

## **EXPERIMENTAL AND NUMERICAL EVALUATION OF PRESTRESSED CONCRETE BEAMS WITH WEB OPENNING**

**Ivan D. Semeniuk**

**José L. Gutierrez**

*ivan\_eme@hotmail.com*

*jgutierrez@ing.una.py*

*Master Student, Universidad Nacional de Asunción*

*Avda. Caballero, 6000, Encarnación/Itapúa, Paraguay*

*Dept. of Construction and Structures, Universidad Nacional de Asunción*

*Campus universitario, 2169, San Lorenzo/Central, Paraguay*

**Antonio Aquino**

*aaquino@ing.una.py*

*Campus universitario, 2169, San Lorenzo/Central, Paraguay*

*Dept. of Computational Mechanics, Universidad Nacional de Asunción*

**Abstract.** In the construction of either small or large buildings, we often find problematic openings in beams of the structure, due to the need of passing of different kinds of pipes.

The present study aims to investigate the influence of lateral openings in beams of prestressed concrete that were not design to resist this disturbance. Four combinations of openings where selected with height equal to the half of the total deep of the beam. The height/long rates studied are 1:1, 1:2, 1:3 y 1:4. Three beams where tested for every configuration of opening, as well as three beams without openings, by flexural test until the beams reach total collapse.

Once the failure loading was obtained, a numerical model was built that represents the observed and measure phenomenon in the load test. With the experimental and numerical results, the failure mechanism for every single configuration of beams was found.

Similar results were identified regarding the ultimate bearing capacity, however, the beams with openings tend to form cracks in an earlier station.

**Keywords:** concrete, prestressed, beam, opening

## 1 Introducción

En la actualidad, nos encontramos frecuentemente con problemas que atañan a la estructura de una edificación debido a la improvisación de pasos en las vigas para salvar las instalaciones de distintos tipos (sanitarias, eléctricas y de climatización). Debido a exigencias arquitectónicas y técnicas de las instalaciones, son realizadas aberturas de pasos en las caras laterales de vigas.

En este artículo se exponen modelos físicos de vigas postensadas sin y con aberturas rectangulares en las caras laterales. Estos modelos experimentales son sometidos a cargas verticales y medidas el contra desplazamientos en el centro de la viga. Posteriormente, se construyen modelos numéricos computacionales basados en una discretización por elementos finitos en el software ANSYS, los cuales son sometidos a las mismas cargas aplicadas en los experimentos, obteniéndose los desplazamientos y esfuerzos actuantes. Los modelos computacionales son validados en la medida de la reproducción adecuada de los resultados experimentales obtenidos.

## 2 Geometría a los cuerpos de estudio

Los cuerpos experimentales consisten en vigas de hormigón armado de sección transversal  $h=300\text{mm}$  y  $b=150\text{mm}$  con una longitud total de  $l=3200\text{mm}$ , como puede apreciarse en la siguiente figura.

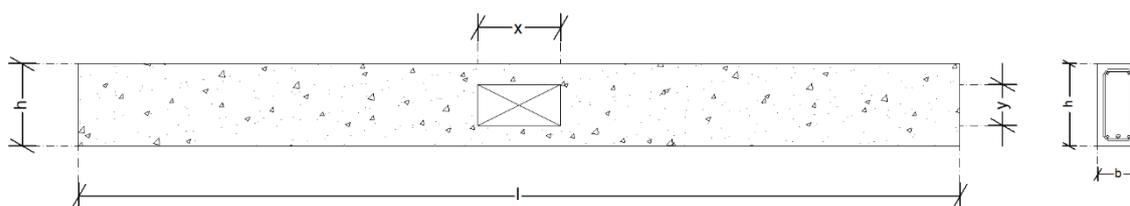


Figura 1. Geometría de los cuerpos de estudio

Table 1. Tamaño de aberturas en cuerpos de estudio

Identificación	Abertura (mm)	
	X	y
V-0	0	0
V-1:1	150	150
V-1:2	150	300
V-1:3	150	400
V-1:4	150	600

A fin de representar la problemática de estudio no son colocados refuerzos de confinamiento, estribos, en las zonas de los cordones comprimidos formados por la abertura, a fin de simular el caso más desfavorable donde la abertura es realizada luego que la estructura haya sido construida. Así también se utilizó un trazado parabólico de la armadura de pretensado, trazado más común en estructuras edilicias sometidas a cargas distribuidas de piso, a fin de observar el comportamiento del cordón inferior traccionado expuesto a los empujes que produce esta configuración.

