

Ensayo experimental y modelo computacional de vigas de hormigón armado con refuerzos metálicos

Carolina Colmán Benítez ^a; David Pachinik Rotela ^b

^a Universidad Nacional de Itapúa, Encarnación, Paraguay, carolina.colman@fiuni.edu.py

^b Universidad Nacional de Itapúa. Encarnación, Paraguay, david.pachinik@fiuni.edu.py

Resumen

El presente trabajo analiza y compara el comportamiento mecánico de 12 vigas de hormigón armado, clasificadas en: vigas sin refuerzos metálicos de los cuales 3 elementos son pertenecientes a las vigas padrón, y vigas con refuerzos metálicos, de los cuales 9 elementos son pertenecientes a los elementos fortalecidos con bandas de acero delgado mediante encolado con resinas epóxicas, divididos en 3 grupos, según la disposición de las bandas de acero. El objetivo fue comparar la respuesta computacional y experimental de las vigas en términos de carga, deformación y fisuración. La experimentación consistió en someter a las vigas a ensayos de flexión pura, aplicando cargas simétricas a 1/3 y 2/3 de la longitud de la viga. Se midieron características del comportamiento mecánico, tales como cargas máximas de ruptura, aparición de fisuras y desplazamiento vertical en el centro de la viga. Para el análisis computacional, se utilizó el software ATENA, permitiendo una comparación con los resultados experimentales. Los resultados indicaron que las vigas reforzadas, a pesar del diseño similar, lograron soportar mayores cargas de servicio y mostraron menor deflexión, evidenciando un comportamiento superior gracias al incremento en la rigidez de la sección, asociado a un mayor momento de inercia debido a las bandas de acero. El análisis computacional también validó el comportamiento experimental de las vigas y puede utilizarse como método de ensayo predictivo para vigas reforzadas.

Palabras clave: vigas con refuerzos metálicos, ensayo de flexión pura, resina epóxica.

Abstract

This paper analyses and compares the mechanical behaviour of 12 reinforced concrete beams, classified as: beams without metal reinforcements, of which 3 elements belong to the standard beams, and beams with metal reinforcements, of which 9 elements belong to the elements strengthened with thin steel bands by gluing with epoxy resins, divided into 3 groups, according to the arrangement of the steel bands. The objective was to compare the computational and experimental response of the beams in terms of load, deformation and cracking. The experimentation consisted of subjecting the beams to pure bending tests, applying symmetrical loads at 1/3 and 2/3

of the beam length. Characteristics of the mechanical behaviour were measured, such as maximum breaking loads, appearance of cracks and vertical displacement at the centre of the beam. For the computational analysis, ATENA software was used, allowing a comparison with the experimental results. The results indicated that the reinforced beams, despite the similar design, were able to withstand higher service loads and showed lower deflection, evidencing superior performance due to the increased stiffness of the section, associated with a higher moment of inertia due to the steel bands. The computational analysis also validated the experimental behavior of the beams and can be used as a predictive test method for reinforced beams.

Keywords: metal-reinforced beams, pure bending test, epoxy resin.

1. Introducción

Una estructura de hormigón armado es un material compuesto susceptible al deterioro natural que ocurre con el transcurrir de los años, y que son agravadas por factores como:

- Una mala proyección estructural.
- Precario control de calidad de materiales.
- Bajo control en la ejecución de obra.
- Carente seguimiento de inspección de la estructura.

Una alternativa para mejorar la capacidad resistente de los elementos estructurales es recurrir a distintos tipos de refuerzo que buscan mejorar el comportamiento mecánico de las vigas de hormigón armado, así como también disminuir las deflexiones de las mismas [1]. La experimentación del acero como material de refuerzo en las estructuras ha demostrado que el acero mejora las fallas a tracción producidas por cargas a flexión, dando como resultado estructuras más resistentes a combinaciones de cargas [2].

