aquellas con refuerzo de acero. Con base en estos hallazgos, los investigadores concluyeron que el PRFV constituye una alternativa viable para el refuerzo estructural, especialmente en entornos con alta exposición a la corrosión.

En un estudio realizado por Poma, (2021), las vigas de concreto armado reforzados con polímero reforzado con fibra de vidrio (PRFV) demostraron una capacidad resistente superior en comparación con aquellas reforzadas con acero. Según el estudio realizado, los ensayos experimentales revelaron que las vigas con refuerzo de PRFV alcanzaron una resistencia última de 1.3 toneladas, mientras que las vigas con refuerzo de acero solo lograron una resistencia de 0.5 toneladas. Estos resultados evidencian que la resistencia última a flexión de las vigas reforzadas con PRFV fue aproximadamente 2.5 veces mayor que la de las vigas con refuerzo de acero.

El objetivo de esta investigación es evaluar experimentalmente el desempeño estructural de una viga de hormigón reforzada con una combinación de PRFV y acero corrugado. De acuerdo con los estudios

Análisis experimental comparativo entre una viga armada con PRFV y con acero de refuerzo

previos, el refuerzo exclusivo con PRFV presenta una alta resistencia a los esfuerzos de tracción; sin embargo, su bajo módulo de elasticidad constituye una limitación, ya que puede inducir desplazamientos excesivos bajo carga. La incorporación de acero en conjunto con PRFV busca mitigar este efecto, optimizando la rigidez y el desempeño mecánico de la estructura.

Materiales y métodos

El siguiente trabajo investigativo es de enfoque cuantitativo y alcance descriptivo ya que se comparará los resultados obtenidos en un ensayo a flexión entre una viga reforzada con varillas de PRFV y con acero corrugado; y otra viga con varillas de acero de refuerzo para comprender las propiedades mecánicas del PRFV al soportar cargas en vigas de concreto para así considerar la posible sustitución del acero de refuerzo.

Para lo cual se hará uso de la investigación bibliográfica-documental, Sánchez et al. (2018) nos indica que este tipo de diseño tiene como propósito la búsqueda de información desde diferentes puntos de vista a través de campos científicos, tecnológicos y humanísticos. Hurtado (2010) expresa que los documentos científicos utilizados permiten generar conocimiento por medio de la investigación. Así mismo, la información se obtuvo por medio de la búsqueda en diversos buscadores Google Scholar, Redalyc y Scielo.

Además del método experimental realizado en el análisis de la resistencia a flexión, se efectuó un ensayo a los especímenes para comprobar la resistencia de las vigas elaboradas con varillas de polímero reforzada con fibra de vidrio y acero; además de otro ensayo realizado a la viga reforzada con acero corrugado. Esto permitió determinar la capacidad de las vigas al soportar una flexión continua por carga puntual.

A continuación, se describe la fase de diseño y construcción de las vigas para su posterior análisis de resultados obtenidos.

a. Selección de las varillas de refuerzo (PRFV y Acero G60)

Para la presente investigación se utilizó varillas corrugadas de 10 mm de PRFV adquiridas al proveedor IMPA s.a., empresa la cual se encuentra ubicada en la ciudad de Asunción, Paraguay. Estas varillas poseen un módulo de elasticidad a la tensión de 55000 MPa siendo aproximadamente cuatro veces menor que la del acero corrugado, además posee una resistencia última a la tracción de 1000 MPa y es resistente a la corrosión en medios agresivos; cabe recalcar, que estos datos fueron obtenidos de las especificaciones técnicas del producto otorgadas por el proveedor.

Análisis experimental comparativo entre una viga armada con PRFV y con acero de refuerzo

Para la selección de acero G60 utilizamos una de las principales marcas de acero disponibles en el mercado siendo esta Novacero, se adquirieron varillas de acero corrugada de 12 mm las cuales según las especificaciones técnicas del fabricante estas cuentan con esfuerzo a la fluencia de 420 MPa y un módulo elástico de 200000 MPa.

b. Resistencia a la compresión del Hormigón

Para determinar la resistencia a compresión del hormigón de las vigas se tomaron nueve muestras el día de la fundición, las cuales fueron ensayada tres muestras por día. Las muestras fueron tomadas 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 un promedio de la resistencia a la compresión $f'c = 24,04 \text{ MPa}$.

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 1800 mm siendo cuatro veces mayor a la altura útil de la sección transversal de acuerdo con el requisito 4.2.1 de la NEC (2015) para elementos a flexión. La viga posee estribos de 100 mm con una separación de 100 mm en toda la sección longitudinal, exceptuando los estribos centrales que tienen una separación de 110 mm y el primer estribo al inicio de la varilla se encuentra a 50 mm del refuerzo longitudinal cumpliendo con el requisito 4.2.8. de la NEC (2015) para estribos de confinamiento.

Se consideró 2 vigas de hormigón de las mismas dimensiones, con la distribución de estribos mencionadas, y en ambas con 2 varillas de acero de 120 mm en la zona de compresión, una viga fue reforzada con 3 varillas de acero en la zona de tracción; mientras que la otra viga se construyó con 2 varillas de refuerzo de PRFV en sus extremos y adicional una varilla de acero corrugado en la zona de tracción, se realizó la comparación de los resultados obtenidos en el ensayo de flexión de ambas vigas, como se muestra en la figura 1 y figura 2.