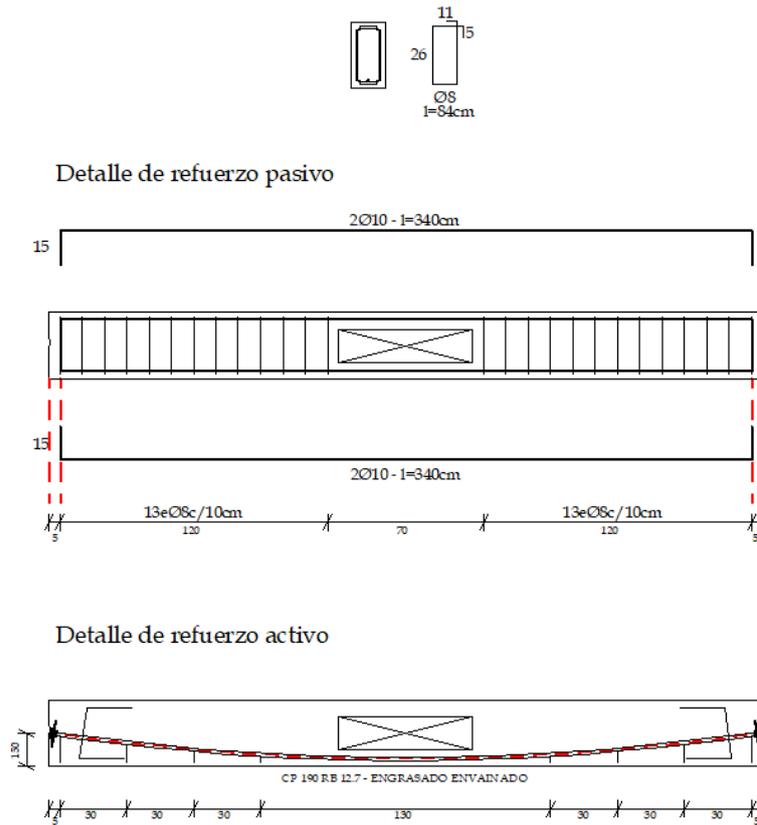


Figura 2. Detalle del refuerzo V-1:4

### 3 Esquema de prueba de carga

Son probadas las vigas a flexión pura, son aplicadas dos cargas puntuales separadas entre a 1000mm y equidistantes del centro del vano, según el esquema de la siguiente figura.

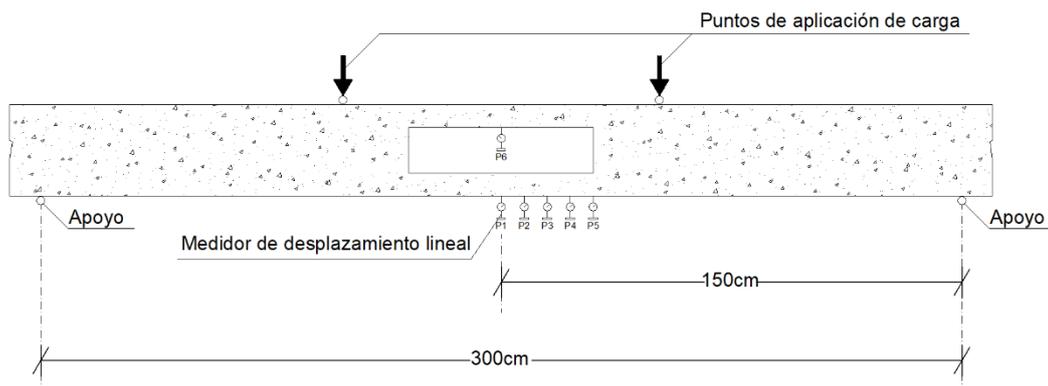


Figura 3. Esquema de prueba de carga

La carga es aplicada en escalones y son medidos los desplazamientos que estas generan.

## 4 Modelos numéricos

Son construidos modelos numéricos en el programa de elementos finitos ANSYS, correspondientes a las geometrías de estudio y con las características de los materiales provistos por ensayos de laboratorio como así también por fabricantes de los materiales. Algunos parámetros de comportamiento fueron conseguidos por medio de bibliografías de apoyo basados en pruebas experimentales y numéricas.

No son modeladas las armaduras activas, por lo que el efecto del pretensado es incluido como cargas al modelo estructural, en donde se colocan cargas de empuje vertical a lo largo de la viga y las cargas debidas a los anclajes son colocados de forma distribuida en el extremo de la viga a fin de no generar problemas en esta zona ya que se estudia el efecto en el centro del vano.

