

## Análisis experimental a flexión de vigas de concreto reforzado con fibras de acero

Jonnathan Molina<sup>1\*</sup>, Pilar Naspud-Uruchima<sup>1,2</sup>, Xavier Nieto-Cardenas<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Católica de Cuenca, Cuenca, Ecuador.

<sup>2</sup> Grupo de Investigación: Construcción y Estructuras con Responsabilidad – CER- GI24-19.

\*Autor para correspondencia /corresponding author: [jonnathan0908@gmail.com](mailto:jonnathan0908@gmail.com)

## Experimental flexural analysis of steel-fiber-reinforced concrete beams

### Resumen

El uso de fibras de acero en el hormigón ha sido ampliamente documentado en diversas obras de ingeniería debido a las ventajas que ofrece en términos de resistencia, control de fisuración y capacidad de absorción de energía. Sin embargo, en Ecuador aún existe un conocimiento limitado entre los profesionales de la construcción sobre sus propiedades y beneficios estructurales. La presente investigación surge de la necesidad de superar las limitaciones inherentes del hormigón convencional, particularmente en su comportamiento post-elástico y en su respuesta frente a la fisuración. Este artículo presenta los resultados de un estudio experimental en el que se diseñaron mezclas de concreto con una resistencia nominal de 24 MPa y se evaluó el comportamiento a flexión de cuatro tipologías de vigas: concreto simple, concreto con adición de fibras de acero, concreto armado convencional y concreto con doble sistema de refuerzo (fibras de acero y varillas). Se ensayaron doce especímenes bajo carga estática, basados en el procedimiento establecido en la norma ASTM C1609. Los resultados evidencian que una adecuada combinación de cemento, agregados y una dosificación de fibras equivalente al 0.56 % en volumen permite incrementar la resistencia última a flexión en un 33.63 % en vigas de concreto simple y en un 12.85 % en vigas de concreto armado. Asimismo, se observa un aumento significativo en la ductilidad, con incrementos del 187.23 % en vigas de concreto simple y del 38.02 % en vigas de concreto reforzado. Los hallazgos demuestran la efectividad de la incorporación de fibras en elementos estructurales sometidos a flexión, evidenciándose mejoras a nivel mecánico y estructural. La presencia de fibras favorece una distribución más uniforme de esfuerzos, reduce las demandas en el refuerzo longitudinal a tracción y permite un aprovechamiento más eficiente de las barras de acero, lo que se traduce en un incremento de la capacidad de carga para secciones equivalentes a las del hormigón armado convencional. Adicionalmente, se confirma una mayor capacidad de absorción de energía y una reducción significativa en el ancho de las grietas.

**Palabras clave:** Hormigón reforzado con fibras de acero, comportamiento a la flexión, control de fisuras, ASTM C1609, ASTM C39.

### Abstract

The use of steel fibers in concrete has been widely documented in numerous engineering applications due to the advantages they provide in terms of strength,



Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /  
Edited by:  
Eva O.L. Lantsoght

Recibido /  
Received:  
05/10/2025

Aceptado /  
Accepted:  
29/12/2025

Publicado en línea /  
Published online:  
22/05/2026



crack control, and energy absorption capacity. However, in Ecuador, there is still limited knowledge among construction professionals regarding their structural properties and benefits. This research arises from the need to overcome the inherent limitations of conventional concrete, particularly in its post-elastic behavior and its response to cracking. This paper presents the results of an experimental study in which concrete mixtures with a nominal compressive strength of 24 MPa were designed, and the flexural behavior of four beam typologies was evaluated: plain concrete, steel fiber-reinforced concrete, conventional reinforced concrete, and concrete with a dual reinforcement system (steel fibers and reinforcing bars). Twelve specimens were tested under static loading following the procedure established in ASTM C1609. The results show that an appropriate combination of cement, aggregates, and a fiber dosage of 0.56 % by volume increases the ultimate flexural strength by 33.63 % in plain concrete beams and by 12.85 % in reinforced concrete beams. A significant improvement in ductility was also observed, with increases of 187.23 % in plain concrete beams and 38.02 % in reinforced concrete beams. The findings demonstrate the effectiveness of incorporating steel fibers in structural elements subjected to flexure, showing improvements at both mechanical and structural levels. The presence of fibers promotes a more uniform stress distribution, reduces tensile demands on longitudinal reinforcement, and enables more efficient utilization of reinforcing bars, resulting in increased load-carrying capacity for sections equivalent to those of conventional reinforced concrete. Additionally, enhanced energy absorption capacity and a significant reduction in crack width were confirmed.

**Keywords:** Steel fiber reinforced concrete, flexural behavior, crack control, ASTM C1609, ASTM C39.

---

## INTRODUCCIÓN

El empleo de fibras en materiales de construcción tiene antecedentes históricos que se remontan a las primeras civilizaciones. En Mesopotamia, por ejemplo, se incorporaban fibras vegetales como la paja para controlar el agrietamiento en elementos de adobe [1]. Esta práctica empírica sentó las bases del concepto moderno de refuerzo disperso. En el caso del hormigón, la incorporación de fibras a la mezcla, análogamente a la adición de agregados o aditivos, busca optimizar su respuesta mecánica y su desempeño estructural, especialmente en términos de control de fisuración, capacidad post-elástica y absorción de energía. Como resultado, se obtiene un material con comportamiento más uniforme, mayor resistencia residual y adecuada trabajabilidad. Este enfoque, que comenzó a desarrollarse a finales del siglo XIX, ha dado lugar a múltiples casos exitosos y diversas aplicaciones reportadas en la literatura [2, 3].

Las fibras de acero (FA) se han consolidado como una solución eficaz para el control del agrietamiento en el concreto. Su desarrollo moderno se remonta a 1918, y desde entonces han experimentado una evolución significativa impulsada por avances científicos y tecnológicos [4]. Ese mismo año, el ingeniero francés Harald Alfsen patentó un procedimiento destinado a incrementar la capacidad resistente a tracción del concreto, el cual consistía en la incorporación uniforme de pequeñas fibras longitudinales de



hierro en la matriz fresca, proponiendo además superficies rugosas y extremos en forma de gancho para mejorar la adherencia.

Posteriormente, en 1920, Jean-Claude Seailles propuso el uso de virutas de acero y fragmentos metálicos como refuerzo disperso, mientras que el ingeniero alemán Adolf Kleinlogel patentó una mezcla con elevado contenido de partículas de hierro, hasta un 50 %, con el objetivo de obtener una masa moldeable con propiedades similares a las del hierro. En 1933, Harry Etheridge, en Estados Unidos, avanzó en la optimización geométrica de las fibras al proponer elementos anulares de distintos diámetros para mejorar la resistencia y la fatiga del concreto en aplicaciones ferroviarias.

Un hito relevante se produjo en 1974, cuando Antoine Elias Naaman patentó una fibra tridimensional conformada por cuatro alambres interconectados, demostrando que una geometría adecuada favorece un anclaje más eficiente y, en consecuencia, una mayor resistencia del material compuesto. Más adelante, en 1999, se desarrollaron fibras poligonales de acero con geometría optimizada, caracterizadas por secciones transversales angulares y capacidad de torsión bajo carga, lo que permitió mejorar la unión mecánica respecto de las fibras tradicionales [1].