Análisis experimental comparativo entre una viga armada con PRFV y con acero de refuerzo

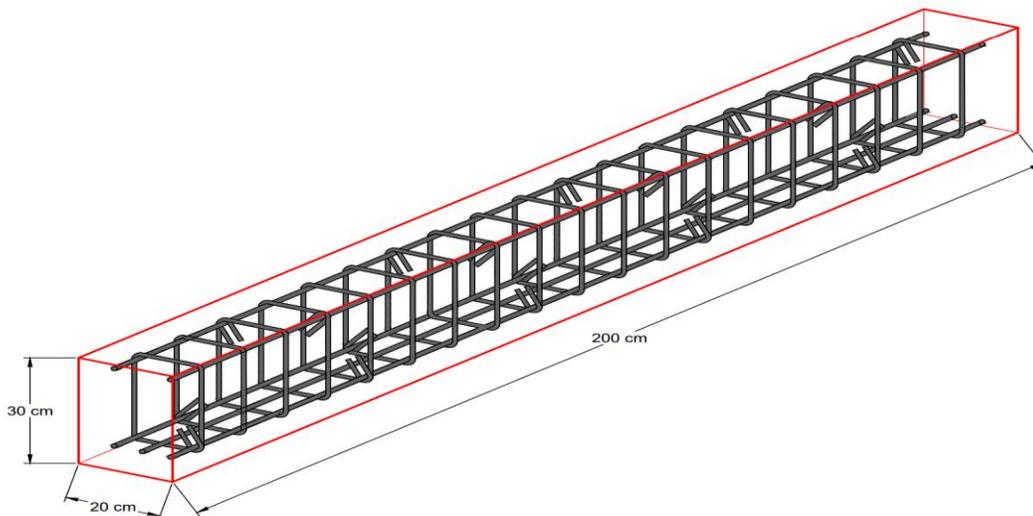


Figura 1. Dimensiones y distribución del refuerzo de acero en la viga de hormigón estándar

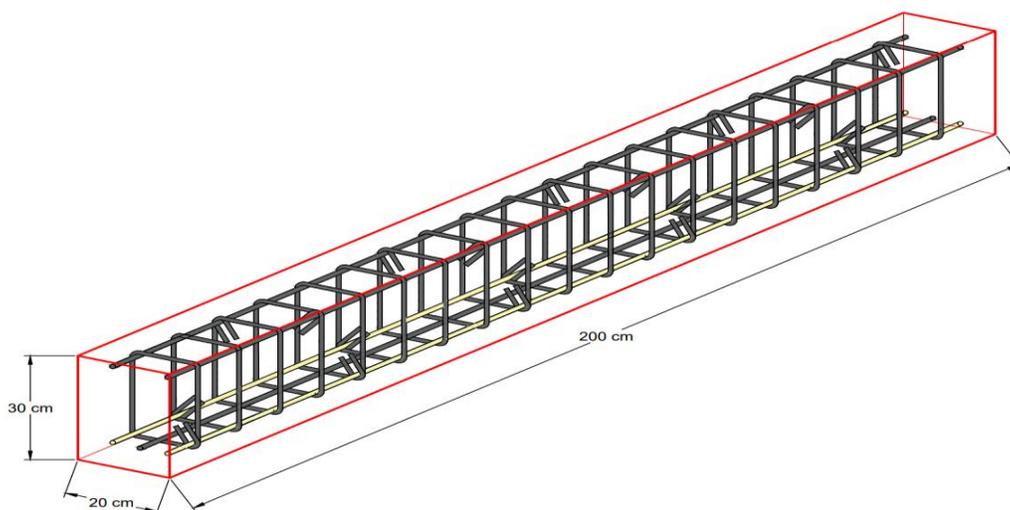


Figura 2. Dimensiones y distribución del refuerzo de acero y PRFV en la viga de hormigón con armado mixto

Cada viga está equipada con un strain gauges, fundamental para la medición de deformaciones durante el ensayo a flexión. Estos dispositivos fueron estratégicamente ubicados en la varilla interna del centro en la viga estándar y en la viga de hormigón con armado mixto se ubicó en una de las varillas de PRFV asegurando una evaluación precisa del comportamiento estructural.

Para la instalación de los strain gauges, se siguieron estrictamente las especificaciones del fabricante. Inicialmente, la superficie de las varillas fue lijada hasta obtener una textura completamente lisa y uniforme, optimizando así la adherencia del sensor. Posteriormente, se realizó una limpieza

Análisis experimental comparativo entre una viga armada con PRFV y con acero de refuerzo

minuciosa con gasa y alcohol para eliminar cualquier residuo o impureza que pudiera comprometer la precisión de la medición.

El strain gauges fue posicionado en la región de máxima tracción de las varillas, donde se anticipa la mayor concentración de deformaciones durante el ensayo a flexión. Para su fijación, se empleó el adhesivo instantáneo "Loctite Super Bonder", seleccionado por su alta capacidad de adhesión y precisión en la aplicación. Finalmente, los conductores fueron soldados en los terminales de los strain gauges, garantizando una conexión confiable para la adquisición de datos experimentales, fueron recubiertos con cinta auto fundente para proporcionarles protección durante el proceso de fundición de las vigas, minimizando el riesgo de daño o interferencia en las mediciones. Finalmente, se verificó la resistencia eléctrica de cada sensor utilizando un multímetro, asegurando que los valores obtenidos se encontraran dentro del rango esperado de $120 \pm 3 \text{ ohm}$, garantizando la precisión y confiabilidad de los datos obtenidos.