A fin de prestar atención a el efecto producido en servicio por la armadura de pretensado se ajusta a medida que se aplican de forma escalonada siguiendo las recomendaciones de la ACI 318-14 para la tensión nominal en servicio de refuerzo activo no adherente según la ecuación:

$$f_{ps} = f_{se} + 70 + \frac{f'_c}{100\rho_p} \quad (1)$$

Esta variación de tensión es dividida de forma proporcional a la carga de rotura presentada en los ensayos de cuerpos experimentales para cada configuración.

Es construido la mitad del modelo y colocado la función de simetría a fin de disminuir la cantidad de elementos a discretizar.

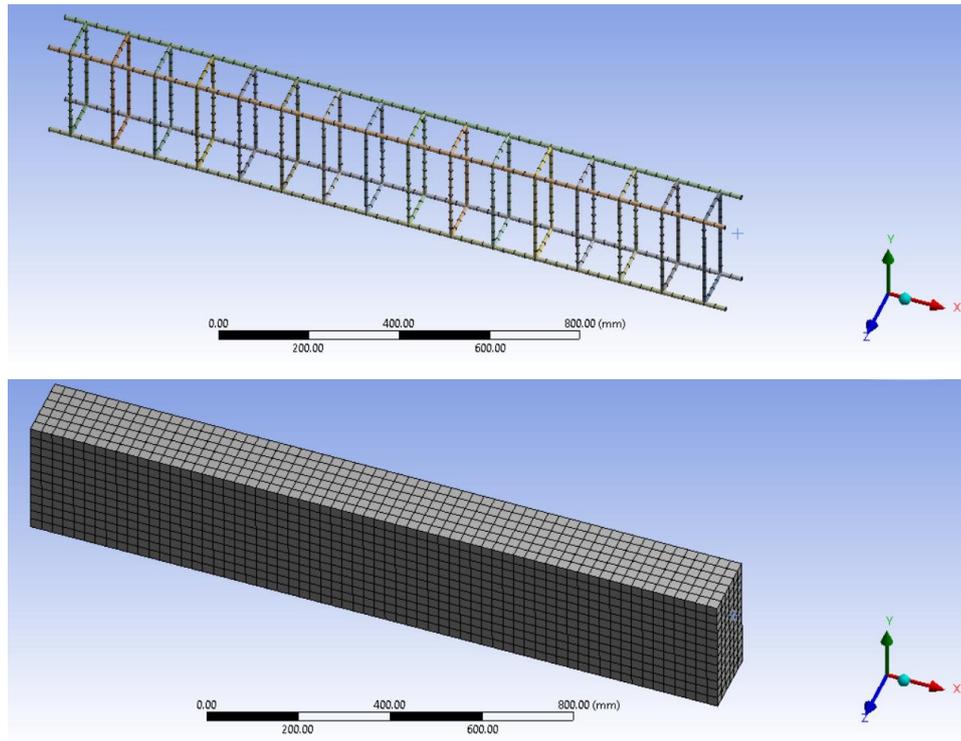


Figura 4. Vista de modelo numérico V-0

## 4.1 Hormigón

Para reproducir el comportamiento del hormigón se utiliza un elemento tipo sólido de orden lineal definido como SOLID65 al que se le agregan los siguientes parámetros:

- Comportamiento de material (CONCR)
  - Coef. de transferencia de carga en fisuras abiertas: 0.2
  - Coef. de transferencias de carga en fisuras cerradas: 0.8
  - Resistencia a la tracción: 4.1 MPa
  - Resistencia al aplastamiento: 36 MPa
- Comportamiento Multilinear
  - Módulo de Elasticidad:  $E_c=28200$  MPa
  - Módulo de Poisson  $\mu=0.2$
  - Curva tensión-deformación:

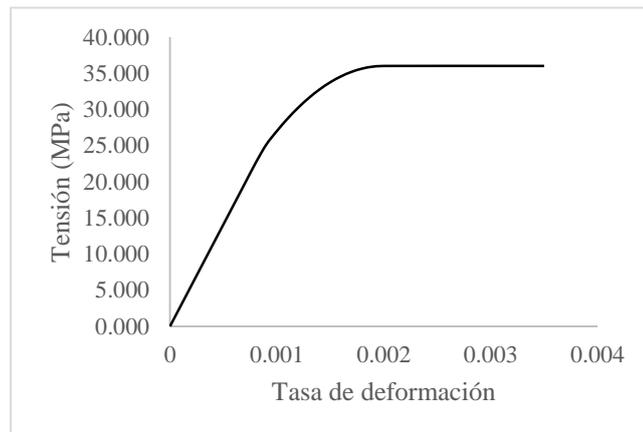


Figura 5. Curva tensión-deformación del material hormigón

## 4.2 Refuerzo pasivo adherente

Las armaduras de refuerzo pasivo adherente son simuladas por medio de elementos BEAM188, con características bilineares con los siguientes parámetros.