Según Naaman [1], la adición de fibras en el hormigón produce efectos diferentes a los de una mezcla de hormigón sin fibras (CS). En cuanto a sus etapas de fabricación, aclara que, en su etapa fresca, estas influyen notoriamente en la pérdida de trabajabilidad, pero en las etapas posteriores, la ganancia de rigidez y endurecimiento tiene enormes ventajas que se ven reflejadas en la respuesta mecánica. Cuando este tipo de fibra es utilizado en el CR se observa que cambia el comportamiento durante la zona de transición entre el acero de refuerzo y la matriz de hormigón, debido a que las fibras permiten que las barras de acero a tracción alcancen posiblemente su resistencia última en elementos a flexión, aumentan la ductilidad del hormigón que está en compresión e incrementan significativamente características de conexión de varillas en diferentes condiciones de carga. Por lo tanto, constituyen una ventaja en cuanto a la conexión entre varillas y concreto, frente a un CR convencional.

El uso de fibras afecta también el proceso de producción y fabricación de cualquier estructura [5, 6, 7]. Stephen y Gettu [8] señalan que la adición de fibras al concreto, al provocar la disminución de la trabajabilidad, puede desencadenar una acción-cambio en el proceso de producción, como la adición de agua, finos o superplastificante, afectando así a las propiedades de la mezcla fresca. Estos cambios alteran las demás propiedades del compuesto en los estados de curado y endurecido, modificando el costo y el rendimiento previsto de la estructura [9]. Si a ello añadimos las posibles combinaciones que existen de CR (pretensado, armado, ferrocemento, etc.), el proyecto global de la estructura se convierte en un verdadero reto.

Un factor importante a considerar es la definición de la cantidad de fibra que se añadirá a la mezcla. Ranjbaran et al. [10] indican que una adición superior al 2 % en fracción de volumen de FA disminuye drásticamente la colocación, manipulación y compactación del concreto fresco, por lo tanto, sugieren volúmenes de FA inferiores al 1 % para obtener mejoras en la respuesta mecánica de especímenes prismáticos.



Con adición de FA de 0.8 %, Başsürücü et al. [11] determinaron que las FA de extremo largo en forma de gancho contribuyen a un excelente comportamiento de resistencia a la flexión. Asimismo, Parvez y Foster [12], estudiaron la adición entre 0.4 % a 0.8 % en fracción de volumen de FA e indicaron que estas cantidades aumentan la resistencia a la fatiga en un 39 % y 40 %, respectivamente. Por otro lado, Sridhar y Prasad [13] ensayaron cilindros de concreto con FA a compresión, y añadieron un volumen igual al 1 %, lo que resultó en un incremento en la capacidad de carga en 12 %.

Las investigaciones globales sobre fibras en el concreto han sido ampliamente estudiadas, pero existen deficiencias críticas, especialmente cuando este tipo de tecnología es trasladada a otros contextos geográficos y a sus respectivos materiales. Gran parte de los estudios se valen de conjuntos de datos que han sido normalizados (diferentes fibras tienen dosificaciones estandarizadas o requeridas) o que corresponden a países/regiones avanzadas. Se ha identificado una deficiencia en la literatura científica que evalúe las propiedades mecánicas del CRF fabricado con materiales pétreos propios de las fuentes ecuatorianas. Estos agregados pueden tener diferentes densidades, capacidades de absorción y granulometría, lo que afecta directamente la matriz y a la interacción con la fibra.

Con el objetivo de aportar al progreso y desarrollo del conocimiento en el ámbito de los materiales y enriquecer el conocimiento de los ingenieros civiles en Ecuador, este artículo estudia experimentalmente el efecto de la adición de FA en el comportamiento estructural de vigas de concreto simple (CS) y concreto reforzado (CR), sometidas a ensayos de flexión basados en la ASTM C1609 [14]. En contraste con las mezclas tradicionales de concreto, elaboradas con un único tipo de cemento y agregados gruesos y finos, se propone un diseño de mezcla de CRF que incorpora variedad de materiales cementantes y agregados con el objetivo de reducir significativamente la porosidad, mejorar la redistribución de esfuerzos y disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub>. Además, se verifica la resistencia a compresión de cada grupo de estudio con elementos cilíndricos conforme a la normativa ASTM C39 [15]. Un total de 12 especímenes prismáticos y 24 cilíndricos se emplean para analizar la variación en la ductilidad, la resistencia, la absorción de energía y los módulos característicos del material.

## Materiales y metodología

### Materiales

Con el propósito de desarrollar un concreto con resistencia nominal de 24 MPa, la dosificación de la mezcla se realiza conforme al método ACI 211 [16]. Se adopta una relación agua/material cementante (A/C) de 0.54 y un contenido promedio de aire ocluido del 1.30 %. Con el fin de optimizar el desempeño mecánico y la compacidad de la matriz, se emplea una combinación de distintos tipos de cementos, agregados gruesos y agregados finos.

En cuanto a los materiales cementantes, se utilizan dos tipos de cemento hidráulico: cemento tipo HE (C1), destinado a proporcionar altas resistencias iniciales, y cemento tipo MH (C2), de moderado calor de hidratación, correspondiente a la línea ECOPlanet® [17]. Ambos cementos cumplen con los requisitos establecidos en la norma ASTM C1157 [18]. El agregado grueso consiste en una combinación de piedra triturada (A1) y piedra redondeada (A2), ambas con tamaño máximo nominal de 19 mm. Para el agregado fino se emplean dos arenas provenientes de fuentes locales, específicamente de Paute (S1) y Santa Isabel (S2), con tamaño máximo nominal de 4.75 mm. La combinación granulométrica tiene como objetivo mejorar la distribución de partículas y reducir la porosidad interna de la mezcla. Además, se utiliza aditivo retardante "Plastiment TM-250" (R) y aditivo plastificante "SIKAMENT N-450" (P), que cumplen con la especificación ASTM C-494 [19].

Se emplea fibra de acero comercial Dramix® 4D [20], incorporada en una fracción volumétrica de 0.56 % respecto al volumen total de la mezcla y dosificada en función del peso del cemento C1. La fibra presenta un diámetro nominal de 0.90 mm (d) y una longitud de 60 mm (L), lo que corresponde a una relación de aspecto  $L/d = 65$ . Posee extremos en forma de gancho y una resistencia a tracción de 1500 MPa. La Figura 1 muestra la geometría y dimensiones de las fibras, así como una representación del volumen de fibra añadido a un cilindro de concreto reforzado con fibras (CRF).

La Tabla 1 presenta la dosificación de los materiales en función del peso del cemento C1. En la fila correspondiente a los componentes, la letra W representa el agua de diseño incorporada a la mezcla de concreto.

**TABLA 1.** Proporciones de los materiales empleados.

Componentes	C1	C2	W	S1	S2	A1	A2	R	P	FA
Relación peso *	1.000	0.398	0.762	0.922	2.094	0.750	3.000	0.019	0.002	0.174
Gravedad específica	3.000	2.990	1.000	2.540	2.590	2.610	2.565	1.100	1.200	7.850

\* La relación de peso se toma con respecto al cemento C1.



**FIGURA 1.** Fibras de acero: **A** Características geométricas de las FA ( $L/d = 65$ ); **B** Volumen de FA añadido a un cilindro de concreto.

## PROCEDIMIENTOS DE MEZCLA

Para la dosificación del concreto, la colocación de los distintos materiales en la mezcladora tiene un impacto significativo, especialmente cuando se añade una fracción volumétrica de fibras específicas. La mezcla de todos los componentes se basa en los estudios de A.E. Naaman [1] y Liao et al. [21]. El proceso de elaboración del concreto se realiza mediante una mezcladora automática, de acuerdo con el siguiente procedimiento: inicialmente, se combinan los materiales secos C1, C2, S1 y S2. Posteriormente, los componentes líquidos W, P y R se incorporan y reservan. En la mezcladora se añade la mezcla seca, y la mezcla líquida se vierte en cuatro etapas distintas, distribuyendo el proceso en porcentajes de 50 %, 25 %, 12.5 % y 12.5 %, respectivamente. Entre cada adición de líquido, se realiza un tiempo de mezclado de 1 minuto para evitar la formación de grumos de pasta. Luego, se procede a incorporar todos los áridos gruesos (A1 y A2), al finalizar, se sigue mezclando por 2 minutos. Seguidamente, se añaden las FA de forma gradual y por partes. Al terminar, se bate por 3 minutos. Concluido este tiempo, se permite que la mezcla repose durante 1 minuto. Finalmente, se realiza un último ciclo de mezclado por 1 minuto para asegurar la homogeneidad del concreto.