Las vigas fueron fundidas armando encofrados de planchas de plywood de 9 milímetros de espesor tipo Aqua Standar, la cual no absorbe la humedad del hormigón al momento de fundir; posteriormente se preparó el hormigón utilizando una dosificación de hormigón de 21 MPa, la cual consistió de 1 saco de cemento, 26 litros de agua, 2 cajoneras de agregados finos y por ultimo 2,5 cajoneras de agregado grueso, cabe recalcar que para nuestras vigas necesitábamos un volumen de hormigón de $0,24 \text{ m}^3$ por lo que se preparó dicha cantidad siguiendo las dosificaciones para realizar la fundición. Al hormigón se le 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 promedio de 8,2 centímetros. Debido a la alta cuantía de acero utilizada en el ensayo se utilizó un vibrador para que el hormigón penetre con mayor facilidad en todos los espacios, las vigas y los cilindros fueron desencofrados 24 horas después de ser fundidos; las vigas fueron curadas y envueltas en papel film para así mantener la humedad en ellas, mientras que los cilindros fueron sumergidos en agua para garantizar las condiciones adecuadas para el ensayo según las edades establecidas en la norma ASTM-C39 (2020). Para la obtención de los desplazamientos en las vigas se utilizó el método mediante el transductor de desplazamiento lineal variable (LVDT), el cual cuenta con una precisión de 2 micras y se lo ubicó en el centro de la viga. El ensayo a flexión de las vigas se lo realizo con una configuración la cual contaba con 2 apoyos móviles ubicados a 10 centímetros desde el borde de la viga en el sentido longitudinal y un acople que representa la carga puntual encargada de transmitir la carga en el punto medio de la viga. En la figura 3 se muestra el sistema completo y sus componentes

Análisis experimental comparativo entre una viga armada con PRFV y con acero de refuerzo



Figura 3. Instrumentos usados para ensayo a flexión: a) Actuador, b) Acoples, c) Celdas de cargas, d) Acople para ensayo, e) LVDT y f) Apoyos

Resultados

En este apartado se dan a conocer los resultados de los distintos ensayos utilizados en la investigación; además de los resultados esperados mediante cálculos analíticos.

a. Resistencia a la compresión del Hormigón.

Cabe destacar que, conforme a lo mencionado anteriormente, la resistencia proyectada a los 28 días era de 21 MPa. Sin embargo, este valor fue superado a los 14 días, según los resultados el hormigón alcanza una resistencia a la compresión promedio de 24.04 MPa.

La tabla 1 presenta los valores promedios de la resistencia a la compresión del hormigón obtenidos a partir de los ensayos realizados, utilizando la Norma ASTM C-39.

Análisis experimental comparativo entre una viga armada con PRFV y con acero de refuerzo

Tabla 1. Resumen de resultados de ensayo a compresión del hormigón a los 7, 14 y 28 días

	Lectura de Maquina (kN)	Resistencia de las probetas (Mpa)
7 días	163.73	20.85
	136.98	17.44
	120.30	15.32
	Promedio	17.87
14 días	175.73	22.37
	188.62	24.02
	166.10	21.15
	Promedio	22.51
28 días	191.65	24.40
	186.14	23.70
	188.71	24.03
	Promedio	24.04

b. Cálculos analíticos

Según lo establecido en el apartado de métodos y materiales de este documento, la viga posee los criterios geométricos normativos, considerando parámetros esenciales. Estas especificaciones se han definido conforme a las disposiciones del Código Ecuatoriano de la Construcción, en referencia a los lineamientos del ACI 318.

Tabla 2. Consideraciones geométricas de las vigas

Nombre	Nomenclatura	Dimension
Base	(b)	0.20 m
Altura	(h)	0.30 m
Longitud	(L)	2.00 m
Luz libre	(Ln)	1.80 m
Recubrimiento	(r)	0.04 m

• **Resultados esperados de la viga estándar**

La altura útil d se define como la diferencia entre la altura total de la viga h y el recubrimiento libre r más la mitad del diámetro de la barra de refuerzo empleada, expresándose en la Ecuación (1):

$$d = h - r - \frac{\emptyset}{2} \quad (1)$$

$$d = 0,3 \text{ m} - 0,04 \text{ m} - \frac{0,012 \text{ m}}{2} = 0,254 \text{ m}$$

Análisis experimental comparativo entre una viga armada con PRFV y con acero de refuerzo

El diseño de la viga de hormigón armado, la cual incorpora en la zona de tracción tres varillas de acero corrugado de 12 mm ($\emptyset 12 \text{ mm} = 1,131 \text{ cm}^2$).

$$A_s = N_{\text{varillas}} * A_{s\text{-varillas}} \quad (2)$$

$$A_s = 3 * 1,131 \text{ cm}^2 = 3,393 \text{ cm}^2$$

Para determinar el valor de β_1 , el código ACI-318-19 indica que para resistencias de hormigón entre $17 \text{ MPa} < f'_c < 28 \text{ MPa}$, se emplea el valor tomado de la Tabla 22.2.2.4.3 del código citado; donde $\beta_1 = 0,85$.

Para estimar la carga máxima probable que la viga puede soportar, se determina el momento flector probable de la viga. La altura del bloque de compresión se determina mediante la Ecuación (3):

$$a = \frac{1,25 * A_s * F_y}{0,85 * f'_c * b} \quad (3)$$

$$a = \frac{1,25 * 0,0003393 \text{ m}^2 * 420 \text{ MPa}}{0,85 * 24,04 \text{ MPa} * 0,20 \text{ m}} = 0,04359 \text{ m}$$

Una vez calculada la altura del bloque de compresión, se procede a determinar el valor del momento probable teórico de la viga, este se obtiene usando la Ecuación (4):

$$M_{pr} = 1,25 * A_s * F_y * \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (4)$$

$$M_{pr} = 1,25 * 0,0003393 \text{ m}^2 * 420 \text{ MPa} * \left(0,254 \text{ m} - \frac{0,04359 \text{ m}}{2} \right) = 41,363 \text{ kN} * \text{m}$$