- Módulo de elasticidad:  $E_s=200000$  MPA
- Módulo de Poisson:  $\mu=0.2$
- Tensión de Fluencia:  $f_y=500$  MPa
- Módulo tangencial: 9500

## 5 Resultados

A continuación, son presentados los resultados de los ensayos experimentales y numéricos obtenidos mediante la prueba de carga real y la simulación computacional.

### 5.1 Carga-deformación

Son presentados los resultados comparativos de carga deformación entre los cuerpos experimentales y el modelo numérico considerando el punto central del cordón inferior (traccionado).

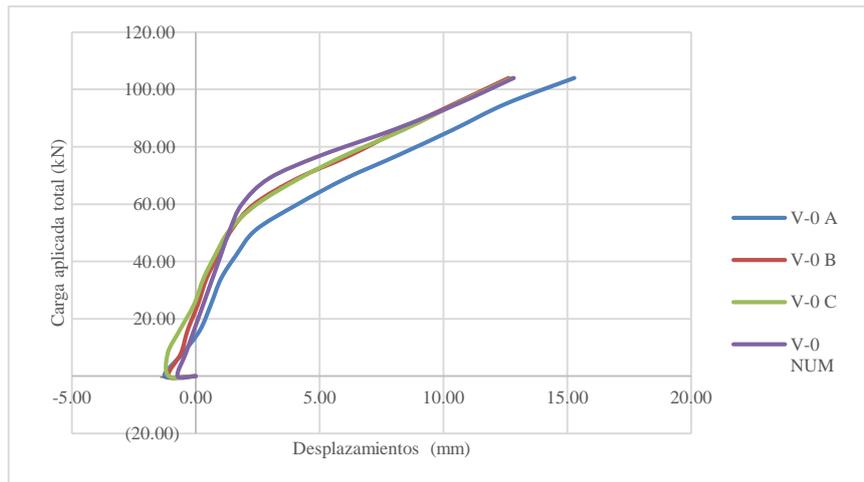


Figura 6. Resultado Carga-Deformación V-0 en el punto 1