Se determina el revenimiento del concreto en laboratorio mediante el método de ensayo ASTM C143 [22]. El diseño de la mezcla considera un asentamiento teórico de 18 centímetros; sin embargo, con la adición de las FA, el valor obtenido fue de 15 centímetros. Por lo tanto, la reducción de la trabajabilidad fue mínima. Posteriormente, la mezcla es colada en moldes para la elaboración de vigas de sección 150 x 150 x 500 mm y cilindros de 100 x 200 mm de diámetro y altura, respectivamente. Para la preparación de muestras (probetas y vigas), se siguió la metodología de acuerdo con la ASTM C31/C31M – 19 [23]. Todas las muestras se curaron dentro de una piscina de curado con agua potable a una temperatura de  $23 \pm 2$  °C durante 28 días. La Figura 2 presenta la mezcla de concreto, el colado en los moldes prismáticos y el curado de vigas y cilindros.



**FIGURA 2.** Fabricación de muestras: **A** Adición de FA. **B** Mezcla de concreto en su etapa fresca. **C** Colado de la mezcla en elementos prismáticos, **D** Curado de los especímenes en agua potable para ensayos destructivos.

## Ensayos destructivos

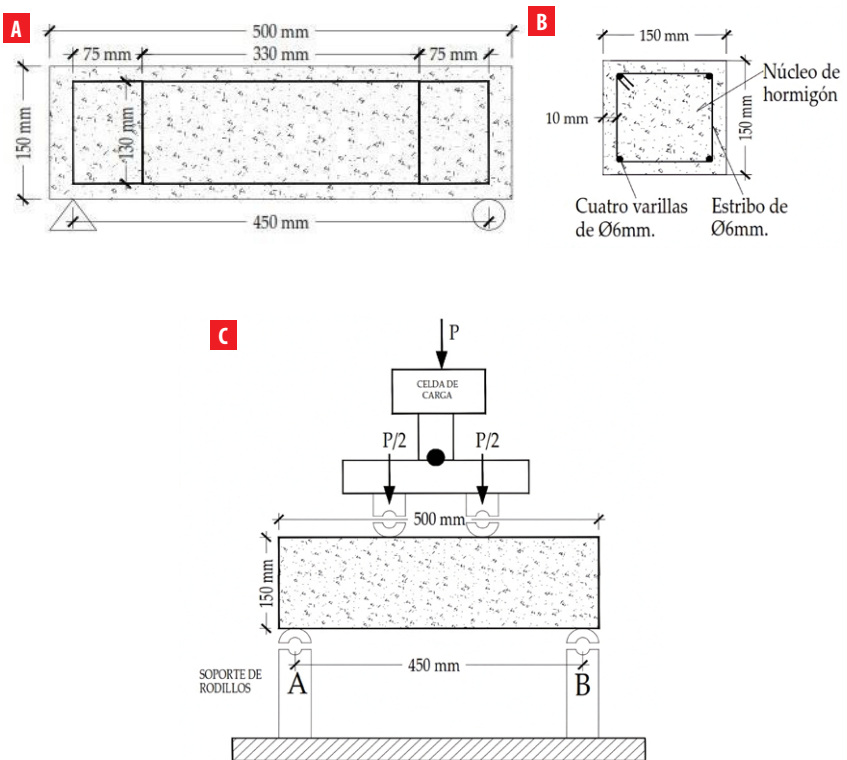
El estudio analiza cuatro configuraciones de vigas: concreto simple o muestras de control (C-B), concreto reforzado con fibras de acero (CRF-B), concreto con armadura interna (C-R-B) y concreto con armadura interna y fibras de acero (CRF-R-B). Para cada grupo se consideran los resultados de tres vigas y seis cilindros.

Las vigas de los grupos C-R-B y CRF-R-B incorporan armadura longitudinal y transversal de acero de 6 mm de diámetro, conforme se ilustra en la Figura 3. La inclusión de este refuerzo tiene como finalidad controlar la ubicación de las fisuras dentro del tercio central del claro, evitando la formación de grietas en los extremos de los especímenes. La presencia de barras longitudinales en la zona de tracción incrementa la capacidad



resistente a flexión y, consecuentemente, genera mayores demandas de esfuerzo cortante en los elementos. Estas fuerzas actúan perpendicularmente al eje longitudinal de la viga y forman parte del comportamiento estructural esperado en elementos reforzados sometidos a carga. Para cada grupo se consideran los resultados de 3 vigas y 6 cilindros. Todos los ensayos se realizan a los 28 días de curado.

Las vigas se evalúan a flexión considerando la especificación ASTM C1609 [14] y los cilindros con lo estipulado en ASTM C39 [15]. La norma ASTM C1609 permite determinar la relación entre la resistencia de flexión y la deflexión de un compuesto de CRF, a una velocidad de carga de 0.1mm/min hasta la falla. Los desplazamientos y respuesta de carga de los elementos prismáticos se determinan a partir de los sensores con los que cuenta la prensa hidráulica de ensayos universal SHIMADZU AG-X plus 300 kN. La Figura 3 presenta el esquema del ensayo a flexión.



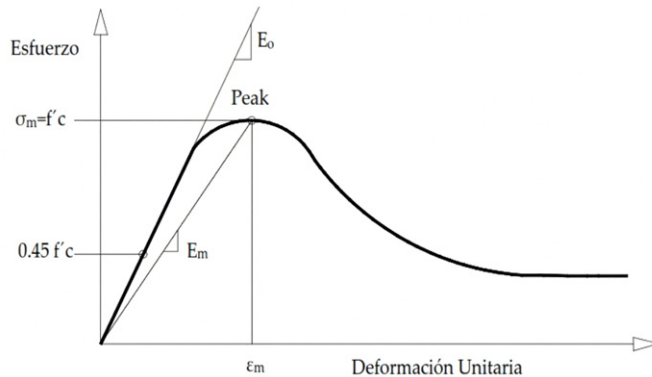
**FIGURA 3.** Esquema de ensayo a flexión: **A** Dimensiones de las vigas y armadura interna de los grupos (C-R-B) y (CRF-R-B), **B** Sección transversal de grupos (C-R-B) y (CRF-R-B), **C** Montaje del ensayo a flexión. Nota: adaptado de Naaman [1].

## ECUACIONES

### Compresión

A partir de la curva esfuerzo – deformación de los ensayos a compresión, se obtiene el esfuerzo máximo de la mezcla de concreto. Además, es posible determinar dos propiedades importantes: el módulo elástico en el origen,  $E_o$ , y el módulo secante en el pico o punto máximo (*peak*),  $E_m$ . El primero, a menudo, se supone igual al módulo secante a un valor de  $0.45f'_c$ , mientras que el segundo ocurre a un valor de esfuerzo igual al esfuerzo máximo ( $f'_c$ ). En su forma más simple, estos módulos representan la relación de un cambio en el esfuerzo inducido por una variación dada en la deformación. Para ambos módulos se siguió la ecuación (1). La Figura 4 indica el concepto de los parámetros  $E_o$  y  $E_m$ .

$$E = \Delta\sigma/\Delta\varepsilon \quad (1)$$



**FIGURA 4.** Módulo  $E_o$  y módulo  $E_m$  en la curva esfuerzo-deformación del concreto. Nota. Adaptado de Naaman [1].