Se logra calcular la carga P en función del Momento Probable.

$$P = \frac{4 * M_{pr}}{L_n} \quad (5)$$

$$P = \frac{4 * 41,363 \text{ kN} * \text{m}}{1,80 \text{ m}} = 91,917 \text{ kN}$$

- **Cálculos analíticos de una viga únicamente con PRFV**

Dado que el cálculo analítico de una viga compuesto por refuerzos de distintos materiales resulta altamente complejo debido a las diferencias en sus propiedades mecánicas, el cálculo se simplificará asumiendo que la viga cuenta exclusivamente con dos varillas de PRFV en la zona de tracción. Para este análisis, se considerará un límite de fluencia de 1100 MPa. La altura útil d se calcula de la siguiente manera:

$$d = h - r - \frac{\emptyset}{2} \quad (1)$$

$$d = 0,3 \text{ m} - 0,04 \text{ m} - \frac{0,010 \text{ m}}{2} = 0,255 \text{ m}$$

Análisis experimental comparativo entre una viga armada con PRFV y con acero de refuerzo

Es importante señalar que para realizar la comparación de la viga de hormigón con armado mixto se realizara el cálculo analítico de una viga con refuerzo de PRFV está condicionada por el diseño de la viga de hormigón armado, la cual incorpora en la zona de tracción dos varillas de 10 mm ($\emptyset 10 \text{ mm} = 0,7854 \text{ cm}^2$).

$$A_s = N_{\text{varillas}} * A_{s-\text{varillas}} \quad (2)$$

$$A_s = 2 * 0,7854 \text{ cm}^2 = 1,571 \text{ cm}^2$$

Para determinar el valor de β_1 , el código ACI-318-19 indica que para resistencias de hormigón entre $17 \text{ MPa} < f_c' < 28 \text{ MPa}$, se emplea el valor tomado de la Tabla 22.2.2.4.3 del código citado; donde $\beta_1 = 0,85$.

Para estimar la carga máxima probable que la viga puede soportar, se determina el momento flector probable de la viga. La altura del bloque de compresión se determina mediante la siguiente ecuación (3):

$$a = \frac{1,25 * A_s * F_y}{0,85 * f_c' * b} \quad (3)$$

$$a = \frac{1,25 * 0,0001571 \text{ m}^2 * 1100 \text{ MPa}}{0,85 * 24,04 \text{ MPa} * 0,20 \text{ m}} = 0,0529 \text{ m}$$

Una vez calculada la altura del bloque de compresión, se procede a determinar el valor del momento probable teórico de la viga, para esto utilizamos la ecuación (4):

$$M_{pr} = 1,25 * A_s * F_y * \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (4)$$

$$M_{pr} = 1,25 * 0,0001571 \text{ m}^2 * 1100 \text{ MPa} * \left(0,255 \text{ m} - \frac{0,0529 \text{ m}}{2} \right) = 49,368 \text{ kN} * \text{m}$$

Se logra calcular la carga P en función del Momento Probable.

$$P = \frac{4 * M_{pr}}{L_n} \quad (5)$$

$$P = \frac{4 * 49,368 \text{ kN} * \text{m}}{1,80 \text{ m}} = 109,707 \text{ kN}$$

c. Ensayo a flexión de vigas de hormigón reforzadas con As y PRFV

Las vigas denominadas V-As y V-AsyPRFV fueron sometidas a un ensayo con aplicación de carga progresiva. La adquisición de datos se configuró para registrar tres muestras por segundo, permitiendo un monitoreo detallado del comportamiento estructural. Durante el ensayo, se identificó la aparición y propagación de fisuras, mientras que los desplazamientos fueron medidos mediante transductores

Análisis experimental comparativo entre una viga armada con PRFV y con acero de refuerzo

LVDT y las deformaciones se registraron con strain gauges. Para garantizar la precisión y almacenamiento de la información, se utilizó un sistema Datalog, encargado del procesamiento y gestión de los datos obtenidos.

- **Ensayo de la viga V-As**

En la Figura 4 podemos observar el diagrama de Carga – Desplazamiento donde el ensayo de la viga V-As evidencia un comportamiento elástico hasta alcanzar una carga de 88,94 kN. A partir de este punto, el LVDT, dispositivo encargado de medir los desplazamientos en el centro de la viga, detecta la formación de la primera fisura, reflejada en una ligera disminución de la carga a 87,76 kN, con un desplazamiento de 8,86 mm. Conforme se incrementa la carga, se observa un aumento progresivo en el desplazamiento y la aparición de nuevas fisuras, hasta alcanzar la carga máxima de 98,99 kN, asociada a un desplazamiento de 18,53 mm. Posteriormente, tras alcanzar su carga máxima, se evidencia una disminución a 89,55 kN, mientras el desplazamiento continúa en aumento. En esta fase, la carga logra recuperarse hasta 92,28 kN, marcando el inicio del endurecimiento del material, fenómeno que indica un cambio en su comportamiento estructural y una tendencia al colapso. Finalmente, la carga desciende hasta 58,42 kN, con un desplazamiento máximo registrado de 93,988 mm.