Asimismo, las características del acero lo hacen como el elemento de mayor ductilidad en las estructuras y si las causas del deterioro de la estructura provocaron fisuras que pueden ser prevenidas por el acero [3], esto será compatible con este por sus propiedades mecánicas, ayudará también, a no solo

reforzar, sino que además frente a otro evento de fuerzas actuantes adicionales, el acero funcionará como el elemento dúctil que es y no dejará que la estructura se desintegre, por el contrario, como el acero funciona mejor a tracción que a compresión este permitirá un ligero movimiento de deformación y luego volverá a su estado original siempre y cuando no se excedan sus capacidades mecánicas. Antes las reseñas históricas L'Hermite [4] y Bresson [5], presentaron su trabajo publicando al coloquio RILEM una nota muy completa sobre la forma de trabajar de estos refuerzos a los que se denominó "betón plaqué". Mientras que, en 1969, en España, Canovas [6] fue el primer investigador en emplear el refuerzo estructural con bandas de acero encoladas con resina epoxi. La aplicación se realizó en la estructura de un edificio ubicada sobre la calle Arturo Soria de Madrid, la misma presentaba una falta de armadura a flexión en vigas.

En 1977, en Toulouse (Francia), tuvo lugar una jornada dedicada a los sistemas de refuerzos de hormigón y sus aplicaciones realizadas en puentes, túneles y estructuras diversas. De forma paralela a las realizaciones de MF. Canovas [6] se llevaron en Francia el estudio de refuerzos bajo la

dirección de L'Hermite y Bresson, con la finalidad de evaluar la eficacia de tales procedimientos, así como a resaltar los elementos que condicionan el dimensionado, tales como longitudes de anclaje y esfuerzos máximos transmisibles por el adhesivo.

Según L'Hermite [4], "Una viga soportada a flexión bajo la acción de los incrementos de carga se encuentra sometida a aumentos de tensiones que se repartirán entre la armadura existente y la banda de acero de refuerzo encolada". Las tensiones se distribuyen de manera proporcional a las secciones relativas y a las distancias centroidales de la armadura interior y la de refuerzo, estos datos son la base para el dimensionado y el análisis de tensiones en las secciones críticas.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Evaluar experimental y computacionalmente el comportamiento de vigas de hormigón armado con refuerzos de planchuelas metálicas.

2.2 Objetivos Específicos

- Establecer la disposición del refuerzo en cada viga en base a cada restricción.
- Determinar las fallas en las vigas al ser sometidas por medio de cargas aplicadas a 1/3 y 2/3 de la longitud a la flexión simple.
- Comparar el comportamiento de una viga de concreto con reforzamiento externo a una viga de concreto sin reforzamiento.
- Determinar la resistencia en base a los porcentajes de aumento de carga entre una viga con reforzamiento y otra viga sin reforzamiento.
- Comparar los modelos computacionales de los 4 tipos de vigas con los resultados obtenidos experimentalmente.

3. Materiales y Métodos

Los parámetros constructivos que influyen en el elemento reforzado incluyen la aplicación de una Normativa como la ACI y la EHE, que aseguran y amparan el diseño de un elemento estructural; estableciendo especificaciones técnicas que indican los materiales a utilizarse en la producción de las actividades del proyecto, así mismo indica los ensayos a que deben ser sometidos los materiales, la ejecución de la actividad, la unidad de medida y los instrumentos de medición.

3.1 Materiales utilizados

El hormigón se ha diseñado y dosificado de forma que se obtenga una resistencia característica $f_{ck} = 21$ MPa.

Se utilizaron como armaduras longitudinales y transversales, varillas corrugadas tipo AP 500, $f_{yk} = 500$ MPa, en diámetros de 8 mm. La armadura de refuerzo debe ser tal que la viga tenga un comportamiento dúctil, y se optó por una planchuela de $1/8 \times 2$ ".

El adhesivo usado para el pegado de las placas metálicas fue un epoxi tixotrópico, libre de solventes, producto comercial SIKADUR 31, de dos componentes basado en resinas epóxicas modificadas.

3.2 Ensayos realizados

Ensayo de compresión en probetas

La resistencia característica del hormigón se determinó por ensayos de rotura a compresión de muestras tomadas en probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, siendo el número de muestras tomadas igual a 7 para el único lote de $1,56 \text{ m}^3$ de hormigón con el cual se cargaron las 12 vigas ensayadas. Las probetas fueron curadas en agua saturada con cal hasta someterse a la compresión a los 28 días.

Ensayo de flexión en vigas

Corresponden a un ensayo de tracción por flexión a la rotura siguiendo las disposiciones de la norma ASTM 31 especificadas para probetas prismáticas de hormigón simplemente apoyadas. Se aplicaron cargas $P/2$ en los límites del 4 tercio central de la luz de ensayo tal como se observa en la Fig. 1.