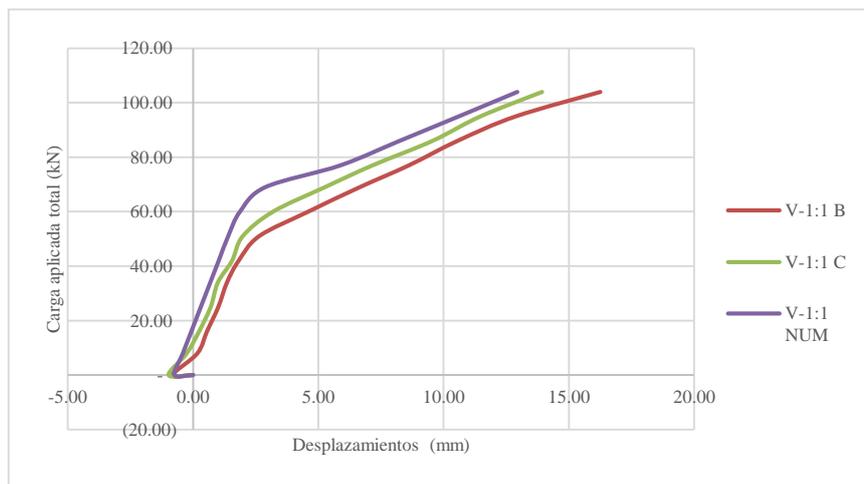


Figura 7. Resultado Carga-Deformación V-1:1 en el punto 1

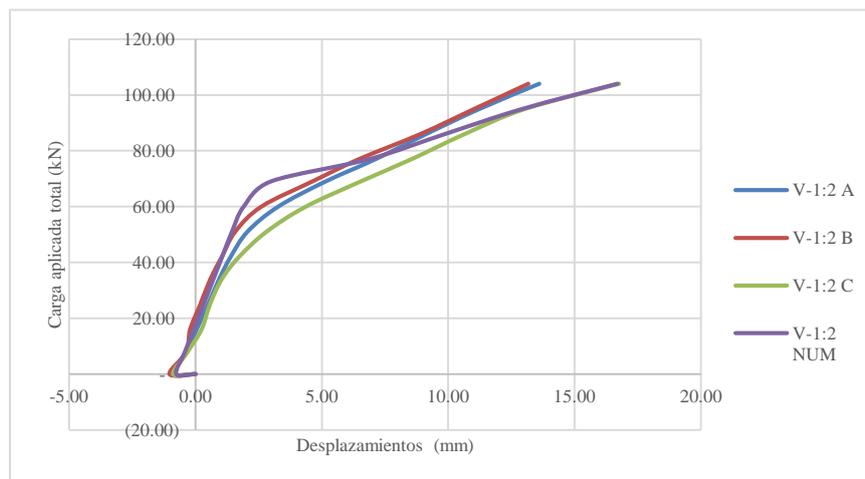


Figura 8. Resultado Carga-Deformación V-1:2 en el punto 1

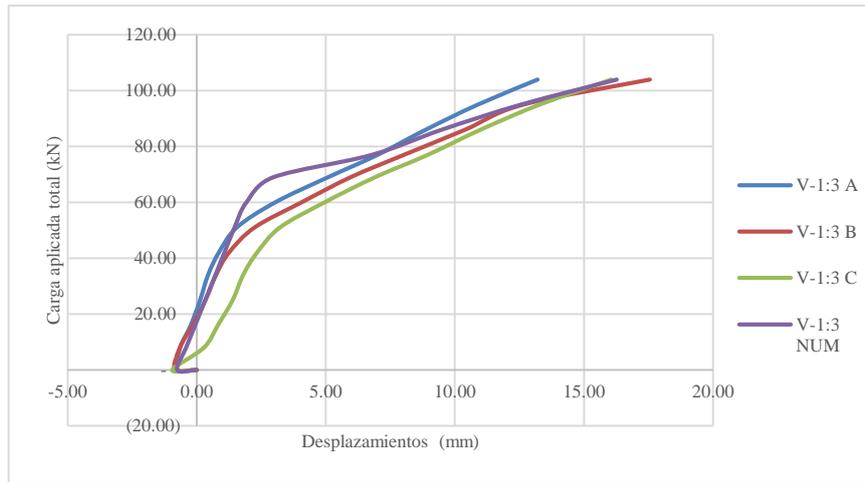


Figura 9. Resultado Carga-Deformación V-1:3 en el punto 1

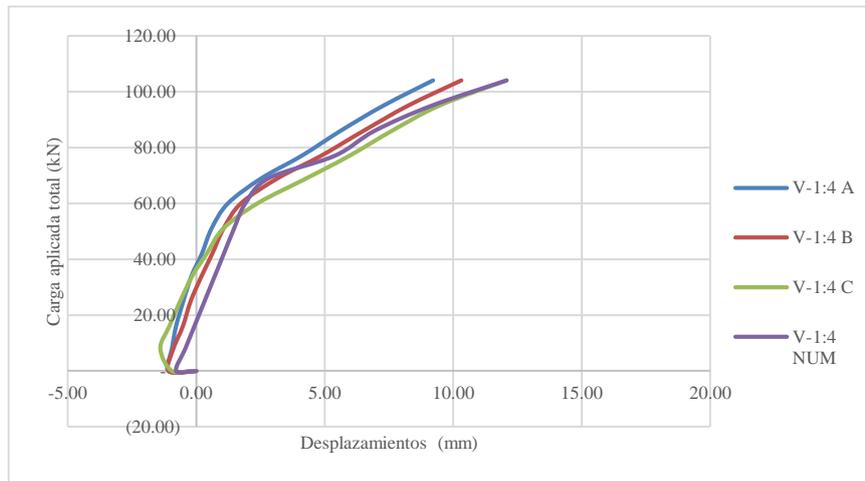


Figura 10. Resultado Carga-Deformación V-1:4 en el punto 1

## 5.2 Cargas Últimas

Todos los ensayos experimentales fueron llevados hasta la ruptura de la viga, en su mayoría mostraron fallas dúctiles a flexión con excepción de las vigas V-1:4 en donde ocurrió una falla frágil del cordón comprimido.