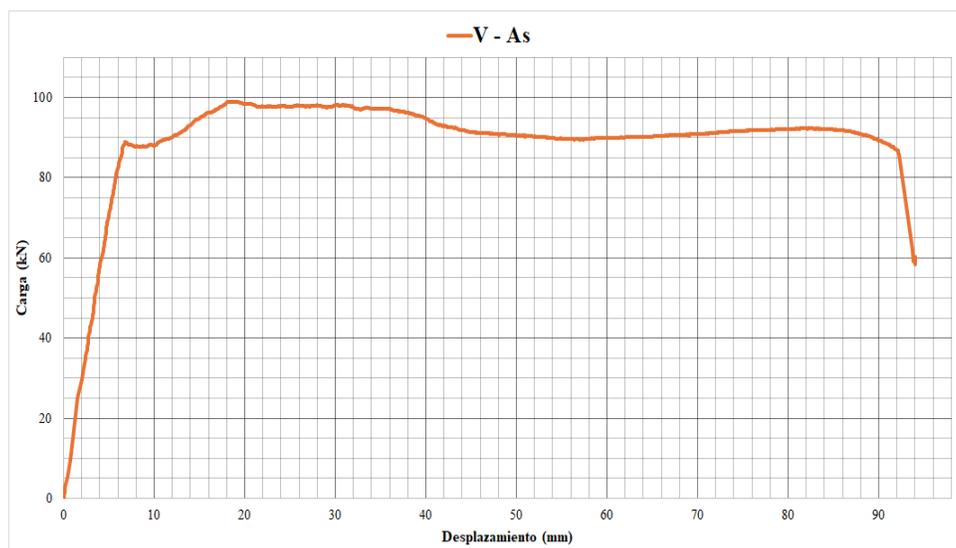


Figura 4. Comportamiento de la viga denominada V - As ante carga puntual progresiva

La deformación máxima registrada por el strain gauge a través del sistema Datalog fue de 0.0096054. No obstante, por razones prácticas, solo se presentará la curva carga-deformación hasta la obtención

Análisis experimental comparativo entre una viga armada con PRFV y con acero de refuerzo

de la carga máxima. Durante los primeros 20 segundos del ensayo, no se evidenciaron atribuibles a flexión o esfuerzo cortante. Sin embargo, posterior a este punto, comenzaron a formarse fisuras por flexión. En este estado, a los 39 segundos del ensayo, se registró la carga máxima de 98.99 kN, con una deformación correspondiente de 0.0011422, evidenciando el comportamiento estructural de la viga bajo condiciones de carga progresiva, como podemos observar en la figura 5.

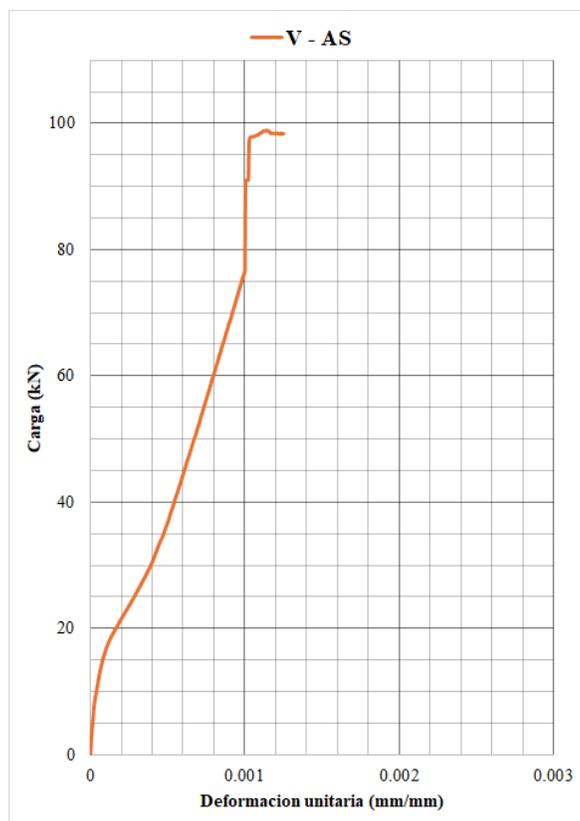


Figura 5. Curva carga-deformación del acero de refuerzo en la viga V – As

- **Ensayo de la viga V-AsyPRFV**

En la Figura 6 podemos observar el diagrama de Carga – Desplazamiento, el ensayo de la viga V-AsyPRFV evidencia un comportamiento elástico hasta alcanzar una carga máxima de 119,83 kN, asociada a un desplazamiento de 45,101 mm. A partir de este punto se refleja una disminución de la carga a 98,01 kN, con un desplazamiento de 47,765 mm. Conforme se incrementa la carga, se observa un aumento progresivo en el desplazamiento y la aparición de nuevas fisuras tanto a flexión como a cortante, hasta alcanzar un nuevo aumento de carga de 107,39 kN, asociada a un desplazamiento de 50,114 mm. Posteriormente, se evidencia una disminución a 73,24 kN, mientras el desplazamiento

Análisis experimental comparativo entre una viga armada con PRFV y con acero de refuerzo

continúa en aumento. En esta fase, la carga logra recuperarse hasta 82,93 kN, marcando el inicio del endurecimiento del material, fenómeno que indica un cambio en su comportamiento estructural y una tendencia al colapso. Finalmente, la carga desciende hasta 33,47 kN, con un desplazamiento máximo registrado de 65,566 mm.