### Flexión

El ensayo de flexión en vigas tiene como objetivo determinar el módulo de ruptura de cada una de ellas. Esta se define como resistencia a flexión,  $f$ , y se determina mediante la ecuación (2).

$$f = \frac{P * L}{b * d^2} \quad (2)$$

Donde  $f$  es la resistencia a flexión (MPa),  $P$  es la carga (kN),  $L$  es la longitud libre de los elementos prismáticos (450mm),  $b$  es el ancho promedio de fractura (150 mm), y  $d$  es la profundidad media del espécimen a la fractura (150 mm).

Adicionalmente, se evalúan los parámetros característicos de la curva carga – deflexión indicados en la ASTM C1609 [14]. Entre ellos: esfuerzo de primer pico ( $f_i$ ), esfuerzo máximo o de pico ( $f_p$ ), carga de primer pico ( $P_i$ ), carga máxima o de pico ( $P_p$ ). Otro



factor importante es el valor de tenacidad,  $T_{150}$ , que es el área total bajo la curva hasta una deflexión igual a  $L/150$  y representa la cantidad de energía que el material puede soportar y se expresa en unidades de energía Julios (J).

A partir del valor de  $T_{150}$ , se calcula el coeficiente de resistencia  $R_{T150}$ , dado por la ecuación (3):

$$R_{T150} = \frac{150 * T_{150}}{f_l * b * d^2} \times 100 \% \quad (3)$$

Donde  $f_l$  se calcula de la ecuación (2) para  $P=P_l$ . El coeficiente de resistencia proporciona una medida de la respuesta posterior a la fisuración en deformaciones mayores al límite elástico. El coeficiente de resistencia ( $R_{T150}$ ) puede definirse a cualquier nivel de deflexión útil o especificado. El coeficiente a  $L/150$  puede ser superior al 100 % para un material endurecido por deflexión, especialmente porque el denominador es el esfuerzo de primer pico (máximo local), que puede ser mucho menor que el esfuerzo pico (máximo global).

Las resistencias residuales  $f_{150,0.75}$  y  $f_{150,3.0}$  se obtienen insertando las cargas  $P_{150,0.75}$  y  $P_{150,3.0}$  correspondientes a una deflexión neta igual a  $L/600$  o 0.75 mm y a  $L/150$  o 3 mm, todo esto con la ecuación (2) para estimar la resistencia a flexión. La tenacidad del espécimen  $T_{150,3.0}$  se define entonces como la energía equivalente al área bajo la curva carga vs. deflexión hasta una deflexión neta de 3 mm. Se tienen en cuenta las medidas de deflexión de  $L/600$  y  $L/150$ , con la finalidad de comparar la capacidad de absorción de energía del material.

En el análisis estructural del concreto se emplean diversas medidas de ductilidad. Generalmente, estas se expresan mediante una relación denominada índice o factor de ductilidad. Este índice puede definirse en términos de curvaturas (para una sección), rotaciones (para un segmento o una junta) o, de deflexiones (para una viga o un pilar), como se muestra en la ecuación (4), donde  $\mu_{\Delta}$  es el índice de ductilidad, y  $\Delta$  es la deformación; el subíndice “y” representa el límite elástico, y “u” representa la deformación límite máxima.

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (4)$$

## RESULTADOS

### Resistencia a la compresión

Las curvas esfuerzo - deformación resultantes de los ensayos a compresión se muestran en la Figura 5 y Figura 6. La Figura 5 expone el grupo de especímenes sin FA, es decir, (C-B) y (C-R-B). Mientras que la Figura 6 muestra la respuesta correspondiente al grupo con FA, es decir, muestras cilíndricas de (CRF-B) y (CRF-R-B). La Tabla 2 presenta los resultados de resistencia máxima a compresión,  $f'_c$ , su variabilidad entre especímenes o desviación estándar (DE), el módulo elástico en el origen,  $E_o$  y el módulo secante en el pico,  $E_m$ , así como los modos de falla según la ASTM C39 [15].

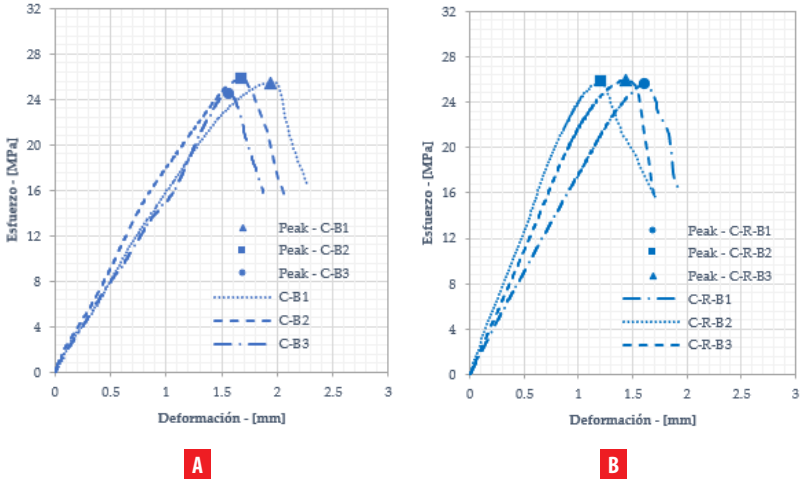


FIGURA 5. Curva esfuerzo vs. deformación: **A** Cilindros del grupo (C-B); **B** Cilindros del grupo (C-R-B).

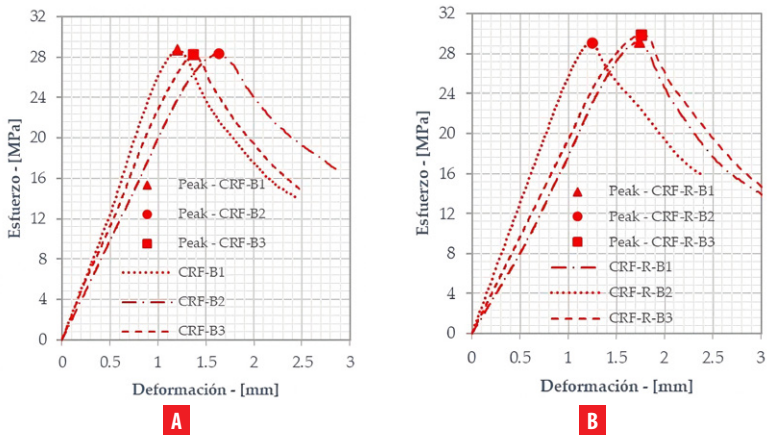


FIGURA 6. Curva esfuerzo vs. deformación: **A** Grupo de concreto con FA (CRF-B); **B** Grupo concreto con FA y reforzado (CRF-R-B).

**TABLA 2.** Resistencia a la compresión.

Código mezcla	C-B	C-R-B	CRF-B	CRF-R-B
Resistencia máxima [MPa] <sup>1</sup>	25.24	25.77	28.43	29.35
Desviación estándar (DE)	0.657	0.171	0.231	0.456
Eo [MPa] <sup>1</sup>	3388	3803	3077	3782
Em [MPa] <sup>1</sup>	2941	3688	4020	4472
<b>Modos de falla <sup>2</sup></b>				
Cilindro 1	3	2	1	2
Cilindro 2	3	3	2	2
Cilindro 3	2	2	2	2

<sup>1</sup> Valor promedio de la resistencia máxima de los tres especímenes ensayados.

<sup>2</sup> Modos de falla de acuerdo a la ASTM C39 [15].