Figura 11. Rotura V-1:2



Figura 12. Rotura V-1:4

Las cargas ultimas de las simulaciones fueron obtenidas observando los resultados de las tensiones de compresión generadas en el hormigón, tambien fueron trazados los diagramas de carga deformación de los modelos numéricos para encontrar la carga de falla, carga a la cual el cuerpo se sigue deformando sin presentar aumento en esta. A continuación, se muestran las curvas para la viga V-1:4 NUM en los puntos de medición 1, 5 y 6 (Centro del vano, a 300m del centro y centro del vano en el cordón superior)

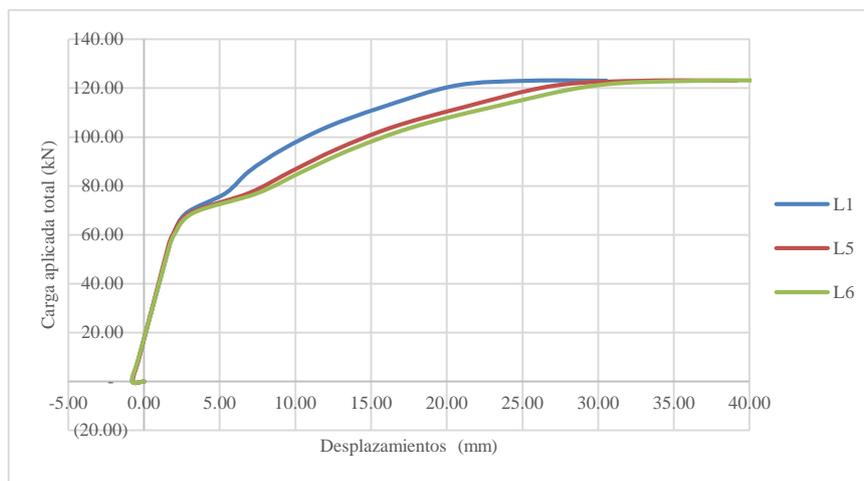


Figura 13. Resultado Carga-Deformación V-1:4 NUM

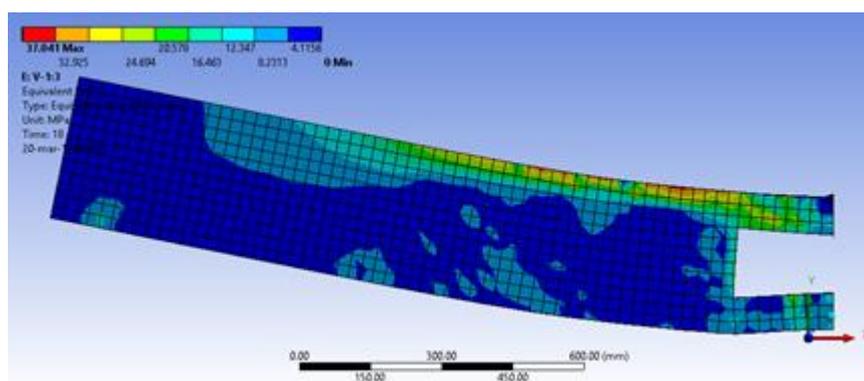


Figura 15. Tensiones en V-1:3 NUM

En la siguiente tabla se pueden ver los resultados de carga última de ambos métodos de estudio.

Table 2. Carga de rotura

VIGA	CARGA ULTIMA (kN)	
	Experimental	Numérico
V-0	132.70	140.00
V-1:1	131.80	142.00
V-1:2	131.95	131.00
V-1:3	130.45	131.00
V-1:4	131.58	123.00

### 5.3 Efecto local debido al trazado de la armadura activa

Se pudo observar el efecto producido, en los cordones traccionados, por el empuje de la armadura activa, de manera más acentuada en las vigas V-1:4.

Se formaron fisuras por flexión que iniciaron en la parte superior del cordón y en los extremos, producto de una sollicitación mayor a la resistencia a la tracción del hormigón.

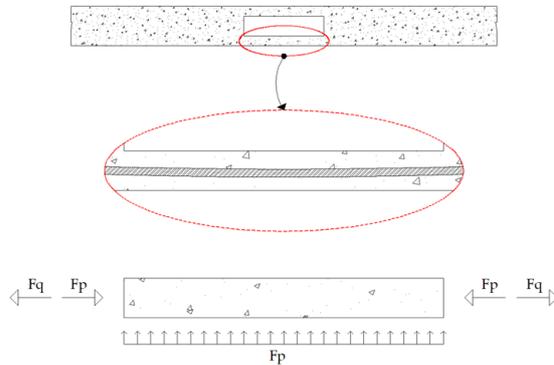


Figura 16. Esquema de carga local

Figura 17. Formación de fisuras por flexión local

Este comportamiento queda en evidencia gracias a las mediciones, donde a mayor dimensión de la abertura los desplazamientos en el punto 1 fueron menores, al mismo tiempo que la viga se desplaza globalmente por la carga aplicada hacia abajo, el punto medio sufre un desplazamiento local hacia arriba.