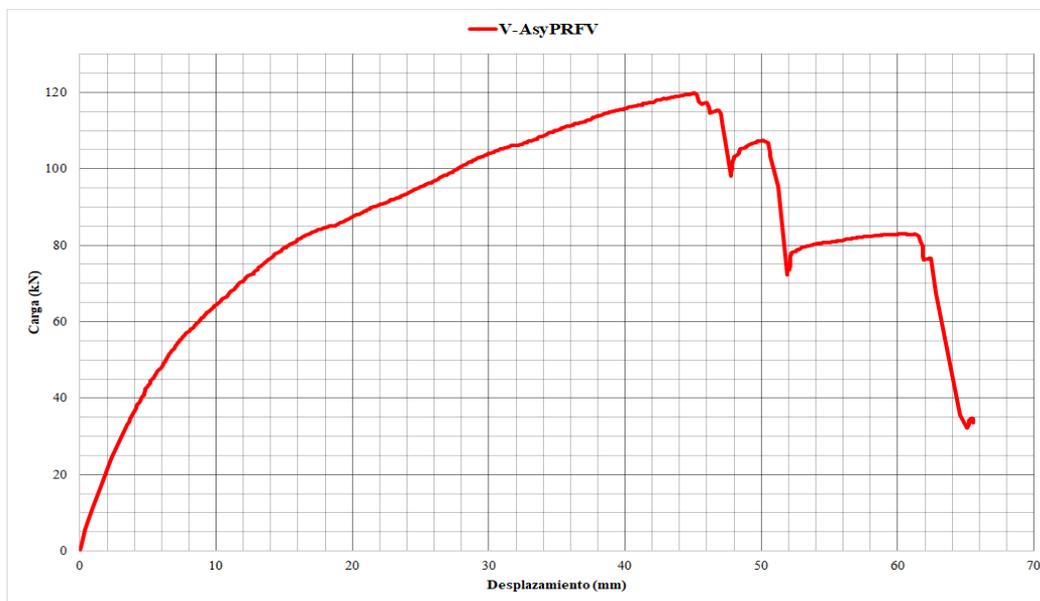


Figura 6. Comportamiento de la viga denominada V – AsyPRFV ante carga puntual progresiva

La deformación máxima registrada por el strain gauge a través del sistema Datalog fue de 0.0093076. No obstante, por razones prácticas, solo se presentará la curva carga-deformación hasta que se obtuvo la carga máxima. Durante los primeros 17 segundos del ensayo, no se evidenciaron fisuras atribuibles a flexión o esfuerzo cortante. Sin embargo, posterior a este punto, comenzaron a formarse fisuras por flexión y después por cortante. La carga máxima registrada ocurre a los 107 segundos alcanzó un valor de 119,83 kN, con una deformación de 0.0093076 medida por el strain gauge. En la gráfica se observa que, a partir de una carga de 112.37 kN, la varilla de PRFV deja de experimentar deformaciones. No obstante, la carga continúa incrementándose hasta alcanzar el valor máximo, posterior a esto se produce un descenso abrupto respecto a la carga aplicada.

Análisis experimental comparativo entre una viga armada con PRFV y con acero de refuerzo

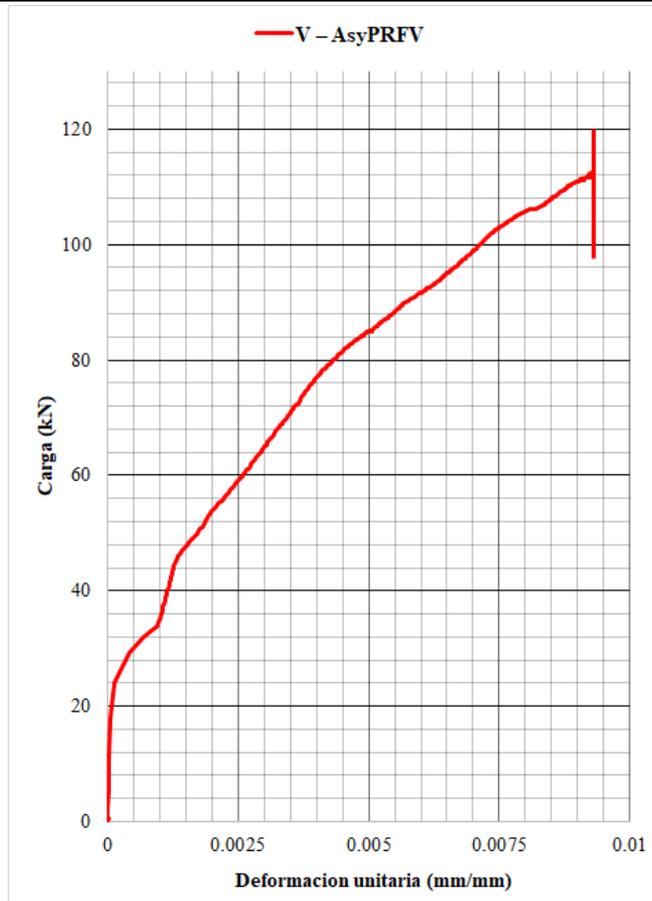


Figura 7. Curva carga-deformación del PRFV de refuerzo en la viga V – AsyPRFV

d. Reporte de resultados de los ensayos realizados

- Reporte de resultados de la viga estándar**

En la Tabla 3 se muestran los resultados de la carga máxima, desplazamiento y deformaciones de las vigas de hormigón estándar.

Tabla 3. Resultados del ensayo a flexión durante la carga máxima de la viga de hormigón reforzadas con acero corrugado

	Carga (kN)	Desplazamientos (mm)	Deformacion del refuerzo de acero a tracción
Viga de Hormigon reforzada con acero corrugado, V-As	98.99	-18.153	0.0011422

Análisis experimental comparativo entre una viga armada con PRFV y con acero de refuerzo

• **Reporte de resultados de la viga de hormigón con armado mixto**

En la Tabla 4 se muestran los resultados de la carga máxima, desplazamiento y deformaciones de la viga de hormigón con armado mixto.