Como se observa en la Tabla 2, la adición de FA en la mezcla de concreto, en fracciones de volumen de 0.56 %, aumentó la resistencia a la compresión en 13.25 %, en promedio. Esto puede explicarse por el hecho de que la incorporación de fibras en la mezcla dificulta la consolidación del elemento cilíndrico, lo que podría conducir a un aumento del aire atrapado. Por esta razón, en el diseño de la mezcla se utilizó un volumen de aire atrapado muy bajo y un asentamiento relativamente alto, evitando los espacios vacíos (oquedad) y permitir de esa forma redistribuir de mejor manera los esfuerzos generados en los ensayos destructivos a compresión.

El CRF presenta un mayor módulo secante en el punto máximo (Em); este es superior, en promedio, en 28.12 % comparado con el concreto convencional (C-B y C-R-B). Al tener un mayor Em, el material es más rígido y menos deformable ante una carga aplicada; por ende, las vigas con FA experimentarán una menor deflexión bajo carga y serán más resistentes a la formación de grietas.

El modo de falla común en el ensayo de cilindros es de Tipo 2; este hace referencia a un cono bien formado en uno de los extremos y grietas verticales, sin un cono definido del otro extremo [15]. Los grupos con FA, (CRF-B) y (CRF-R-B), demuestran una tendencia a fallar de este modo, mientras que los grupos sin FA, denotan variación.

## Resistencia a la flexión

Las propiedades mecánicas de los especímenes prismáticos, al adicionar la FA en la mezcla, se evalúan a partir de la curva carga vs. deflexión. Las gráficas resultantes se muestran en la Figura 7 (C-B y CRF-B) y en la Figura 8 (C-R-B y CRF-R-B).

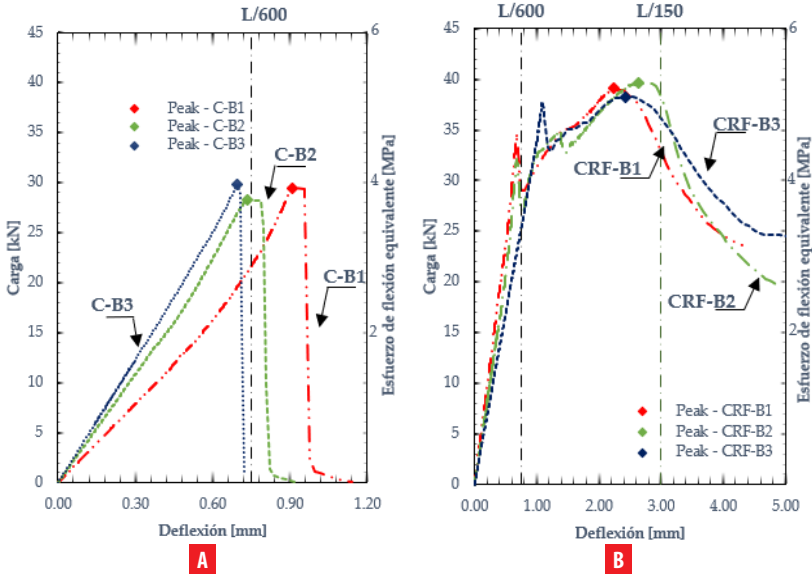


FIGURA 7. Comparación de curvas de carga-deflexión con y sin volumen específico de FA para: **A** Vigas de concreto simple (C-B); **B** Vigas de concreto y FA (CRF-B).

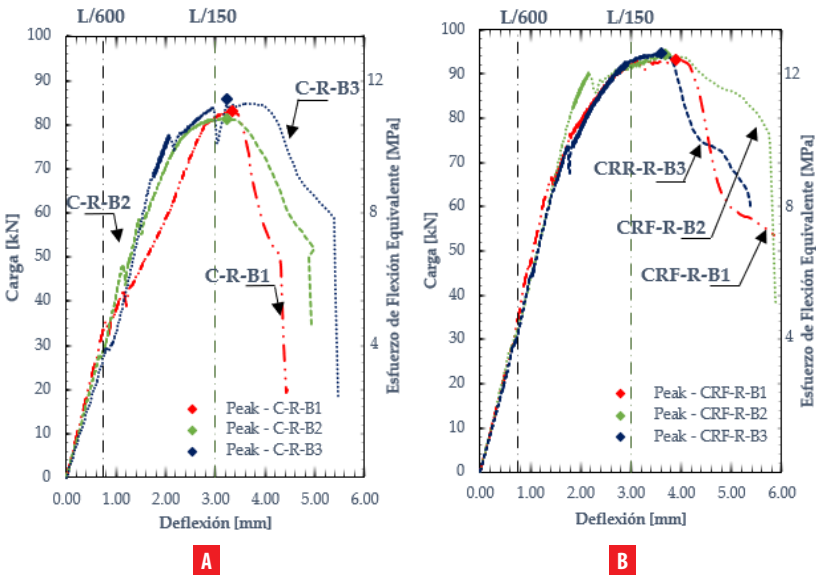


FIGURA 8. Comparación de curvas típicas de carga-deflexión con y sin volumen específico de FA para: **A** Vigas de concreto reforzado (C-R-B); **B** Vigas de concreto reforzado y FA (CRF-R-B).



La adición de FA específica de 0.56 % en función del volumen, incrementa las propiedades de: esfuerzo en la primera fisura, esfuerzo máximo, resistencia residual y, sobre todo, la deflexión. La Tabla 3 presenta los resultados de todos los especímenes ensayados.

**TABLA 3.** Resultados de ensayos a flexión.

Viga	$P_v$ [N]	$P_1$ [N]	$f_1$ [MPa]	$P_p$ [N]	$f_p$ [MPa]	DE <sup>1</sup> [fp]	$P_{150,0.75}$ [N]	$f_{150,0.75}$ [MPa]	$P_{150,3.0}$ [N]	$f_{150,3.0}$ [MPa]	$T_{150,3.0}$ [J]	RT150	$\mu\Delta$
C-B1	14715	29495	3.93	29495	3.93		21670	2.89	-	-	13.54	15.30%	1.21
C-B2	24525	28180	3.76	28256	3.76	0.108	28180	3.76	-	-	12.10	14.31%	1.01
C-B3	15500	29782	3.97	29782	3.97		-	-	-	-	10.46	11.70%	1.09
CRF-B1	20307	34658	4.62	39073	5.21		29297	3.91	32835	4.38	67.51	64.93%	3.30
CRF-B2	21582	32169	4.29	39623	5.28	0.091	27168	3.62	37873	5.05	89.66	92.91%	3.89
CRF-B3	17168	37715	5.03	38272	5.10		25282	3.37	36114	4.82	90.00	79.55%	2.22
C-R-B1	29430	35552	4.74	82955	11.06		33767	4.50	81678	10.89	142.30	133.42%	4.18
C-R-B2	24525	27913	3.72	81360	10.85	0.292	28586	3.81	81098	10.81	155.08	185.20%	4.87
C-R-B3	23544	29225	3.90	85694	11.43		27405	3.65	79863	10.65	154.46	176.25%	4.05
CRF-R-B1	21484	27335	3.64	93218	12.43		34585	4.61	92521	12.34	176.73	215.51%	6.41
CRF-R-B2	23348	27483	3.66	94299	12.57	0.099	32546	4.34	92305	12.31	179.30	217.47%	6.26
CRF-R-B3	20601	28490	3.80	94631	12.62		31244	4.17	92930	12.39	171.17	200.43%	5.43

<sup>1</sup> Desviación Estándar (DE) de la resistencia máxima de los tres especímenes ensayados ( $f_p$ ).