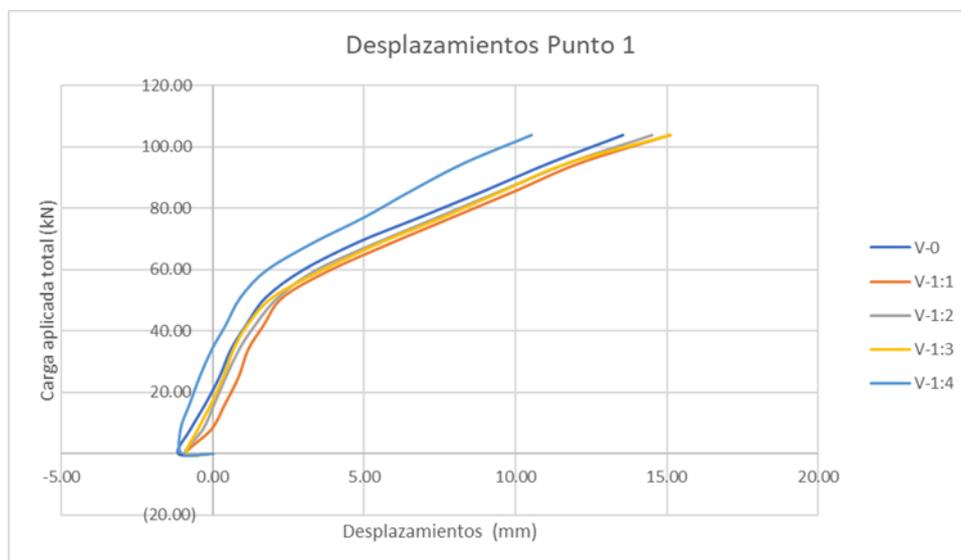


Figura 17. Deformaciones promedio punto 1 vigas experimentales

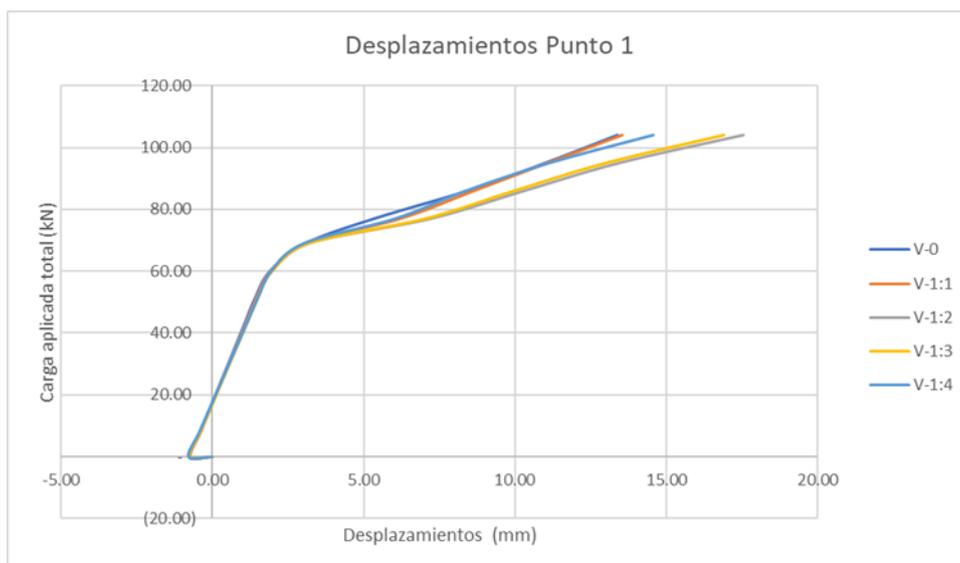


Figura 18. Deformaciones punto 1 vigas numéricas

Esto se puede verificar en el punto de medición de desplazamiento P5 en donde las vigas con aberturas mayores tuvieron mayores desplazamientos.