Tabla 4. Resultados del ensayo a flexión durante la carga máxima de la viga de hormigón reforzada con acero corrugado y con PRFV

	Carga (kN)	Desplazamientos (mm)	Deformación del refuerzo de FRPV a tracción
Viga de Hormigón reforzada con PRFV y acero corrugado, V-AsyPRFV	119.83	-45.101	0.009308

Análisis y discusión de los resultados

Durante el ensayo de flexión, la viga de hormigón con refuerzo mixto identificada como V-AsyPRFV alcanzó una resistencia máxima de 119,83 kN, mostrando una capacidad de carga superior en comparación con la viga estándar, cuya resistencia fue de 98,99 kN. Este incremento en la capacidad portante puede atribuirse a una alta resistencia a tracción del PRFV en comparación con el acero.

Sin embargo, la viga de hormigón reforzada con una combinación de PRFV y acero corrugado presentó una deflexión máxima de 45,101 mm, significativamente mayor que la de la viga reforzada únicamente con acero corrugado, cuya deflexión promedio fue de 18,195 mm. Esta diferencia se debe al bajo módulo de elasticidad del PRFV (55000 MPa), el cual es aproximadamente cuatro veces inferior al del acero (200000 MPa). En consecuencia, la viga de hormigón con armado mixto alcanza su carga máxima con una deflexión que casi triplica la deformación registrada en su homóloga con refuerzo exclusivo de acero corrugado.

Análisis experimental comparativo entre una viga armada con PRFV y con acero de refuerzo

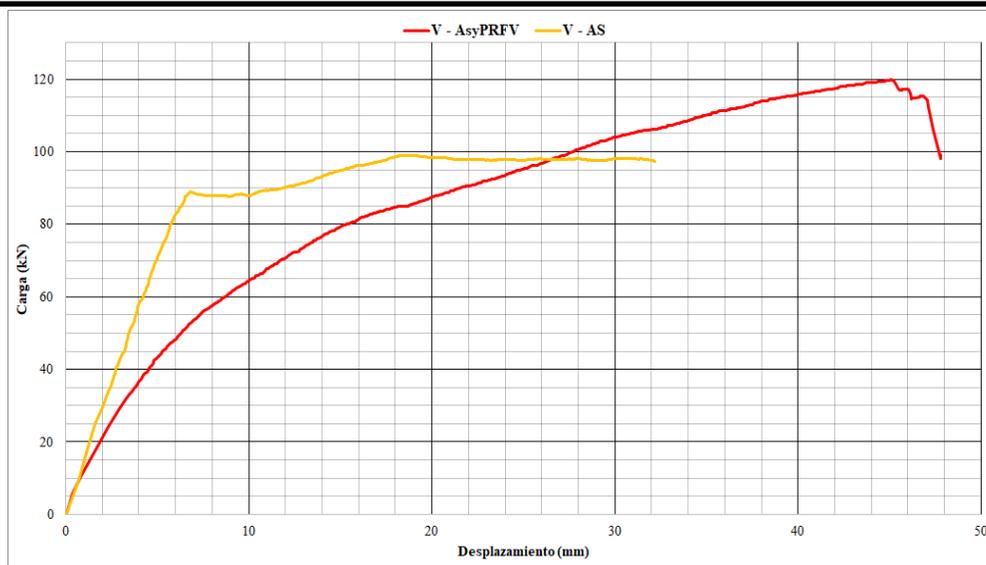


Figura 8. Gráfico comparativo de Carga vs. Desplazamiento para las vigas ensayadas

La viga de hormigón reforzada con acero corrugado y PRFV, presentaron la falla flexión-cortante, originada principalmente por las grietas a flexión que se extendieron en el centro de la zona traccionada de la viga y posteriormente provocando fisuras de cortante en esta misma zona, estas grietas fueron producidas debido a que el acero no pudo soportar la cargas a cortante produciendo una falla abrupta. En las vigas de referencia, se observó la falla en la zona traccionada, presentando grietas considerables a flexión. Este tipo de fallas se produce especialmente en elementos esbeltos, de gran peralte donde el refuerzo a tracción trabaja de modo tal, que el hormigón supera su límite elástico y generan grietas a lo largo de la viga. García & Tumbaco, (2024).

Los resultados esperados para la viga reforzada con acero en comparativa con los resultados que se obtuvieron mediante el ensayo tienen una precisión de 7,14 %. Para la viga de hormigón con armado mixto no se puede realizar esta comparativa debido a las diferencias de armado.

Conclusiones

Se verificó que la viga de hormigón reforzadas con PRFV y acero de refuerzo exhibieron una resistencia a flexión un 17,4 % superior y un desplazamiento un 59,75 % mayor en comparación con la viga estándar, compuesta únicamente por refuerzo de acero. Conforme a los registros de desplazamiento obtenidos mediante el LVDT, la deformación de la viga de hormigón con armado mixto con refuerzo combinado de PRFV y acero podría reducirse al incrementar la cuantía del refuerzo, con el objetivo de igualar el módulo de elasticidad del acero. No obstante, esta estrategia

Análisis experimental comparativo entre una viga armada con PRFV y con acero de refuerzo

implicaría una problemática constructiva, ya que disminuiría el espaciamiento entre las varillas de refuerzo, afectando la viabilidad del diseño estructural.

Tabla 5. Resultados Obtenidos mediante los ensayos y cálculos analíticos

	Carga (kN)	Desplazamiento (mm)	%Carga	% Desplazamiento
Viga de Hormigon reforzada con PRFV y acero corrugado, V-AsyPRFV	119.83	-45.101	17.39%	59.75%
Viga de Hormigon reforzada con acero corrugado, V-As	98.99	-18.153		
Viga de Hormigon reforzada con dos varillas de PRFV (Teórica)	109.707			

Se corroboró que la carga máxima registrada durante el ensayo de flexión de la viga de hormigón con armado mixto superó en un 8,45 % la capacidad de carga teórica de una viga reforzada únicamente con dos varillas de PRFV en la zona de tracción, de acuerdo con los cálculos analíticos presentados en el apartado B.2.