La capacidad de primer pico ( $P_1$ ) no muestra una tendencia monótonica con el incremento del nivel de refuerzo. Mientras que las vigas de control (C-B) registran valores entre 28.18 kN y 29.78 kN, el grupo CRF-B presenta los valores más elevados de  $P_1$ , alcanzando hasta 37.72 kN. Las vigas con armadura interna (C-R-B) y aquellas con armadura y fibras (CRF-R-B) presentan valores iniciales más dispersos y, en algunos casos, inferiores a los del grupo CRF-B. Este comportamiento sugiere que la incorporación exclusiva de fibras mejora la resistencia asociada al primer agrietamiento, mientras que la presencia de armadura longitudinal redistribuye los esfuerzos desde etapas tempranas, modificando el punto de primer pico.

Al analizar la carga máxima ( $P_p$ ), la influencia del refuerzo estructural es determinante. Las vigas C-R-B alcanzan valores entre 81.36 kN y 85.69 kN, mientras que el grupo CRF-R-B registra las mayores capacidades del estudio, con un máximo de 94.63 kN. En comparación con las vigas de concreto simple (C-B), el incremento promedio de capacidad última es del 222 % en los elementos con armadura y fibras (CRF-R-B). Este resultado evidencia un efecto sinérgico entre el refuerzo longitudinal y el refuerzo disperso, donde las fibras contribuyen al control de fisuración y a la estabilización del comportamiento post-pico, mientras que las barras de acero gobiernan la capacidad resistente global.

La ductilidad ( $\mu\Delta$ ) aumenta considerablemente con la complejidad del refuerzo. Las vigas de control muestran relaciones muy bajas, de 1.01 y 1.21, mientras que las vigas



reforzadas con C-R-B presentan deflexiones/relaciones mucho mayores, que oscilan entre 2.22 y 3.89, es decir, aproximadamente tres veces más. Esto sugiere que las vigas reforzadas son más dúctiles.

Los valores de coeficiente de resistencia ( $RT_{150}$ ) muestran diferencias marcadas entre los diferentes tipos. Las vigas CRF-R-B registran valores entre 200.43 % y 217.47 %, superando claramente a las vigas C-R-B, cuyos valores varían entre 133.42 % y 185.20 %. Este comportamiento confirma que la presencia de fibras mejora significativamente la respuesta residual posterior al primer pico, incluso cuando las diferencias en carga máxima inicial no siempre son proporcionales.

En conjunto, los resultados muestran que la combinación de armadura y fibras no solo incrementa la capacidad resistente, sino que optimiza el comportamiento post-fisuración y la estabilidad estructural bajo cargas monotónicas.

## DISCUSIÓN

Un parámetro importante en el análisis es la carga en la que ocurre la primera fisura del concreto. Se debe considerar que los errores visuales incrementan la posibilidad de no distinguir detalles importantes al iniciar las fisuras en los especímenes. En la Tabla 3 se indica este valor, determinado visualmente al momento del ensayo, y se denomina,  $P_v$ . Si se comparan los valores de  $P_1$  y  $P_v$ , se identifica que la configuración (CRF-B) presenta la mayor variación, con 43.51%, y la menor variación corresponde a (C-R-B), con 16.39 %.

El esfuerzo de primer pico ( $f_i$ ) se incrementa en 36.07 % en las vigas de (CRF-B) con respecto a las vigas (C-B). Mientras que en las vigas (CRF-R-B) existe una reducción del 10.12 % en comparación con las vigas (C-R-B). Si analizamos el efecto del armado interno, este esfuerzo varía en 16.38 % entre los grupos (C-B) y (C-R-B), manteniéndose también la tendencia a reducir el esfuerzo entre (CRF-B) y (CRF-R-B) en 20.37 %.

Con respecto al esfuerzo ( $f_p$ ), la diferencia entre (C-B) y (CRF-B) es del 33.63 %, siendo CRF superior. Mientras que en los elementos reforzados (C-R-B) y (CRF-R-B), las FA producen incremento hasta un 12.85 %. Además, se observa que la inclusión del armado interno incrementa este esfuerzo en 185.9 % y 141.31 %, al comparar (C-B y C-R-B) con (CRF-B y CRF-R-B), respectivamente. Por lo tanto, la presencia de refuerzo de varillas de acero y FA efectivamente incrementa la capacidad de carga a flexión.

El esfuerzo residual  $f_{150,3,0}$ , para las vigas sin refuerzo interno (C-B y CRF-B), muestra que el CRF es superior en un 9.32 %. Cabe señalar que no todas las vigas del grupo (C-B) alcanzan la deflexión de control ( $L/600$ ). Por otro lado, en las vigas reforzadas con varillas (C-R-B y CRF-R-B), el CRF con varillas de acero es superior en un 9.60 %. Además, en los grupos con FA (CRF-B y CRF-R-B) se identifica una variación promedio de 0.74 MPa, es decir, 20.37 %, un valor muy similar a la diferencia observada entre (C-B) y (C-R-B), que corresponde al 19.9 %.

Analizando los esfuerzos residuales  $f_{150,3,0}$ , se observa que todas las muestras del grupo (C-B) fallan antes de la deflexión de control ( $L/150$ ); por lo tanto, al añadir FA, es posible



desarrollar deflexiones mayores, llegando a esfuerzos de 4.8 MPa, en promedio. Entre las vigas reforzadas con varillas (C-R-B y CRF-R-B), el CRF con varillas de acero es superior en un 14.47 %, y si contrarrestamos los grupos con FA (CRF-B) y (CRF-R-B), el esfuerzo incrementa 159.9 %, lo que indica el aporte de las varillas de acero.

El parámetro que experimenta la mayor variación es la absorción de energía . En promedio, las vigas con fibras sin armadura (CRF-B) absorben 6.85 veces más energía que el grupo C-B, evidenciando el efecto del puenteo de fisuras (fiber bridging effect). En contraste, cuando existe armadura longitudinal, el incremento es más moderado: las vigas CRF-R-B presentan aproximadamente 1.17 veces la energía absorbida por las vigas C-R-B. Esta diferencia indica que, en sistemas ya gobernados por refuerzo longitudinal, la contribución adicional de las fibras en términos de absorción de energía es incremental, pero no dominante. De manera similar, el coeficiente de resistencia aumenta 5.74 veces en el grupo CRF-B respecto al concreto simple, mientras que en las vigas con armadura el incremento es del orden de 1.28 veces. Estos resultados confirman que la influencia de las fibras es significativamente mayor en elementos sin armadura interna, donde el comportamiento post-fisuración depende principalmente de la acción de puenteo.

El índice de ductilidad se incrementa sustancialmente con la incorporación de fibras en concreto simple, alcanzando un aumento del 187.23 % al comparar C-B con CRF-B. Sin embargo, en elementos con armadura longitudinal, el incremento es del 38.02 % al comparar C-R-B con CRF-R-B. Este comportamiento sugiere que las fibras potencian principalmente la capacidad de deformación en sistemas frágiles, mientras que en elementos ya reforzados su efecto es complementario.