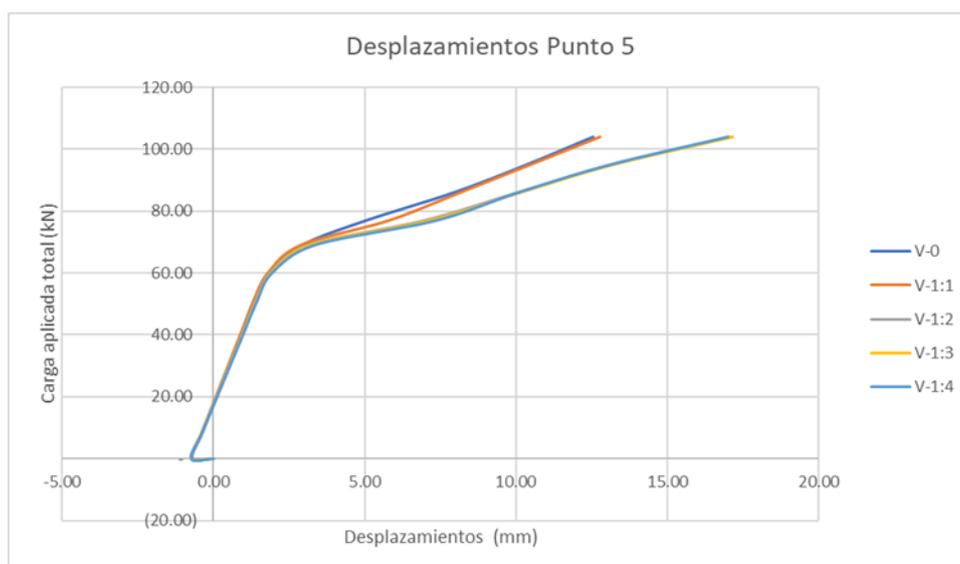


Figura 19. Deformaciones punto 5 vigas numéricas

## 6 Conclusiones

Durante la investigación se analizan la respuesta de vigas de hormigón pretensadas con aberturas de tamaño variables, ubicadas en el centro del vano de esta y bajo la acción de dos cargas puntuales que originan flexión pura entre la posición de estas.

Se pudo constatar que los modelos numéricos tienen una buena aproximación a los desplazamientos obtenidos en los ensayos experimentales. Se recuerda que el mecanismo de postensado se ha introducido al modelo en forma de cargas, teniendo en cuenta la colaboración de este mediante las recomendaciones normativas, de la ACI 318-14, colocando la variación de cargas durante el servicio de forma distribuida y lineal hasta alcanzar la carga última de los modelos experimentales. La simplicidad que aborda este modelo, aunque pueda demostrar pequeñas variaciones, tiene un gran desempeño sobre todo debido a que se vuelve muy ventajoso teniendo en cuenta el gasto computacional en el que se adentra la discretización del sistema de la armadura activa no adherente, así como el tiempo de refinamiento del modelo para obtener resultados concretos con un modelado completo.

En general, se puede constatar una buena aproximación a los valores de carga última entre los modelos numéricos y experimentales con un rango de diferencia de alrededor de 7%.

## 7 Bibliografía

- [1]. ABDALLA H. & KENNEDY J. "Design of Prestressed Concrete Beams with Openings". Journal of Structural Engineering, 1995a, Vol. 121, Nro. 5, pp. 890-898, ISSN: 0733-9445.
- [2]. ABDALLA H. & KENNEDY J. "Design Against Cracking at Openings in Prestressed Concrete Beams". PCI Journal, 1995b, Vol. 40, Nro. 6, pp. 60-75.
- [3]. ABDALLA H. & KENNEDY J. "Design Against Cracking at Openings in Prestressed Concrete Beams". Journal of Structural Engineering, 1995c, Vol. 121, Nro. 7, pp. 1058-1068, ISSN: 0733-9445.
- [4]. AKAHAIRI F. & NAAMAN A. "Analysis of Beams Prestressed with Unbonded Internal or External Tendons". Journal of Structural Engineering, 1993, Vol. 119, Nro. 9, pp. 2680-2700, ISSN: 0733-9445.
- [5]. BARNEY G., CORLEY G., HANSON J. & PARMELEE R. "Behavior and Design of Prestressed Concrete Beams with Large Web Openings". PCI Journal, 1977, Vol. 22, pp. 32-61.
- [6]. MANSUR M. & TAN K. "Concrete beams with openings: analysis and design" USA. 1999, ISBN 0-8493-7435-9. pp. 220.
- [7]. MANSUR, M. A. "Design of reinforced concrete beams with web openings". En: 6th Asia-Pacific Structural Engineering and Construction Conference (APSEC 2006). Malaysia, 5 y 6 de setiembre, 2006. pp. 104-120.