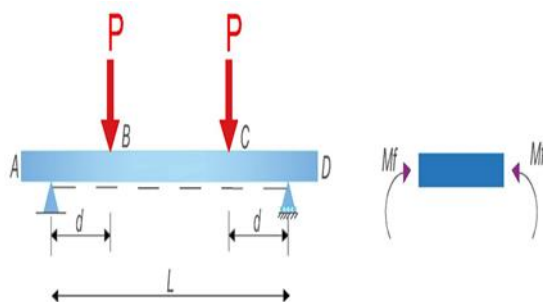


Fig. 1. Configuración de cargas y apoyos para las vigas.

Para realizar los ensayos se necesitaron de equipos que se describen brevemente.

El pórtico y piso de reacción, fue diseñado y fabricado para soportar reacciones de cargas puntuales de 20 t, fabricado con chapas lisas de acero al carbono, unidas con soldadura para conformar secciones de alma llena en los parantes verticales y horizontales, llevando entre estas uniones atornilladas.

El anclaje al piso de reacción se logró mediante pernos metálicos de anclaje. El piso y la viga de transmisión de carga se construyeron de hormigón armado.

Un cilindro hidráulico fue utilizado para proveer la fuerza necesaria para la aplicación de las cargas, con capacidad máxima de 20 t. De tipo invertido, montado en la parte superior del pórtico, con accionamiento manual que permite ensayos a velocidad controlada.

El manómetro utilizado mide hasta 700 bar, Visor XZT digital pressure gauge, que arroja unidades en MPa, y convertibles a bar,

kg/cm², psi, kN y t, con tabla de conversión.

Para medir las deflexiones de las vigas se ha dispuesto de deflectómetros de tipo digital, con recorrido total de 25 mm y precisión de 0,01 mm. Con los registros de las deflexiones del punto medio y las cargas actuantes correspondientes, se ha graficado las curvas de cargas versus deflexión.

El fisurómetro se usó para registrar la aparición de fisuras en función al paso de carga realizado en los ensayos y el ancho máximo de las fisuras generadas. Se ha utilizado un fisurómetro con rango de 0,10 a 2,50 mm.

3.3 Planeamiento del ensayo

Las 12 vigas de dimensiones, 15 cm x 25 cm x 350 cm, se confeccionaron con una única disposición de armado que corresponde al uso de varillas corrugadas de 8 mm de diámetro tanto en el acero longitudinal como para la armadura transversal (estribos). Las 12 vigas se dividieron en 4 grupos (Fig. 2) en función a su refuerzo metálico exterior de 1,27 cm² de sección. En la Fig. 3 se puede ver una imagen de viga con refuerzo metálico.

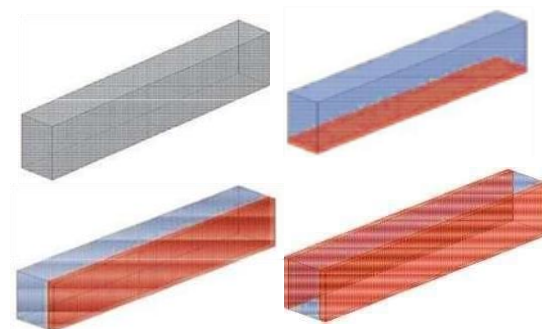


Fig. 2. Grupos en función del refuerzo en color rojo: viga padrón; viga con refuerzo inferior; viga con refuerzo lateral y viga con doble refuerzo lateral.

Las 2 cargas aplicadas con módulos 10 t fueron simétricas y puntuales, localizadas a 1/3 de la longitud de los apoyos simples. Se

tomaron mediciones de flechas en distintos puntos característicos con captadores manuales y eléctricos con los que viene equipada la prensa de ensayos.



Fig. 3. Refuerzo metálico en vigas.

Los puntos de estudio fueron el ubicado a $L/2$, donde ocurren las máximas deformaciones y tensiones por efecto de la flexión pura de magnitud constante en el tercio central; y los puntos de apoyo de carga localizados a $L/3$ donde simultáneamente el esfuerzo cortante y el momento flector son máximos. En la Fig. 4 se observa el montaje de una viga.



Fig. 4. Montaje para ensayo de una viga.