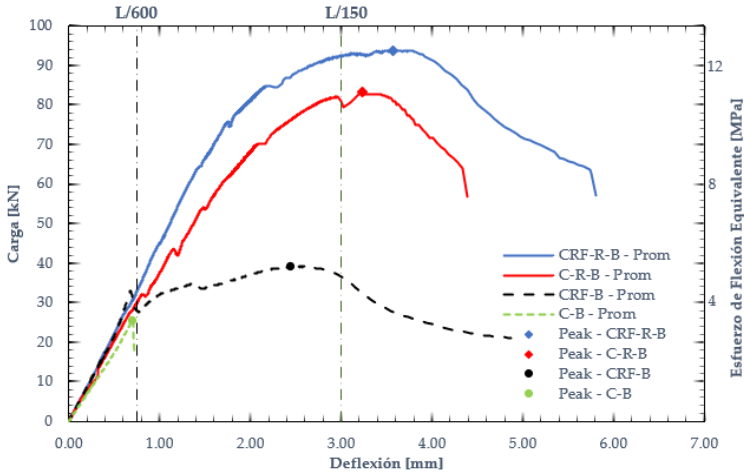
Los elementos sin refuerzo (C-B y CRF-B) soportan una carga máxima (Pp) promedio de 25.46 kN y 39.12 kN, respectivamente, lo que equivale a un incremento del 33.6 %. En cambio, los elementos reforzados con varillas (C-R-B y CRF-R-B) resisten cargas promedio de 83.19 kN y 93.83 kN, es decir, un aumento del 12.9 %. Por lo tanto, las FA permiten que el concreto incremente su resistencia en aproximadamente 10 kN.

La adición de fibras de acero en dosis típicas (entre 0.4 % y 2.0 % del volumen) para elementos estructurales no suele afectar significativamente la resistencia a la compresión máxima del concreto. Cualquier cambio es generalmente nulo o mínimo. En algunos casos puede presentarse un leve aumento (si las fibras reducen las microfisuras) o una ligera disminución (si la trabajabilidad se ve comprometida). De acuerdo con el estudio de Sridhar & Prasad [13], se ensayaron cilindros con FA a compresión, añadiendo un volumen igual al 1 %, lo que resultó en un incremento en la capacidad de carga del 12 %. En nuestro caso, todos los ensayos fueron diseñados con un porcentaje de volumen de fibra de 0.56 %, significativamente inferior al de otros estudios, aun así, se obtuvo un incremento de la resistencia a la compresión en 13.25 %. Esto se debe a diferentes condiciones de diseño de la mezcla, como el volumen promedio de aire y la combinación de agregados, utilizadas para evitar la segregación y la formación de espacios vacíos dentro de la matriz.

Con la finalidad de comparar todas las tipologías, la Figura 9 presenta las curvas carga-deflexión resultantes del promedio de las vigas de cada grupo. Se evidencia que la adición de FA conlleva un aumento en la capacidad de carga y, especialmente, una

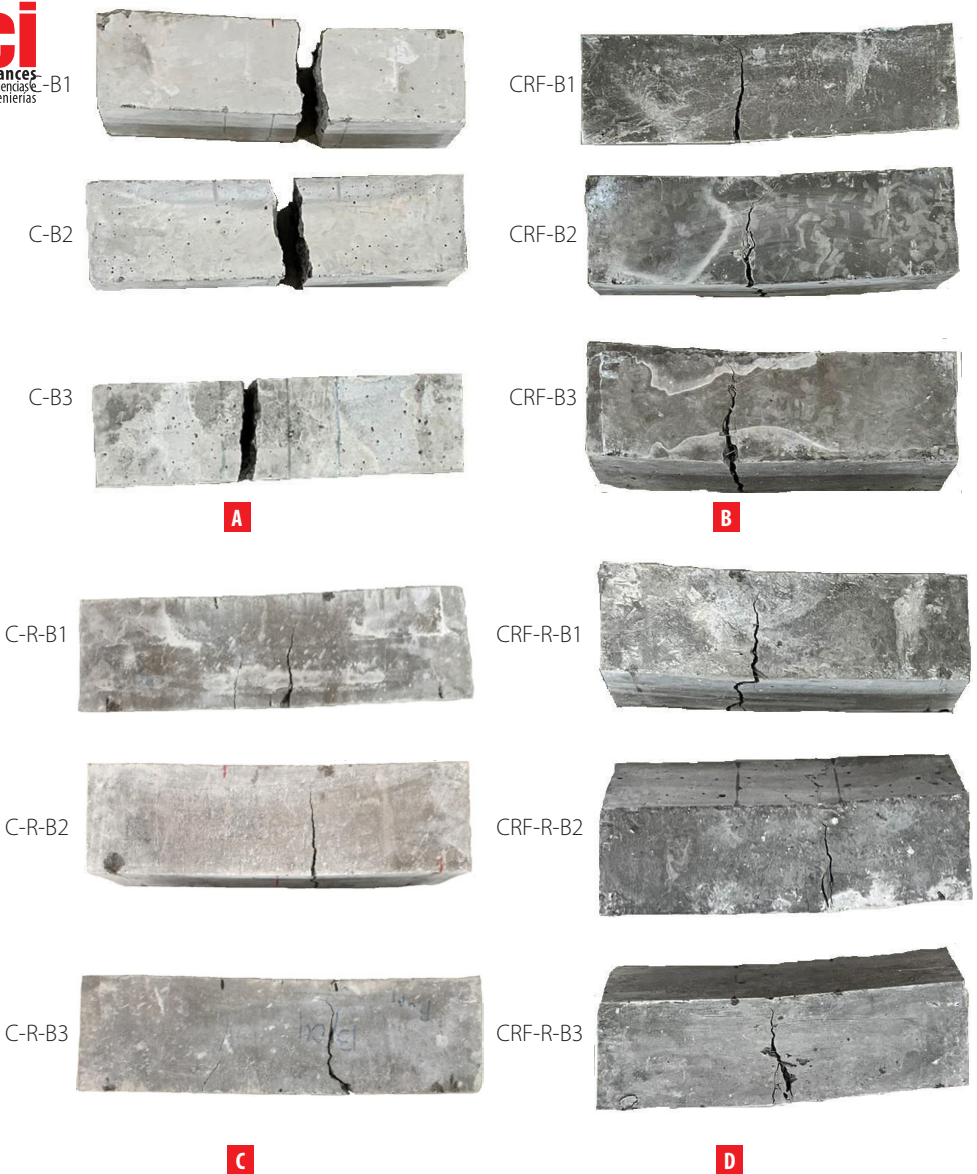


mejora significativa en la deflexión, lo que implica una mayor absorción de energía y ductilidad. En particular, el grupo (CRF-R-B) demuestra ser la mejor configuración entre las estudiadas. Esto se atribuye a que las FA son capaces de doblarse y/o alargarse a medida que se añade carga, mejorando la adherencia entre las barras de refuerzo y el concreto.



**FIGURA 9.** Comparación de las curvas carga-deflexión promedio de las vigas ensayadas.

El hormigón por sí solo responde adecuadamente a esfuerzos de compresión; sin embargo, a tracción es un material muy frágil. Es importante reconocer que las FA presentan una mayor deformación a tracción antes de la rotura en comparación con la matriz de hormigón. Además, cuando la matriz está sometida a cierto nivel de carga de tracción, el concreto reforzado con fibras se agrieta, pero la resistencia a la separación total se mantiene gracias a la acción de las fibras, las cuales unen las superficies fisuradas e influyen en la redistribución de esfuerzos, creando puentes de conexión que incrementan la capacidad de carga y deformación.



**FIGURA 10.** Fisuras de las muestras: **A** Vigas de concreto simple (C-B); **B** Vigas de concreto y FA (CRF-B); **C** Vigas de concreto reforzado (C-R-B); **D** Vigas de concreto reforzado y FA (CRF-R-B).

La implementación de FA en las mezclas también influye en el modo de falla de los especímenes prismáticos. Esto se evidencia al comparar las vigas (C-B) con las vigas (CRF-B). Las primeras se caracterizan por una falla repentina en el tercio central, separándose en



dos piezas [Figura 10 (a)]. En cambio, las vigas tipo (CRF-B) también desarrollan grietas en el tercio central; sin embargo, tras la falla, las piezas permanecen unidas, lo que indica una mayor capacidad de deformación y resistencia a la carga [Figura 10 (b)].