Se debe considerar que la viga de hormigón con armado mixto presentó un 63,55 % más de tiempo requerido para alcanzar la carga máxima y entrar en estado de colapso en comparación con la viga estándar. Este comportamiento evidencia una mayor capacidad de disipación de energía, propiedades fundamentales en el diseño de estructuras sismorresistentes. Estas características son esenciales para garantizar una respuesta estructural más favorable ante cargas dinámicas inducidas por movimientos sísmicos.

Se ha comprobado que el PRFV es un material con una adherencia comparable a la del acero, pero con un módulo de elasticidad reducido. Esta propiedad lo hace viable para su uso como refuerzo en diversas estructuras, dado que es inmune a la corrosión. Para su aplicación óptima, se recomienda emplear una cuantía adecuada que prevenga desplazamientos excesivos y garantice el cumplimiento de las normativas vigentes.

Recomendaciones

Se recomienda considerar métodos alternativos para medir desplazamientos, ya que, aunque el LVDT es muy preciso, su alto costo y fragilidad limitan su uso. Existen tecnologías emergentes que podrían ofrecer precisión similar con menor costo y mayor resistencia.

Para futuros ensayos, se recomienda la aplicación de la cuantía máxima en las vigas a evaluar, con el objetivo de caracterizar con mayor precisión las propiedades mecánicas intrínsecas del material en estudio. Esta metodología permitirá obtener datos más representativos sobre su desempeño estructural bajo condiciones de carga y deformación controladas. Además, los resultados obtenidos en este experimento abren una línea de investigación para el análisis del comportamiento conjunto del PRFV y el acero corrugado, considerando que la aplicación de una cuantía balanceada de ambos materiales podría optimizar la capacidad de refuerzo estructural en distintos tipos de construcciones sismorresistentes.

Referencias

1. ACI 318. (2019). Requisitos de Reglamento para concreto estructural [Norma].
2. ACI 440. (2015). Guide Test Methods for Fiber – Reinforced Polymer (FRP) Composites for Reinforcing or Strengthening Concrete and Masonry Structures [Norma].
3. 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
4. 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
5. Barnuevo, W. (2020). Mejora del comportamiento de elementos estructurales utilizando varillas de fibra de vidrio”: Una revisión de la literatura científica [Tesis]. Universidad Privada del Norte.
6. Bautista Benalcazar, Brayner Andrés; Inca Encarnación, Danilo Sebastián (2023). Estudio comparativo entre estructuras de hormigón armado y acero para edificaciones de 4 pisos para centros educativos en la provincia de Santa Elena. La Libertad. UPSE, Matriz. Facultad de Ciencias de la Ingeniería. 135p.

Análisis experimental comparativo entre una viga armada con PRFV y con acero de refuerzo

7. García, J., & Tumbaco, I. (2024). Análisis de vigas de hormigón reforzado con acero convencional y varillas de polímero reforzado con fibra de vidrio (prfv) sometidas a esfuerzos de flexión [Tesis]. Universidad Técnica de Manabí.
8. GangaRao, H. V., Taly, N., & Vijay, P. V. (2006). Reinforced concrete design with FRP composites. CRC press.
9. Hurtado de Barrera, J. (2010). Metodología de la investigación: Guía para una comprensión holística de la ciencia (4ta ed.). Caracas, Venezuela: Quirón Ediciones.
10. Lalvay. (2017). Análisis, comportamiento y comparación de varilla corrugadas de fibra de vidrio con relación a las varillas convencionales; conjuntamente en elementos estructurales de hormigón [Tesis]. Universidad del Azuay.
11. Morales, J., Fernandez, H., & Perara, R. (2019). Comportamiento estructural a flexión de vigas de hormigón armado con barras de acero y polímeros reforzados con fibra de vidrio. Materiales de construcción.
12. 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.-NECSE-HM-Hormigon-Armado.pdf>
13. Poma, C. (2021). Análisis Comparativo de vigas Reforzadas con Varillas de Fibra de Vidrio y Reforzadas con Acero [Tesis, Universidad César Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/59381>
14. Sánchez, H., Reyes, C. y Mejía, K. (2018). Manual de términos en investigación científica, tecnológica y humanística. Lima, Perú: Universidad Ricardo Palma, Vicerrectorado de Investigación. Obtenido de <http://repositorio.urp.edu.pe/handle/URP/1480>
15. Sánchez, J. (2020). Resistencia real, última garantizada y resistencia de diseño del polímero reforzado con fibra de vidrio (PRFV). ResearchGate, 47.
16. Sánchez, J., & Aguilar, J. (2022). Evaluación comparativa de vigas reforzadas mediante armaduras electrosoldadas y varillas de PRFV. Espacio I+D, Innovación más desarrollo, 11(30), 94-106. <https://doi.org/10.31644/IMASD.30.2022.a06>
17. Sánchez, J., Aguilar, J., & Jara, M. (2021). Evaluación del comportamiento de vigas de concreto reforzadas y subreforzadas con varillas de PRFV. Espacio I+D, Innovación más desarrollo, 10(26), 89-101. <https://doi.org/10.31644/IMASD.26.2021.a04>

Análisis experimental comparativo entre una viga armada con PRFV y con acero de refuerzo

18. Torres, A., & Martínez, M. (2001). Diseño de estructuras de concreto con criterios de durabilidad. Secretaria de Comunicaciones y Transportes Instituto Mexicano del Tra

©2025 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/>).