3.4 Modelo Computacional

Se utilizó un programa de análisis numérico, que utiliza el método de elementos finitos, llamado ATENA, de Cervenka Consulting, que está enfocado exclusivamente en el análisis de estructuras de hormigón armado. Los parámetros del hormigón introducidos al modelado, obtenidos por medio del ensayo de control, y según fórmulas recomendadas por normas especializadas fueron:

Módulo elástico, $E_c = 22.690 \text{ MPa}$.

Coefficiente de Poisson, $\nu = 0,20$.

Tensión máxima de compresión, 21 MPa .

Tensión máxima de tracción, $2,1 \text{ MPa}$.

Energía específica de fractura, $5 \times 10^{-5} \text{ MN/m}$.

Se eligió el modelo de comportamiento bilineal con endurecimiento luego de alcanzar el límite elástico, es decir, en el tramo inicial un comportamiento perfectamente elástico, con relación entre tensión y deformación según módulo elástico del acero hasta alcanzar la tensión de fluencia, y luego un comportamiento elasto-plástico.

Los parámetros de modelado para las barras de acero macizas conformadas AP 500 DN fueron proporcionados por el fabricante:

Módulo elástico, $E_s = 200.000 \text{ MPa}$.

Tensión de fluencia, $\sigma_y = 600 \text{ MPa}$.

Tensión de rotura, $\sigma_t = 700 \text{ MPa}$.

Elongación máxima, $\epsilon_2 = 8\%$.

4. Resultados

4.1 Ensayos Experimentales

En la Fig. 5 se observan las curvas de carga - deflexión y en la Fig. 6 se visualizan las cargas últimas aplicadas.

La primera etapa del ensayo, en todos casos, consistió en cargar la viga hasta visualizar las primeras fisuras cuya presencia indican el final del comportamiento homogéneo.

Incrementando la carga se llegó a la fase elástica del elemento, posteriormente se llevó la viga hasta el agotamiento donde las fisuras tuvieron una evolución perfectamente vertical en el tercio central.

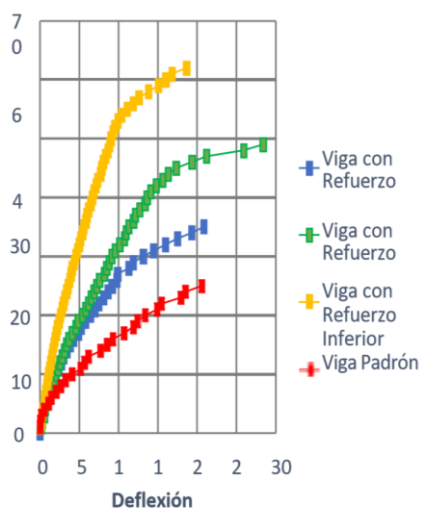


Fig. 5. Carga - Deflexión de Vigas (kN – mm).

Viga Padrón (VP)

La deformación tuvo un comportamiento homogéneo hasta una carga de 12 kN, posteriormente, las fisuras tuvieron un incremento perfectamente lineal hasta llegar a 25 kN, con deflexión central de 20,6 mm, siendo este el punto de colapso del elemento.

Viga Con Refuerzo Lateral (VL)

Presentó el fin de su comportamiento homogéneo con la aparición de las fisuras en su tercio central a 19 kN. La carga de rotura llegó a 35 kN, representando un incremento del 40% de la VP, con una deflexión central de 20,84 mm.

Viga Con Doble Refuerzo Lateral (V2L)

Presentó el fin de su comportamiento homogéneo con la aparición de las fisuras en su tercio central a 28 kN. La carga de rotura llegó a 48 kN, representando un incremento del 92% de la VP, con una deflexión central de 16,3 mm, demostrando una reducción en la deformación/flecha del elemento.

Viga Con Refuerzo Inferior (VI)

Presentó de manera más tardía el fin de su comportamiento homogéneo, con la aparición de las fisuras en su tercio central a 37 kN. La carga de rotura alcanzó los 62 kN, representando un incremento del 148% de la VP, con una deflexión central de 18,6 mm.

En todas las vigas se pudo verificar el comportamiento homogéneo de la sección, hasta visualizar las primeras fisuras de flexión en el tercio central de la viga.

Se verificó que las vigas llegaban hasta el colapso final de una forma dúctil, tal y como se tiene previsto teóricamente.