## CONCLUSIONES

A partir del estudio experimental del comportamiento a compresión y flexión de vigas de concreto simple y concreto reforzado, incorporando 0.56 % de fibras de acero en volumen, se establecen las siguientes conclusiones:

La adición de fibras de acero genera una reducción moderada de la trabajabilidad (disminución de 30 mm en el asentamiento), sin comprometer la correcta colocación del concreto. Todas las mezclas superan los 24 MPa de resistencia a compresión, registrándose un incremento promedio del 13.25 % respecto al concreto de control. Asimismo, se observa un aumento del 28.12 % en el módulo secante en el pico, lo que evidencia una matriz ligeramente más rígida y con mayor control de fisuración inicial.

En vigas de concreto simple, la incorporación de fibras produce mejoras significativas en el comportamiento a flexión. El esfuerzo de primer pico aumenta 36.07 % y el esfuerzo máximo 33.63 %. La respuesta post-fisuración muestra una mejora sustancial, reflejada en una absorción de energía 6.85 veces mayor, un coeficiente de resistencia 5.74 veces superior y un incremento de ductilidad del 187.23 %, transformando el comportamiento frágil del concreto convencional en una respuesta marcadamente dúctil.

En vigas con armadura longitudinal, la presencia de fibras reduce ligeramente el esfuerzo de primer pico (10.12 %), pero incrementa el esfuerzo máximo en 12.85 %, así como los esfuerzos residuales y la capacidad de disipación de energía. La ductilidad aumenta 38.02 %, confirmando que las fibras actúan como un refuerzo complementario eficaz al acero convencional, especialmente en la etapa post-fisuración.

Los resultados demuestran que el uso combinado de fibras de acero y armadura tradicional mejora la capacidad resistente, la ductilidad y la absorción de energía sin necesidad de aumentar la sección transversal. Este comportamiento se asocia con una redistribución más eficiente de esfuerzos y con el efecto de puenteo de fisuras, lo que favorece el aprovechamiento del acero de refuerzo próximo a su capacidad última.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la empresa HOLCIM Ecuador S.A. (Cuenca) por su apoyo y colaboración en la realización de este estudio. Los autores también agradecen a la Universidad Católica de Cuenca y al proyecto de investigación PIC5P23-33, «*Estudio sismorresistente de viviendas de interés social analizando el rango inelástico de los elementos de lámina delgada*».



## CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Jonathan Jesús Molina Ponce: conceptualización, metodología, software, investigación, recursos, conservación de datos, redacción del borrador original, redacción, revisión y edición, obtención de financiación. Jaime Xavier Nieto-Cárdenas: conceptualización, validación. Pilar Roxana Naspud-Uruchima: metodología, validación, análisis formal, visualización, supervisión, administración del proyecto.

Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

## DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE TECNOLOGÍAS DE IA GENERATIVA Y ASISTIDA EN LA REDACCIÓN

Durante la preparación de este trabajo, los autores utilizaron ChatGPT con el propósito de asistencia en la redacción. Posteriormente, los autores revisaron y editaron el contenido según lo consideraron necesario, asumiendo la plena responsabilidad por la versión final del texto y su contenido publicado.

## DECLARACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos están disponibles en un repositorio de acceso abierto bajo el DOI: 10.5281/zenodo.17273947

## CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran que no existe conflicto de interés relacionado con la publicación de este artículo.

## REFERENCIAS

- [1] Naaman, A. E. (2018a). *Fiber reinforced cement and concrete composites*. Techno Press 3000.
- [2] Lee, M. G., Kan, Y. C., Shih, Y. F., Wang, Y. X., & Lee, M. J. (2020). Design and build of a remote control concrete boat. *Key Engineering Materials*, 847, 34–39. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.847.34>
- [3] Kidder, F. E., & Parker, H. (1931). *Kidder-Parker architects' and builders' handbook*. John Wiley & Sons.
- [4] Naaman, A. E. (July 22–25, 2018). *Fiber reinforced concrete: Five decades of progress* [Conference presentation]. 4th Brazilian Conference on Composite Materials, Rio de Janeiro, Brazil. <https://doi.org/10.21452/bccm4.2018.02.01>
- [5] Khan, M., Shakeel, M., Khan, K., Akbar, S., & Khan, A. (2022). A review on fiber-reinforced foam concrete. *Engineering Proceedings*, 22(1), 13. <https://doi.org/10.3390/engproc202202013>
- [6] Mohamed, G. A., Sallam, E. A., & Elbelacy, A. N. (2022). Structural behavior of reinforced concrete beams containing nanomaterials subjected to monotonic and cyclic loadings. *Buildings*, 12(10), 1620. <https://doi.org/10.3390/buildings12101620>
- [7] Kytinou, V. K., Chalioris, C. E., Karayannis, C. G., & Elenas, A. (2020). Effect of steel fibers on the hysteretic performance of concrete beams with steel reinforcement—Tests and analysis. *Materials*, 13(13), 2923. <https://doi.org/10.3390/ma13132923>
- [8] Stephen, S. J., & Gettu, R. (2020). Fatigue fracture of fibre reinforced concrete in flexure. *Materials and Structures*, 53, 56. <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01488-7>
- [9] Jenifer, J. V., & Brindha, D. (2021). Development of hybrid steel-basalt fiber reinforced concrete in aspects of flexure, fracture and microstructure. *Revista de la Construcción*, 20(1), 62–90. <http://dx.doi.org/10.7764/rdlc.20.1.62>
- [10] Ranjbaran, F., Rezaifar, O., & Mirzababai, R. (2018). Experimental investigation of steel fiber-reinforced concrete beams under cyclic loading. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 10(1), 49–60. <https://doi.org/10.1007/s40091-018-0177-1>
- [11] Bassiürücü, M., Fenerli, C., Kına, C., & Akbaş, Ş. D. (2022). Effect of fiber type, shape and volume fraction on mechanical and flexural properties of concrete. *Sustainable Construction Materials and Technologies*, 7(3), 158–171. <https://doi.org/10.47481/jscmt.1137088>
- [12] Parvez, A., & Foster, S. J. (2015). Fatigue behavior of steel-fiber-reinforced concrete beams. *Journal of Structural Engineering*, 141(4), 04014117. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001074](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001074)
- [13] Sridhar, R., & Prasad, R. (2019). Static and dynamic responses of a reinforced concrete beam strengthened with steel and polypropylene fibers. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 27(3), 44–54. <https://doi.org/10.2478/sjce-2019-0021>
- [14] ASTM International. (2009). *ASTM C1609/C1609M-09: Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading)*. ASTM International.
- [15] ASTM International. (2012). *ASTM C39/C39M-12: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. ASTM International.
- [16] ACI Committee 211. (2002). *Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete (ACI 211.1-91)*. American Concrete Institute. <https://www.concrete.org>
- [17] Holcim Ecuador. (2021). *Concreto Ecopact*. <https://www.holcim.com.ec>
- [18] ASTM International. (2011). *ASTM C1157-11: Standard performance specification for hydraulic cement*. ASTM International.
- [19] ASTM International. (2005). *ASTM C494/C494M-05: Standard specification for chemical admixtures for concrete*. ASTM International.
- [20] NV Bekaert SA. (2012). *Dramix® steel fibers*. <https://dramix.bekaert.com>
- [21] Liao, W. C., Chao, S. H., Park, S.-Y., & Naaman, A. E. (2006). *Self-consolidating high performance fiber reinforced concrete (Technical Report No. UMCEE 06-02)*. University of Michigan.
- [22] ASTM International. (2003). *ASTM C143/C143M-03: Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete*. ASTM International.
- [23] ASTM International. (2019). *ASTM C31/C31M-19: Standard practice for making and curing concrete test specimens in the field*. ASTM International.