Las vigas con refuerzos metálicos incrementaron la resistencia a los momentos de servicio y redujeron las deflexiones, debido a un aumento de la rigidez ocasionado por un mayor momento de inercia de la pieza.

4.2 Modelos Computacionales

Los resultados obtenidos por el método experimental y computacional se visualizan en la Fig. 6. La tendencia en ambos es bastante similar y la predicción computacional queda verificada por la experimental.

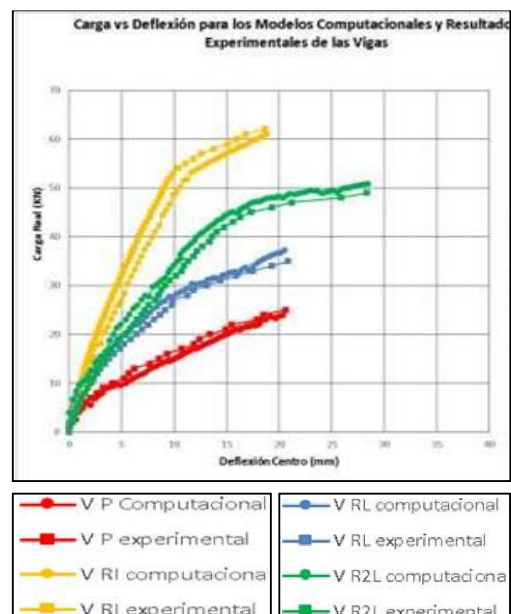


Fig. 6. Carga vs Deflexión para las vigas modeladas y ensayadas.

5. Conclusiones

El refuerzo a flexión de elementos de hormigón armado mediante bandas encoladas con resinas epóxicas, puede ser empleado de manera eficaz con el propósito de incrementar la capacidad resistente de la sección de viga, y reducir deformaciones que afecten a la seguridad y a la estética.

Las vigas con refuerzo metálico resultaron ser eficaces, desarrollando una resistencia de 2,38 veces la resistencia de una viga sin refuerzo, con una disminución significativa de la deflexión. Las vigas con refuerzo metálico en una sola cara lateral, no redujo significativamente la deflexión de la barra, pero fue eficaz con una capacidad resistente de 1,35 veces el de una viga sin refuerzo. Las vigas con refuerzo en ambas caras laterales, redujo significativamente la deflexión de la barra, desarrollando una resistencia de 1,88 veces el de una viga sin refuerzo.

Para todos los tipos de vigas se han obtenido comportamientos muy similares a los obtenidos en los ensayos experimentales, en relación a las cargas de fluencia, cargas finales, rigidez y patrón de fisuración, en los distintos estados de carga. Se observó la eficacia del modelo computacional, por tanto, se puede utilizar como método de ensayo predictivo de las distintas respuestas estructurales para cada tipo de viga.

La unión de materiales metálicos con el hormigón mediante un adhesivo epóxico es altamente confiable, asegurando la transmisión de esfuerzos entre hormigón y refuerzo.

6. Agradecimiento

Agradecemos al MSc. Ing. José Luis Gutiérrez Dichirico por su guía, ideas y sugerencias, para el desarrollo de este trabajo, así como, al MSc. Ing. Iván Semeniuk por compartir sus conocimientos, su amplia experiencia y permitirnos disponer de su laboratorio privado.

7. Referencias

- [1] M. Goldston. A. Remennikov. "Experimental investigation of the behaviour of concrete beams reinforced with GFRP bars under static and impact loading". Engineering Structures, vol. 113, pp. 220-232, abril 2016.
- [2] J. J. Ferrer N. "Vigas preesforzadas con refuerzo externo": Ingeniería e Investigación, tomo 41, pp. 16-20. Bogotá DC 1998.
- [3] J. W. Luo, F. J. Vecchio. "Behavior of steel fiber-reinforced concrete under reversed cyclic shear": ACI Structural Journal, vol. 113, pp. 75-84, January 2016.
- [4] R. L'Hermite. "Renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie par collage". Annales ITBTP n° 349.
- [5] J. Bresson. "Nouvelles recherches et applications concernant rutilisation descollages dans les structures. Béton plaque". Annales de l'ITBTP. Supplément au n° 278 Février 1972 Serie BBA/116.
- [6] M. F. Cánovas. "Refuerzo de elementos estructurales mediante encolado de bandas de acero con resinas epoxídicas". Cuadernos IETCC n° 382-383, diciembre 1985. -